**T.C.**
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

# DEĞİŞKEN KOMŞULUK ARAMA ALGORİTMALARI İLE ELEKTRİKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

**DOKTORA TEZİ**

**YUSUF YILMAZ**

**DENİZLİ, NİSAN - 2023**

**T.C.**
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

# DEĞİŞKEN KOMŞULUK ARAMA ALGORİTMALARI İLE ELEKTRİKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

**DOKTORA TEZİ**

**YUSUF YILMAZ**

**DENİZLİ, NİSAN - 2023**

**Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 119M236 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**Yusuf YILMAZ**

# ÖZET


**DEĞİŞKEN KOMŞULUK ARAMA ALGORİTMALARI İLE ELEKTRİKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**YUSUF YILMAZ**

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. CAN BERK KALAYCI)**

**DENİZLİ, NİSAN - 2023**

Dünya, Paris Anlaşması'nı uygulayarak iklim değişikliğinin etkilerini sınırlamayı kabul etmiştir. Bu da dünya ekonomisinin en yoğun karbon-yoğun sektörlerinden biri olan ulaştırma sektöründe temel ve köklü değişiklikleri gerektirmektedir. Sektörde açık ara baskın enerji kaynağı petrol olduğu için, kullanılan araçların elektrifikasyonu dekarbonizasyon açısından önemli bir rol oynayacaktır. Böylece sera gazı emisyonuna ek olarak hava ve gürültü kirliliği de azaltılarak, bu kapsamdaki sağlık sorunlarının önlenmesine katkıda bulunulacaktır. Lojistik şirketleri açısından ise araç filolarının elektrifikasyonu, fosil yakıtlardaki yüksek ve dalgalı fiyatlara karşılık yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin kullanımı ile lojistik maliyetlerinde ciddi oranda tasarruf anlamına gelmektedir. Lojistik faaliyetlerinde elektrikli araçların (EA'ların) kullanımının yaygınlaşmasının önünde aşılması gereken bazı engeller bulunmaktadır. EA'ların enerji ihtiyacının karşılandığı bataryanın enerji kapasitesinin düşük olması sürüş mesafesine, şarj süresinin uzun olması da şarj istasyonunda (Şİ'de) bekleme süresine olumsuz anlamda etki etmektedir. EA filosuna sahip lojistik şirketleri açısından filonun rotalamasının müşterilerin servis taleplerini miktar ve zaman açısından karşılayabilecek şekilde olması gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, şirketlerin EA filolarının rotalanması amacıyla Elektrikli Araç Rotalama Problemi (EARP) türevlerinin etkin bir şekilde çözülmesi amaçlanmıştır. EARP'ye ek olarak zaman penceresi ve eş zamanlı topla-dağıt kısıtlarını birlikte ve ayrı ayrı içeren üç EARP türevi matematiksel olarak modellenmiş, küçük boyutlu problemlerin kesin çözümleri bulunmuş, büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise Değişken Komşuluk Arama (DKA) algoritmasını merkezine alan sezgisel çözüm yöntemleri önerilmiştir. Ayrıca DKA kapsamında literatürde kullanılan yerel arama operatörlerine ek olarak probleme özgü operatörler geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, önerilen sezgisel çözüm yöntemlerinden İndirgenmiş DKA'nın boru ve döngüsel komşuluk değiştirme adımını içeren iki versiyonunun problemlerin çözümünde en etkili algoritmalar olduğu görülmüştür. DKA operatörlerinin çözümü iyileştirme oranlarının problem türüne göre değişiklik gösterdiği, düşük performansa sahip operatörlerin kullanılmaması ile daha kısa sürede daha iyi çözümlere ulaşıldığı gözlemlenmiştir.



**ANAHTAR KELİMELER:** Elektrikli araç rotalama problemi, değişken komşuluk arama algoritması, sezgisel çözüm yöntemi, kesin çözüm yöntemi

# ABSTRACT


**VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH ALGORITHMS FOR SOLVING ELECTRIC VEHICLE ROUTING PROBLEMS**

**PH.D THESIS**

**YUSUF YILMAZ**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**INDUSTRIAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. CAN BERK KALAYCI)**

**DENİZLİ, APRIL 2023**

The world has agreed to limit the effects of climate change by implementing the Paris Agreement. This requires fundamental and significant changes in the transportation sector, which is among the most carbon-intensive sectors of the global economy. As oil is by far the dominant energy source in the sector, vehicle electrification will play a crucial role in decarbonization. In addition to reducing greenhouse gas emissions, air and noise pollution will also be diminished, contributing to the prevention of related health problems. For logistics companies, electrifying vehicle fleets implies substantial savings in logistics costs through the use of electrical energy produced from renewable sources, as opposed to high and fluctuating fossil fuel prices. Several challenges must be overcome to promote widespread use of electric vehicles (EVs) in logistics activities. The limited energy capacity of EV batteries negatively impacts driving range, while long charging times adversely affect waiting times at charging stations (CSs). For logistics companies with EV fleets, vehicle routing must be designed to meet customers' service demands in terms of both quantity and time.

Within the scope of this thesis, the objective is to effectively solve Electric Vehicle Routing Problem (EVRP) derivatives for routing the EV fleets of companies. In addition to EVRP, three EVRP derivatives incorporating time window and simultaneous pickup and delivery constraints, both together and separately, have been mathematically modeled. Exact solutions for small-sized problems have been found, while heuristic solution methods centered on the Variable Neighborhood Search (VNS) algorithm have been proposed for larger problems. Besides the local search operators utilized in the literature, problem-specific VNS operators have been developed. As a result of experimental studies, it has been observed that two versions of the Reduced VNS, one of the proposed heuristic solution methods, featuring the pipe and cyclic neighborhood change step, are the most effective algorithms for solving the problems. It has been noted that the solution improvement rates of VNS operators vary according to problem type, and better solutions can be reached in less time by excluding operators with low performance.



**KEYWORDS:** Electric vehicle routing problem, variable neighborhood search algorithm, heuristic solution approach, exact solution approach

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**


**ÖZET** ..... **i**
**ABSTRACT** ..... **ii**
**İÇİNDEKİLER** ..... **iii**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **v**
**TABLO LİSTESİ** ..... **vi**
**KISALTMALAR LİSTESİ** ..... **ix**
**ÖNSÖZ** ..... **xi**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
1.1 Elektrikli Araç Teknolojisine Genel Bakış ..... 3
1.2 Lojistik Sektöründe Elektrikli Araç Kullanımı ..... 5
1.3 Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 8
1.4 Tezin Amacı ve Kapsamı ..... 11
1.5 Tezin Tasarımı ..... 12
**2. LİTERATÜR** ..... **14**
**3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL** ..... **33**
3.1 Kullanılacak Veri Setlerinin Oluşturulması ..... 33
3.2 Matematiksel Modellerin Kurulması ve Doğruluğunun Test Edilmesi ..... 34
3.2.1 Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 35
3.2.2 Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 39
3.2.3 Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 42
3.2.4 Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 44
**4. ÇÖZÜM YÖNTEMİ** ..... **48**
4.1 Başlangıç Çözümünün Tasarlanması ..... 48
4.2 Değişken Komşuluk Arama Algoritması ..... 52
4.2.1 Temel Değişken Komşuluk Arama ..... 53
4.2.2 Değişken Komşuluk İnişi ..... 53
4.2.3 İndirgenmiş Değişken Komşuluk Arama ..... 55
4.2.4 Eğik Değişken Komşuluk Arama ..... 55
4.2.5 Genel Değişken Komşuluk Arama ..... 57
4.2.6 Değişken Komşuluk Ayrıştırma Arama ..... 58
4.2.7 Kümelenmiş Değişken Komşuluk Arama ..... 58
4.2.8 Rassal Değişken Komşuluk Arama ..... 59
4.3 DKA Komşuluk Yapıları ..... 60
4.3.1 Sarsma Adımı Operatörleri ..... 61
4.3.2 Yerel Arama Adımı Operatörleri ..... 65
4.4 Operatör Performans Testleri ..... 68
**5. DENEYSEL SONUÇLAR** ..... **78**
5.1 Matematiksel Modellere ait CPLEX Sonuçları ..... 79
5.2 Küçük Boyutlu Veri Setleri Kapsamında Sezgisel Algoritma ile CPLEX Sonuçlarının Karşılaştırması ..... 80
5.2.1 Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 81
5.2.2 Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 85
5.2.3 Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 89

5.2.4 Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 93
5.3 Büyük Boyutu Veri Setleri Kapsamında Sezgisel Çözüm Yöntemine ait Deney Sonuçları ..... 97
5.3.1 Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 97
5.3.2 Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 101
5.3.3 Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 106
5.3.4 Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi ..... 109
5.4 Deneysel Sonuçların İstatistiksel Analizi ..... 114
5.4.1 EARP için Sonuçların İstatistiksel Analizi ..... 115
5.4.2 EARP-ZP için Sonuçların İstatistiksel Analizi ..... 116
5.4.3 EARP-EZTD için Sonuçların İstatistiksel Analizi ..... 118
5.4.4 EARP-ZP-EZTD için Sonuçların İstatistiksel Analizi ..... 120
**6. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 123**
**7. KAYNAKLAR ..... 126**
**8. ÖZGEÇMİŞ ..... 141**

# ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa**

Şekil 1.1: Elektrikli Araç Rotalama Problemi örnek çözümü ..... 10
Şekil 2.1: Literatür sınıflandırma kriterleri ..... 17
Şekil 2.2: Çözüm yaklaşımına göre yayın dağılımı ..... 31
Şekil 2.3: Sezgisel çözüm yöntemlerinin dağılımı ..... 32
Şekil 3.1: Veri seti isimlendirmede kullanılan kodlama ..... 34
Şekil 3.2: C101C5 veri setinin EARP kapsamında matematiksel model ile çözümü ..... 39
Şekil 3.3: C101C5 veri setinin EARP-ZP kapsamında matematiksel model ile çözümü ..... 41
Şekil 3.4: C101C5 veri setinin EARP-EZTD kapsamında matematiksel model ile çözümü ..... 43
Şekil 3.5: C101C5 veri setinin EARP-ZP-EZTD kapsamında matematiksel model ile çözümü ..... 47
Şekil 4.1: Swap operatörü örnek gösterimi ..... 62
Şekil 4.2: 2-Opt operatörü örnek gösterimi ..... 62
Şekil 4.3: 3-Opt operatörü örnek gösterimi ..... 63
Şekil 4.4: Insert operatörü örnek gösterimi ..... 63
Şekil 4.5: EARP kapsamında 27 operatöre ait başarı oranları ..... 69
Şekil 4.6: EARP kapsamında 21 operatöre ait başarı oranları ..... 69
Şekil 4.7: EARP kapsamında 11 operatöre ait başarı oranları ..... 70
Şekil 4.8: EARP-ZP kapsamında 28 operatöre ait başarı oranları ..... 71
Şekil 4.9: EARP-ZP kapsamında 16 operatöre ait başarı oranları ..... 72
Şekil 4.10: EARP-ZP kapsamında 11 operatöre ait başarı oranları ..... 72
Şekil 4.11: EARP-EZTD kapsamında 27 operatöre ait başarı oranları ..... 73
Şekil 4.12: EARP-EZTD kapsamında 21 operatöre ait başarı oranları ..... 74
Şekil 4.13: EARP-EZTD kapsamında 11 operatöre ait başarı oranları ..... 74
Şekil 4.14: EARP-ZP-EZTD kapsamında 28 operatöre ait başarı oranları ..... 75
Şekil 4.15: EARP-ZP-EZTD kapsamında 16 operatöre ait başarı oranları ..... 76
Şekil 4.16: EARP-ZP-EZTD kapsamında 11 operatöre ait başarı oranları ..... 76

# TABLO LİSTESİ

**Sayfa**


Tablo 2.1: Elektrikli araç rotalama problemi literatürü ..... 25
Tablo 2.2: EARP literatürü (çözüm yöntemleri)..... 29
Tablo 3.1: Matematiksel modellerin kısıt karşılaştırması..... 35
Tablo 3.2: Oluşturulan modellerde kullanılan varsayımlar ve karşılaştırması . 35
Tablo 3.3: EARP için C101C5 veri seti karakteristikleri..... 38
Tablo 3.4: EARP için C101C5 veri seti düğüm bilgileri ..... 38
Tablo 3.5: EARP-ZP için C101C5 veri seti karakteristikleri..... 40
Tablo 3.6: EARP-ZP için C101C5 veri seti düğüm bilgileri ..... 41
Tablo 3.7: EARP-EZTD için C101C5 veri seti karakteristikleri ..... 42
Tablo 3.8: EARP-EZTD için C101C5 veri seti düğüm bilgileri..... 43
Tablo 3.9: EARP-ZP-EZTD için C101C5 veri seti karakteristikleri ..... 46
Tablo 3.10: EARP-ZP-EZTD için C101C5 veri seti düğüm bilgileri..... 46
Tablo 4.1: DKA türlerinde kullanılan komşuluk değiştirme adımları ..... 60
Tablo 4.2: Sarma ve Yerel Arama adımında kullanılan operatörler ..... 61
Tablo 4.3: EARP kapsamında operatör gruplarının performans karşılaştırması..... 70
Tablo 4.4: EARP-ZP kapsamında operatör gruplarının performans karşılaştırması..... 73
Tablo 4.5: EARP-EZTD kapsamında operatör gruplarının performans karşılaştırması..... 75
Tablo 4.6: EARP-ZP-EZTD kapsamında operatör gruplarının performans karşılaştırması..... 77
Tablo 5.1: 5 Müşterili veri setlerinin tüm problemler için kesin çözüm sonuçları ..... 79
Tablo 5.2: 10 Müşterili veri setlerinin tüm problemler için kesin çözüm sonuçları ..... 79
Tablo 5.3: 15 Müşterili veri setlerinin tüm problemler için kesin çözüm sonuçları ..... 80
Tablo 5.4: EARP 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 82
Tablo 5.5: EARP 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 82
Tablo 5.6: EARP 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 83
Tablo 5.7: EARP 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 83
Tablo 5.8: EARP 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 84
Tablo 5.9: EARP 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 84
Tablo 5.10: EARP-ZP 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması..... 86
Tablo 5.11: EARP-ZP 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması..... 86

Tablo 5.12: EARP-ZP 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 87
Tablo 5.13: EARP-ZP 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 87
Tablo 5.14: EARP-ZP 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 88
Tablo 5.15: EARP-ZP 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 88
Tablo 5.16: EARP-EZTD 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 90
Tablo 5.17: EARP-EZTD 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 90
Tablo 5.18: EARP-EZTD 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 91
Tablo 5.19: EARP-EZTD 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 91
Tablo 5.20: EARP-EZTD 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 92
Tablo 5.21: EARP-EZTD 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 92
Tablo 5.22: EARP-ZP-EZTD 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 94
Tablo 5.23: EARP-ZP-EZTD 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 94
Tablo 5.24: EARP-ZP-EZTD 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 95
Tablo 5.25: EARP-ZP-EZTD 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 95
Tablo 5.26: EARP-ZP-EZTD 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 96
Tablo 5.27: EARP-ZP-EZTD 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması ..... 96
Tablo 5.28: EARP 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları ..... 99
Tablo 5.29: EARP 100 Müşterili veri setlerinin V7-V12 DKA çözüm sonuçları ..... 100
Tablo 5.30: EARP-ZP 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları ..... 102
Tablo 5.31: EARP-ZP 100 Müşterili veri setlerinin V6-V12 DKA çözüm sonuçları ..... 104
Tablo 5.32: EARP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları ..... 107
Tablo 5.33: EARP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V7-V12 DKA çözüm sonuçları ..... 108
Tablo 5.34: EARP-ZP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları ..... 110
Tablo 5.35: EARP-ZP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V6-V12 DKA çözüm sonuçları ..... 112
Tablo 5.36: EARP sonuçları için Friedman testi ANOVA tablosu ..... 115

Tablo 5.37: EARP sonuçları için Dunn-Bonferroni ikili karşılaştırma sonuçları ..... 115
Tablo 5.38: EARP sonuçları için Dunn-Bonferroni ortalama sıralamaları sonuçları ..... 116
Tablo 5.39: EARP-ZP sonuçları için Friedman testi ANOVA tablosu ..... 117
Tablo 5.40: EARP-ZP sonuçları için Dunn-Bonferroni ikili karşılaştırma sonuçları ..... 117
Tablo 5.41: EARP-ZP sonuçları için Dunn-Bonferroni ortalama sıralamaları sonuçları ..... 118
Tablo 5.42: EARP-EZTD sonuçları için Friedman testi ANOVA tablosu ..... 118
Tablo 5.43: EARP-EZTD sonuçları için Dunn-Bonferroni ikili karşılaştırma sonuçları ..... 119
Tablo 5.44: EARP-EZTD sonuçları için Dunn-Bonferroni ortalama sıralamaları sonuçları ..... 120
Tablo 5.45: EARP-ZP-EZTD sonuçları için Friedman testi ANOVA tablosu ..... 121
Tablo 5.46: EARP-ZP-EZTD sonuçları için Dunn-Bonferroni ikili karşılaştırma sonuçları ..... 121
Tablo 5.47: EARP-ZP-EZTD sonuçları için Dunn-Bonferroni ortalama sıralamaları sonuçları ..... 122

# KISALTMALAR LİSTESİ

| | | |
|---|---|---|
| **EA** | **:** | Elektrikli Araç |
| **Şİ** | **:** | Şarj İstasyonu |
| **EARP** | **:** | Elektrikli Araç Rotalama Problemi |
| **DKA** | **:** | Değişken Komşuluk Arama |
| **EV** | **:** | Electric Vehicle |
| **CS** | **:** | Charging Station |
| **EVRP** | **:** | Electric Vehicle Routing Problem |
| **VNS** | **:** | Variable Neighborhood Search |
| **İYMA** | **:** | İçten Yanmalı Motorlu Araç |
| **LNG** | **:** | Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz) |
| **CNG** | **:** | Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğal Gaz) |
| **AYA** | **:** | Alternatif Yakıtlı Araç |
| **HEA** | **:** | Hibrit Elektrikli Araç |
| **PHEA** | **:** | Prizli Hibrit Elektrikli Araç |
| **BDİ** | **:** | Batarya Değişim İstasyonu |
| **KRP** | **:** | Kirlilik Rotalama Problemi |
| **YARP** | **:** | Yeşil Araç Rotalama Problemi |
| **ARP** | **:** | Araç Rotalama Problemi |
| **EARP-ZP** | **:** | Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi |
| **EARP-EZTD** | **:** | Eş Zamanlı Toplama ve Dağıtım Kısıtlı Elektrikli Araç Rotalama Problemi |
| **EARP-ZP-EZTD** | **:** | Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Toplama ve Dağıtım Kısıtlı Elektrikli Araç Rotalama Problemi |
| **CW** | **:** | Clarke & Wright Tasarruf Sezgisel Algoritması |
| **YA** | **:** | Yerel Arama Algoritması |
| **TB** | **:** | Tavlama Benzetimi Algoritması |
| **GA** | **:** | Genetik Algoritma |
| **TA** | **:** | Tabu Arama Algoritması |
| **DKİ** | **:** | Değişken Komşuluk İniş |
| **T-DKA** | **:** | Temel Değişken Komşuluk Arama |
| **İ-DKA** | **:** | İndirgenmiş Değişken Komşuluk Arama |
| **E-DKA** | **:** | Eğik Değişken Komşuluk Arama |
| **G-DKA** | **:** | Genel Değişken Komşuluk Arama |
| **DKAA** | **:** | Değişken Komşuluk Ayrıştırma Arama |
| **K-DKA** | **:** | Kümelenmiş Değişken Komşuluk Arama |
| **R-DKA** | **:** | Rassal Değişken Komşuluk Arama |
| **KDA** | **:** | Komşuluk Değiştirme Adımı |
| **BEÇ** | **:** | Bulunan En İyi Çözüm |
| **AGKA** | **:** | Adaptif Geniş Komşuluk Arama Algoritması |
| **EARP-ZP-KF** | **:** | Zaman Pencereli Karma Filo Elektrikli Araç Rotalama Problemi |
| **EAYSRP** | **:** | Elektrikli Araç Yer Seçimi Rotalama Problemi |
| **FBK** | **:** | Filo Büyüklüğü ve Karması |
| **SS** | **:** | Stokastik Süreçler |
| **TPG** | **:** | Topografya |
| **ÇK** | **:** | Çok Katmanlı |
| **TD** | **:** | Topla-Dağıt |

| | | |
|---|---|---|
| **ÇD** | **:** | Çoklu Depo |
| **S** | **:** | Sabit Süreli Şarj Fonksiyonu |
| **D** | **:** | Doğrusal Şarj Fonksiyonu |
| **DO** | **:** | Doğrusal Olmayan Şarj Fonksiyonu |
| **TŞ** | **:** | Tam Şarj |
| **PŞ** | **:** | Parçalı Şarj |
| **2K-ARP** | **:** | İki Kademeli Araç Rotalama Problemi |
| **2K-EARP** | **:** | İki Kademeli Elektrikli Araç Rotalama Problemi |
| **KÇ** | **:** | Kesin Çözüm |
| **S** | **:** | Sezgisel / Meta-Sezgisel Çözüm |

# ÖNSÖZ

Akademik kariyerimin önemli bir kilometre taşı olan bu doktora tezimin hazırlanması sürecinde her zaman rehberlik, destek ve teşviklerinden dolayı danışmanım Doç. Dr. Can Berk KALAYCI'ya en derin teşekkürlerimi sunarım. Ondan çok şey öğrendim ve öğrencisi olmak benim için bir onur ve zevkti.

Pozitif enerjileriyle beni her zaman destekleyen ve tez çalışmamın geliştirilmesinde önemli katkıları olan çok değerli tez izleme komitesi üyeleri Doç. Dr. Özcan MUTLU ve Prof. Dr. Sezai TOKAT'a, tez çalışmam boyunca verdikleri değerli tavsiyeleri ve anlayışlı yorumları için teşekkür ederim.

Doktora kariyerim sürecinde birlikte çalışma fırsatı yakaladığım Pamukkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünün kıymetli öğretim üyeleri Prof. Dr. Aşkıner GÜNGÖR, Doç. Dr. Olcay POLAT, Doç. Dr. Hacer Güner GÖREN ve Doç. Dr. Aliye Ayça SUPÇİLLER'e bana öğrettikleri her şey için çok teşekkür ederim. Onların hem öğrencisi hem de çalışma arkadaşı olmak ve onlardan bir şeyler öğrenmek benim için çok değerli bir ayrıcalıktı.

Beni her zaman destekleyen arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Egemen TANER'e, Arş. Gör. Zeynep ÖZSÜT BOĞAR'a ve İsa KORKMAZ'a çok teşekkür ederim. Ayrıca tüm çalışma arkadaşlarıma ve dostlarıma müteşekkirim.

Okulu olmayan bir köyden çıkıp bilim insanı olma yolunda ilerlediğim ve eğitimimin her aşamasında imkanlarından yararlandığım Türkiye Cumhuriyeti Devletine ve onun kurucusu olan Ulu Önder Mustafa Kemal ATATÜRK'e minnettarım.

Bu tezi, her şeyden önce iyi bir insan olmamı öğütleyen, hayattaki en büyük destekçilerim olan annem Ayşe YILMAZ ve rahmetli babam Sami YILMAZ'a ithaf ediyorum.

# 1. GİRİŞ

Lojistik ve ulaşımda eski çağlardan beri çeşitli araçlar ve hayvanlar kullanılmaktadır. 18. Yüzyılda yeni buluşların üretime olan etkisi ve buhar gücüyle çalışan makinelerin artması endüstri devrimini doğurmuştur. Avrupa'dan dünyaya yayılan bu devrimle birlikte ilk içten yanmalı motor 1859 yılında yine Avrupa'da geliştirilmiştir. Üretimde, ulaşımda ve lojistikte büyük bir ilerleme yaşanmasının arkasında yatan sebeplerden biri de geliştirilen motor teknolojisi ve kullanımıdır. İçten yanmalı motorların yaygınlaşmasıyla birlikte lojistik ve ulaşımda buhar makinalarının yerini motorlu araçlar almıştır.

150 yıldır artan fosil yakıt kullanımından dolayı dünyada çevresel ve sosyoekonomik sorunlar ortaya çıkmıştır. Fosil yakıt kullanımıyla ortaya çıkan sera gazı yayılımı, yeryüzünden yansıyan ışınları atmosferde hapsederek ısınma etkisi yaratmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından bakıldığında, atmosfere salınan karbondioksitin azaltılması gerekmektedir. Bu konuda en çok paya sahip olan fosil yakıt teknolojilerinin yerini sürdürülebilir teknolojilere bırakması önem arz etmektedir.

Küresel ısınma, doğa, ekonomi ve toplum üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle gelecek nesillere yönelik bir tehdit ve ciddi bir endişe haline gelmektedir (Revesz ve diğ. 2014). Küresel karbon salınımının hızlı bir şekilde düşürülmesi için Birleşmiş Milletler tarafından hazırlanan Paris Anlaşması, Aralık 2015'teki İklim Değişikliği Konferansında farklı ülkeler tarafından imzalanmıştır.

Dünya Enerji Görünümü 2022 raporuna göre, dünya genelindeki enerji talebi 2021 yılında önceki yıla göre %4,6 artarak toplam 170.000 Tera-Watt'a ulaşmıştır. Bu artışın yaklaşık %80'i gelişmekte olan ülkelerde gerçekleşmiştir. Fosil yakıtların kullanımı, dünya genelindeki toplam enerji talebinin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Bu da fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan karbon salınımının yüksek olmasına neden olmaktadır (International Energy Agency 2022).

Dünya Enerji Görünümü 2022 raporuna göre, 2021 yılında dünya genelinde toplam karbon salımı 36,5 gigaton olarak gerçekleşmiştir. Bu, önceki yıla göre %4,8 artışa denk gelmektedir. Dünya genelindeki toplam karbon salınımının yaklaşık %85'i enerji sektöründen kaynaklanmaktadır. Fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan karbon salınımının en yüksek olduğu sektörler arasında elektrik ve ısı üretimi, sanayi ve ulaşım yer almaktadır. Dünya Enerji Görünümü 2022 raporuna göre, elektrik ve ısı üretimi sektörü 2021 yılında dünya genelinde toplam karbon salınımının yaklaşık %43'ünden sorumlu olmuştur. Sanayi sektörü yaklaşık %22,5, ulaşım sektörü ise yaklaşık %20,5 oranında karbon salınımına neden olmuştur (International Energy Agency 2022).

Fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan karbon salınımının azaltılması için atılan adımlardan biri yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılmasıdır. Dünya Enerji Görünümü 2022 raporu 2021 yılında dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji talebinin %30'unu karşıladığını göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan karbon salınımının azaltılmasına yardımcı olacaktır. Elektrikli araçların (EA'ların) dünya genelindeki payı 2021 yılında %2,7'ye yükselmiştir.

Günümüzde otomotiv sektöründeki üretici firmalar, içten yanmalı motorlu araçların (İYMA'ların) üretiminin durdurulacağı tarihleri açıklamaya ve hedefler koymaya başlamıştır. Örneğin, Volkswagen, yaptığı açıklamaya göre benzinli araç üretimine son verecektir. 2026 yıl sonuna kadar benzinli otomobil üretimine devam edileceği, fakat 2027 yılı itibariyle tamamen elektrikli modellerin üretimine geçileceği belirtilmiştir. Elektrikli otomobil teknolojilerine 30 milyar € yatırım yapan Volkswagen, 2025 yılına kadar elektrikli otomobil sektöründe lider konumuna yükselmeyi hedeflemektedir (Rauwald ve Sachgau 2018).

Hükümetler tarafından belirlenen hedefler ve getirilen yeni düzenlemeler, güneş, elektrik, biyodizel, LNG, CNG gibi alternatif yakıtlı araçların (AYA'ların) kullanımını teşvik etmektedir. Birçok belediye, devlet kurumu, kâr amacı gütmeyen kuruluş ve özel şirket, ya çevresel etkilerini gönüllü olarak azaltmak ya da yeni çevre düzenlemelerini karşılamak için araç filolarını AYA'ları içerecek şekilde dönüştürmektedir (Erdoğan ve Miller-Hooks 2012). Sonuç olarak, artan çevresel

kaygılar ve devletlerin fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması yönünde aldığı kararlar neticesinde, elektrikli motor ve batarya teknolojisi alanında yapılan araştırma geliştirme çalışmalarının hızlanmasına neden olmuştur.

Lojistik faaliyetler, petrolün en büyük tüketicilerinden biri olarak tanımlanmaktadır ve hava kirleticilerinin önemli bir kısmından sorumludur (Raeesi ve Zografos 2019). Ulaşımın hem insan hem de ekolojik sistemler üzerindeki doğrudan veya dolaylı zararlı etkilerine ilişkin artan endişeler, lojistik ağlarının sera gazı ve özellikle $CO_2$ emisyonlarının azaltılmasına özel önem verilerek acilen yeniden planlanması gerektiğini göstermektedir (Bektaş ve Laporte 2011). Sonuç olarak, fosil olmayan enerji kaynakları zamanla daha çok dikkat çekmektedir. Hidrojen yakıtlı, hibrit ve elektrikli araçlar gibi çevreye duyarlı araçlar, insanların fosil olmayan enerji kullanma amacına yönelik örneklerdendir. Ancak, dağıtım sistemlerinde ticari olarak kullanılacak çevreye duyarlı araçların çizelgelenmesi ve rotalanması karmaşık bir süreçtir. Batarya teknolojisindeki yeterli ilerlemenin sağlanamamasından kaynaklanan kısa menzil mesafesi ve uzun şarj süreleri gibi bazı teknolojik darboğazlar nedeniyle EA'ların lojistik faaliyetlerde kullanımı hedeflenen konumda değildir. Ayrıca, çoğu ülkede Şİ altyapısı sınırlıdır. Bu nedenle, geleneksel araçlar için kullanılan rota planları EA'lar için her zaman uygun değildir.

İYMA'ların rotalanması konusunda bilim dünyasında uzun süredir araştırma ve uygulama çalışmaları yapılmaktadır. Bu konuda yazılmış çok sayıda kitap, tez, makale ve bildiri mevcuttur. Ancak kendine has kısıtları ve görece yeni olan hibrit ve elektrikli araçların rotalanması için gerçekleştirilen çalışma sayısı görece oldukça azdır.

Bu tez, lojistik sektöründe kullanılan EA'ların rotalama problemleri için modeller ve çözüm algoritmaları geliştirmeyi amaçlamaktadır.

## 1.1 Elektrikli Araç Teknolojisine Genel Bakış

İYMA'lar, dünya genelinde yüksek karbon salınımına neden olmaktadır. Bu da iklim değişikliği, hava kirliliği ve sağlık sorunları gibi çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak, EA'lar giderek daha fazla tercih edilmeye

başlamıştır. EA teknolojisi, düşük karbon salımı, sessiz çalışma ve daha düşük işletme maliyetleri gibi birçok avantaj sunmaktadır.

EA'ların tarihi, 19. yüzyıla kadar uzanmaktadır. 1828'de ilk EA Michigan'da bir İskoç mühendis olan Robert Anderson tarafından yapılmıştır. Ancak, bu araç sadece kısa mesafelerde ve düşük hızlarda çalışabiliyordu. İlk gerçekçi EA 1884'te İngiliz mucit Thomas Parker tarafından yapılmıştır. Bu araç, Manchester'daki Victoria Electric Car Company tarafından üretilmiş ve 1897'ye kadar kullanılmıştır. 1900'lü yılların başlarında, EA'lar benzinli araçlardan daha popülerdi. Bu dönemde, New York City'de, 100'den fazla elektrikli taksi çalışıyordu. Ancak, benzinli araçların daha uzun menzil sunması ve daha kolay dolum imkânı sağlaması nedeniyle, EA'lar zamanla unutulmaya başladı.

EA'ların günümüzde yeniden popüler hale gelmesi, iklim değişikliği ve fosil yakıtların tükenme endişeleriyle birlikte gerçekleşmiştir. Çevre dostu olması, karbon salınımını azaltması ve daha az gürültü yapması gibi avantajları nedeniyle, EA'ların kullanımı hızla artmaktadır.

EA'lar teknoloji ve çalışma prensibi açısından üç gruba ayrılır: EA'lar, hibrit elektrikli araçlar (HEA'lar) ve prizli hibrit elektrikli araçlar (PHEA'lar) (Asghari ve Al-E-Hashem 2021). EA'lar tamamen elektrikle çalışırken, HEA'lar İYMA ve elektrikli motorun optimum verimle çalışması üzerine kurgulanmıştır.

Hem EA'ların hem de İYMA'ların özelliklerine sahip HEA'lar, rotanın değişken bölümlerinde farklı modların kullanılmasına izin vererek, bir içten yanmalı motor ve bir saf elektrik motoru olmak üzere iki motoru kolayca değiştirebilir (Plotkin ve diğ. 2002). HEA'larda, EA'lardaki gibi operasyonel menzil sınırlaması bulunmamaktadır ve yolda ilerlerken bataryanın şarj edilmesi mümkündür. Sonuç olarak, HEA'lar fosil yakıt kullanımı ve salınan $CO_2$ emisyonlarının azaltılmasında İYMA'lara nazaran daha faydalıdır.

PHEA hem yeniden şarj edilebilir bir batarya hem de bir içten yanmalı motor içeren bir HEA türüdür. PHEA bataryası, harici elektrik güç kaynaklarına takılarak ve yerleşik jeneratörü ve motoruyla yeniden şarj edilebilen yeni nesil HEA'lardır. Seri HEA'da, içten yanmalı motor bir jeneratörü çalıştırmak için kullanılır ve itme gücü

elektrik motorundan gelir. PHEA'larda ise hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru itme gücü için kullanılır. PHEA'ların ana avantajlarından biri, batarya gücü tükenince fosil yakıt kullanarak çalışmaya devam edebilmesidir.

Yeniden şarj edilebilir batarya, EA'ların önemli bir bileşenidir. EA'ların bataryasında kurşun-asit piller, nikel-metal hibrit piller ve lityum-iyon piller dahil olmak üzere farklı pil türleri kullanılabilir (Chan 2007). Lityum-iyon bataryalar diğer seçeneklerle karşılaştırıldığında yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun batarya ömrü ve düşük hafıza etkisi nedeniyle en popüler seçenektir (Li ve diğ. 2017).

EA'ların şarj edilmesinde iletken şarj, endüktif şarj ve batarya değiştirme gibi farklı teknolojiler kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın yöntem, kablo ve soket kullanılan iletken şarj yöntemidir. Diğer taraftan, endüktif şarjda kablo ve sokete ihtiyaç duyulmadan, manyetik alan kullanılarak güç bataryaya transfer edilir (Yilmaz ve Krein 2012). Araç dururken sabit endüktif şarj kullanılırken, hareketli endüktif şarj ile araç hareket halindeyken bile şarj işlemi yapılabilmektedir (Machura ve Li 2019). Batarya değiştirme teknolojisinde ise, boş bir bataryanın tam dolu bir batarya ile değiştirildiği batarya değiştirme istasyonları (BDİ) bulunmaktadır. Diğer bir şarj seçeneği ise, özellikle elektrikli halk otobüslerinde karşılaşılan, elektrik kabloları boyunca kayan ve enerji aktaran bir pantograf cihazı kullanılarak araçların yeniden şarj edilebildiği teknolojidir (Brecher ve Arthur 2014).

## 1.2 Lojistik Sektöründe Elektrikli Araç Kullanımı

Lojistik sektörü, ürünlerin tedarik zinciri boyunca hareketinin sağlanması ve müşterilere teslim edilmesi için farklı kademelerde stratejik ve operasyonel faaliyetleri yerine getiren ekosistem olarak tanımlanabilir. Bu sektörde, taşımacılıkta kullanılan araçlar, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan çevre sorunlarına neden olmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) raporuna göre, 2019 yılında dünya genelinde ortalama olarak her 100 kilometrede 17 kg karbon salımı gerçekleşmiştir. Bu, dünya genelinde toplamda 1,2 gigaton karbondioksit salınımına eşdeğerdir. Ayrıca özellikle büyük şehirlerde fosil yakıt kaynaklı hava kirliliği ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) raporuna göre, hava kirliliği her yıl dünya genelinde 7 milyon insanın ölümüne neden olmaktadır (World Health

Organization 2022). Bu nedenle, çevre dostu alternatifler arayışı, özellikle EA'ların lojistik sektöründe kullanımı, giderek daha önemli hale gelmektedir.

EA'ların lojistik sektöründe kullanımı, karbon salınımının azaltılmasının yanı sıra hava ve gürültü kirliliğinin azaltılması açısından büyük önem arz etmektedir. EA'lar, İYMA'lara göre daha sessiz çalışır ve daha az titreşim üretir. Bu, lojistik şirketlerinin, gece teslimatlarını yapabilmelerine ve şehir merkezlerinde faaliyet göstermelerine olanak sağlar.

EA'ların işletme maliyetleri, geleneksel araçlara göre daha düşüktür. EA'lar, enerji maliyetlerinin daha düşük olması nedeniyle, uzun vadede tasarruf sağlarlar. Bu, lojistik sektöründe faaliyet gösteren şirketler için, daha rekabetçi bir fiyat sunmak anlamına gelir. Aynı zamanda EA'ların bakım maliyetleri de İYMA'lara göre daha düşüktür. EA'larda motor yağı değişimi, buji değişimi gibi rutin bakım işlemleri yoktur. Ayrıca, geri kazanımlı frenleme ile yavaşlarken bataryanın şarj edilmesi sağlanmaktadır, bu da fren balatası vb. gibi bakım maliyetlerini düşürmektedir. Bu nedenle, EA'ların bakımı daha az zaman ve para harcamayı gerektirir.

Lojistik sektöründe kullanılan araçlar genellikle uzun mesafeler kat etmektedirler. Batarya kapasitesinin düşük olmasından dolayı rota üzerindeki veya dağıtım noktalarındaki Şİ'lerde EA'ların şarj edilmesi gerekmektedir. Ancak yetersiz şarj altyapısı, EA'ların lojistik sektöründe kullanımının önündeki en büyük engeldir.

Dünya genelinde EA'ların kullanımı arttıkça, Şİ altyapısı da gelişmektedir. Bu alanda önde gelen ülkeler arasında Çin, ABD, Japonya, Norveç ve Almanya yer almaktadır.

Çin, dünya genelinde en fazla Şİ'ye sahip ülkedir. Çin Ulusal Enerji İdaresi'ne göre, 2020 yılı sonu itibariyle, Çin'de 1,3 milyondan fazla Şİ bulunmaktadır (International Energy Agency 2021a).

ABD'de, Şİ altyapısı hızla gelişmektedir. 2022 yılı ikinci çeyrek itibariyle, ABD'de 20.000'i özel olmak üzere toplamda yaklaşık 140.000 Şİ bulunmaktadır (Brown ve diğ. 2022). 2020 yılı itibariyle, Japonya'da yaklaşık 50.000 Şİ bulunmaktadır (International Energy Agency 2021b). 2020 yılı itibariyle, Norveç'te

yaklaşık 12.000 Şİ bulunmaktadır. Almanya'da ise 2020 yılı itibariyle yaklaşık 30.000 Şİ bulunmaktadır (International Energy Agency 2021a).

Türkiye'de Şİ diğer önde gelen ülkelerin gerisinde kalmaktadır. Türkiye'de 2022 yılı itibariyle resmi olmayan verilere göre yaklaşık 4.000 Şİ ve 6.500 şarj soketi bulunmaktadır.

Türkiye'de EA kullanımına bakılacak olursa, TÜİK kayıtlarına göre 2022 yılı sonu itibariyle trafikte otomobil grubunda 14.552 EA, 134.662 HEA bulunmaktadır. Trafikteki toplam otomobil sayısının 14 milyon 269 bin olduğu düşünülürse, Türkiye'de her 100 otomobilden 1'i elektrikli veya hibrittir (Tuik 2023).

Türkiye'de, 2030 yılına kadar 1,6 milyon EA'nın yollarda olması, Şİ'lerde 160.000 şarj soketi sayısı hedeflenmektedir (T.C. Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı 2022). Bu hedefe ulaşmak için, Şİ altyapısının geliştirilmesi gerekmektedir. Türkiye'de birçok şirket ve kuruluş, Şİ altyapısını genişletmek için çalışmalar yürütmektedir.

Türkiye'de, Şİ altyapısının geliştirilmesi için birçok farklı model ve yaklaşım benimsenmektedir. Bu modeller arasında, özel sektörün yatırımı, kamu-özel sektör ortaklıkları ve belediyelerin yatırımı yer almaktadır. Türkiye'de Şİ altyapısının geliştirilmesi için bu farklı modellerin bir arada kullanılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, Şİ altyapısı EA'ların yaygınlaşması için önemli bir faktördür. Dünya genelinde önde gelen ülkelerin birçoğu, Şİ altyapısını geliştirmeye yönelik adımlar atmaktadır. Türkiye'de ise henüz bu alanda yeterli bir gelişme sağlanamamıştır. Ancak, 2030 yılına kadar 1,6 milyon EA'nın yollarda olması hedefi, Türkiye'de Şİ altyapısının geliştirilmesi için bir fırsat sunmaktadır.

EA'ların yatırım maliyetleri, İYMA'lara göre daha yüksektir. Bu nedenle, lojistik şirketlerinin EA'ları tercih etmeleri için, daha yüksek yatırım bütçelerine sahip olmaları gerekmektedir. EA'ların taşıma kapasiteleri, İYMA'lara göre daha azdır. Bu nedenle, lojistik şirketleri, daha sık sefer yapmak zorunda kalabilirler. Bu durum, işletme maliyetlerini artırabilir.

EA’ların batarya ömrü, sınırlıdır. Batarya ömrü, sıcaklık, kullanım süresi, şarj ve deşarj işlemleri gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, bataryaların düzenli olarak değiştirilmesi gerekebilir. Bu da işletme maliyetlerini artırabilir.

EA’ların lojistik sektöründe yaygınlaşması için, yüksek yatırım maliyetlerinin düşürülmesi ve yeterli sayıda Şİ’nin bulunması gerekmektedir. Ayrıca, taşıma kapasitesi, batarya ömrü ve ağırlık sorunları da ele alınarak, EA’ların taşımacılık sektörüne uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu zorluklara rağmen, EA’ların lojistik sektöründe kullanımı, sürdürülebilir bir geleceğin temeli için önemli bir adımdır.

Bu tez çalışmasında, yalnızca elektrik motorundan güç alan kamyonlar veya kamyonetler gibi ticari EA’lar dikkate alınmıştır. Ayrıca, Elektrikli Araç Rotalama Problemi'ne (EARP) odaklanarak, zaman penceresi (ZP) ve eş zamanlı topla-dağıt (EZTD) kısıtlarını hem ayrı ayrı hem de birleşik olarak (EARP-ZP-EZTD) ele alarak, bu problemlerin çözümünde kullanılacak yeni ve etkili yöntemler önermektedir. Bu bağlamda, çalışmada 5 farklı DKA algoritması türü ve üç komşuluk değiştirme adımından oluşan 12 farklı DKA versiyonu geliştirilmiştir. Önerilen yöntemlerin başarısını değerlendirmek ve literatürde kullanılan mevcut DKA operatörlerine göre daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla, her bir problem için özel olarak tasarlanmış yeni operatörler geliştirilmiştir ve karşılaştırmalı deneylerle etkinlikleri ortaya konulmuştur.

## 1.3 Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Literatürde, çevre dostu araçların rotalanması amacıyla Kirlilik Rotalama Problemi (KRP) ilk olarak Bektaş ve Laporte (2011) tarafından önerilmiştir. KRP’de, klasik araç rotalama problemlerinin çoğu çeşidinin aksine çevre dostu bir bakış açısıyla karbondioksit salınımının minimuma indirilmesi amaçlanmıştır. Karbondioksit salınımı aracın enerji tüketimi ile doğru orantılıdır. Enerji tüketimi ise yalnızca rotanın uzunluğu ile ilişkilendirilemez; aracın hızı, yük miktarı, seyahat süresi ve yolun eğimi gibi faktörler de etkilidir.

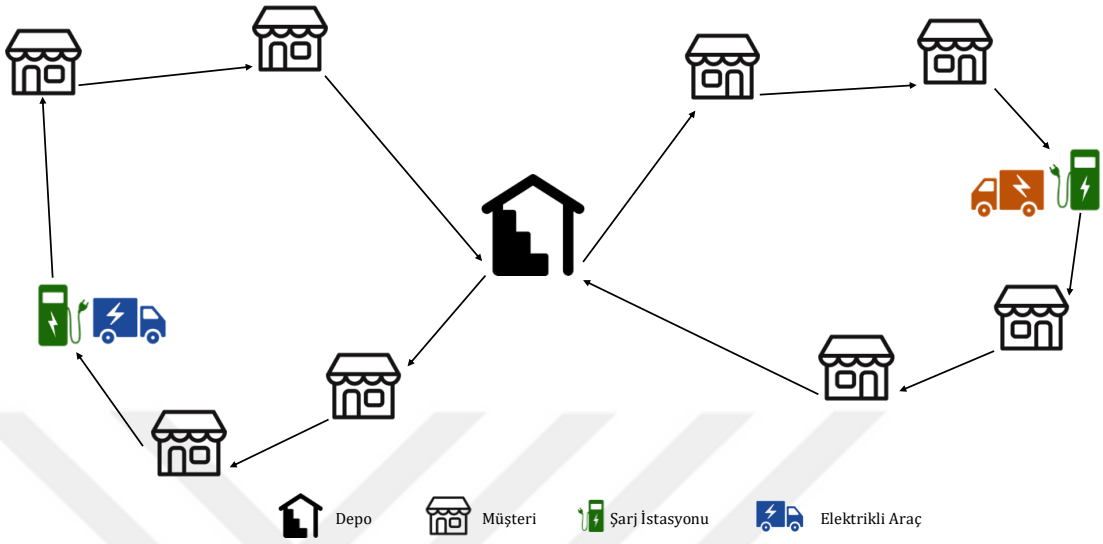
Yeşil araçlar için rota planlarını uygun şekilde tasarlamak için Yöneylem Araştırması literatüründe Yeşil Araç Rotalama Problemi (YARP) tanıtılmıştır. Araç Rotalama Problemi (ARP) gibi, YARP'de de seyahat mesafesi, seyahat süresi vb. en küçüklenmesi hedeflenmektedir. Buna ek olarak, bazı çalışmalarda yakıt tüketimine de odaklanılmıştır. Lojistik ile yakıt tüketiminin çevresel etkisi arasındaki ilişki rota planlaması yoluyla araştırılmış ve araştırılmaya devam etmektedir. Fosil yakıt tüketiminde muhtemel bir azalma, buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğinden (Xiao ve diğ. 2012), petrol bazlı yakıt tüketimi, YARP'de çok önemli bir gösterge olarak bilinmektedir (Kuo 2010; Zeng ve diğ. 2016). Demir ve diğ. (2014) farklı yakıt tüketimi formülasyonlarına odaklanan bir araştırma makalesi sunmuştur. Yeşil araçlar daha temiz enerji kaynakları kullanmasına rağmen, sıfır-kirlilik seviyesinde değildirler. 2012 yılında EA'ların güç kaynağı olan elektriğin % 73'ü kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil yakıtlardan üretilmiştir (Eia 2014). 2015 yılında elektrik üretiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonu üretimi 1925 milyon ton olarak belirlenmiştir (Eia 2017). Bu bağlamda, düşük karbondioksit salınımı, yani daha az elektrik enerjisi ile rotalama planı oluşturmak ekonomik ve çevresel açıdan büyük öneme sahiptir.

Batarya teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde HEA'ların yerini EA'lar almaya başlamıştır. EA'ların ticari alanda da kullanımının yaygınlaşmasıyla ARP EARP'ye evrilmiş, yeni kısıtlar ve hedefler ortaya çıkmıştır. Literatürde EA'ların rotalanması konusunda ilk çalışmalardan biri Felipe ve diğ. (2014) tarafından ortaya konmuştur. Modellerinde Şİ ve şarj süresi eşzamanlı olarak belirlenmektedir. Schneider ve diğ. (2014), EARP çözümü için zaman pencereleri ve araç kapasitelerini dikkate alan bir model geliştirmişlerdir.

EA teknolojisinin yaygınlaşması, lojistik sektöründe çevre dostu araçlara olan talebi artırmaktadır. Ancak, EA'ların şarj edilmesi sırasında ortaya çıkan zaman ve maliyet faktörleri, araç rotalama planlamasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, "Elektrikli Araç Rotalama Problemi" adı verilen bir problemin çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır.

EARP, elektrikli araçların bir dizi müşteriye hizmet vermesi gereken bir rotayı optimize etmek için kullanılan bir optimizasyon problemidir. Bu problemde, her müşterinin bir dağıtım talebi bulunmaktadır ve EA'nın batarya kapasitesi de göz

önünde bulundurulur. Batarya kapasitesinin turu tamamlamak için yetersiz olması durumunda rota üzerinde bulunan Şİ'ler ziyaret edilerek EA şarj edilmektedir. EARP için örnek bir çözüm Şekil 1.1'de gösterilmiştir.




**Şekil 1.1:** Elektrikli Araç Rotalama Problemi örnek çözümü

EARP, ARP'nin özelleştirilmiş bir versiyonudur ve EA'ların kullanımı ile ilgili ek kısıtlamalar içerir. Bu nedenle, EARP elektrikli araçların daha verimli bir şekilde kullanımını sağlayacak ve çevresel etkilerini azaltacak daha doğru bir rota planlaması yapılmasına olanak sağlar.

EARP, genellikle çözülmesi zor bir NP-hard problemi olarak kabul edilir. Bu nedenle, literatürde farklı EARP çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar arasında kesin çözüm yöntemleri, sezgisel yöntemler ve meta-sezgisel yöntemler yer alır.

Kesin çözüm yöntemleri, matematiksel bir model oluşturarak EARP'yi çözmeyi amaçlar. Bu yöntemler arasında tam sayılı doğrusal programlama modelleri, dinamik programlama modelleri ve ağaç arama yöntemleri bulunur. Ancak, bu yöntemler hesaplama gücü açısından oldukça yüksek bir maliyet gerektirir ve pratik uygulamalar için uygun değildir (Asghari ve Al-E-Hashem 2021).

Sezgisel yöntemler, EARP'yi çözmek için daha hızlı ve pratik bir yöntemdir. Nispeten kısa bir süresi içinde bir dizi yinelemeli prosedür yoluyla kanıtlanabilir şekilde uygun ve kaliteli çözümler bulan deneyime dayalı bir tekniktir, ancak çözümün optimal olduğunu garanti etmez. Tasarruf (saving) algoritmaları, tarama (sweep) algoritmaları, kümeleme tabanlı algoritmalar ve paralel sıralama algoritmaları sezgisel

yöntemlere örnek olarak verilebilir. Öte yandan meta-sezgisel algoritmalar, sezgisel algoritmaların gelişmiş formları olarak düşünülebilir. Sezgisel algoritmalar probleme özelken, meta-sezgisel algoritmalar problemden bağımsızdır ve çeşitli gerçek dünya problemlerini çözmek için kullanılabilir. Metasezgisel algoritmalar da sezgisel algoritmalar gibi bir problem için optimal çözümü bulmayı garanti etmez (Asghari ve Al-E-Hashem 2021).

Meta-sezgisel algoritmalar, yerel arama temelli algoritmalar, evrimsel hesaplama temelli algoritmalar, doğadan esinlenen algoritmalar ve matematiksel temelli algoritmalar gibi birkaç farklı kategoride gruplanabilir. Bu kategoriler tam olarak örtüşmese de birçok sezgisel algoritmanın bu kategorilere dahil edilebileceği düşünülebilir.

Özetle, gerçek hayat kısıtlarını dikkate alan EARP uygulamaları henüz sınırlıdır. Bunun en önemli sebeplerinden biri lojistik sektöründe kullanılan araç filolarının elektriklileşmesinin henüz beklenen düzeye ulaşmamasıdır. EARP EA'ların daha etkili ve çevre dostu bir şekilde kullanımını sağlamak için önemli bir problemdir. Geliştirilen yeni ve etkili EARP çözüm yöntemleri, EA kullanımının daha da yaygınlaşmasına yardımcı olabilir.

## 1.4 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu doktora tez çalışmasında, EARP'nin farklı varyasyonlarında (EARP, EARP-ZP, EARP-EZTD ve EARP-ZP-EZTD) hızlı ve etkili çözümler bulmak amacıyla 5 farklı DKA algoritması türü ve üç komşuluk değiştirme adımından oluşan 12 farklı DKA versiyonu önerilmektedir. Bu problemler, günümüzün çevre dostu taşımacılık ihtiyaçlarına yönelik önemli problemler olarak kabul edilmektedir. Bu tez, DKA algoritmasında kullanılacak komşuluk yapıları ve problem özelliklerine uygun operatörlerin belirlenmesiyle, her bir problem için en uygun DKA çözüm yöntemlerinin geliştirilmesini hedeflemektedir.

Sarsma ve yerel arama adımında kullanılacak operatörlerin her bir problem için performansları ayrı ayrı test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu sayede, her bir problem için en uygun DKA türünün ve operatörlerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Tezin

kapsamı, DKA algoritması için probleme özgü komşuluk yapılarının belirlenmesi, problem özelliklerine uygun operatörlerin geliştirilmesi ve bu operatörlerin performanslarının analiz edilmesi gibi konuları da içermektedir.

Sonuç olarak, bu tezden elde edilen akademik çıktılar EARP'nin çözümünde önemli katkılar sağlayabilir. DKA algoritması ve farklı DKA çeşitleri kullanılarak, bu zorlu problemlerin çözümüne yönelik yeni yaklaşımlar ve yöntemler geliştirilmesiyle, çevre dostu taşımacılık ihtiyaçlarına uygun, daha hızlı ve etkili çözümler elde edilebilir. Bu tezin sonuçları, çeşitli endüstrilerde ve lojistik sektöründe uygulanabilecek potansiyel faydalar sunmaktadır.

## 1.5 Tezin Tasarımı

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümü olan birinci bölümde EA teknolojisinin tarihi ve günümüzdeki öneminden bahsedilmiş, lojistik sektöründe kullanılan İYMA'ların çevresel ve ekonomik etiklerine değinilerek EA'ların avantajları, fırsatları ve dezavantajları özetlenmiştir. Ayrıca EARP hakkında bilgilere yer verilmiş, bilimsel literatürde bu probleme olan ilginin evrimi kısaca anlatılmıştır. EARP'nin çözümü için kullanılan yöntemler gruplandırıldıktan sonra ise tezin amacı, kapsamı ve tasarım süreci özetlenmiştir.

İkinci bölümde ise, EARP literatürü, tezde ele alınan zaman penceresi ve eş zamanlı toplama ve dağıtım kısıtları başta olmak üzere, farklı kısıtlar, varsayımlar ve çözüm yöntemleri açısından detaylı şekilde incelenerek özetlenmiş, tablolar aracılığı ile sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, EARP, zaman pencereli elektrikli araç rotalama problemi (EARP-ZP), eş zamanlı topla-dağıt elektrikli araç rotalama problemi (EARP-EZTD) ve zaman pencereli eş zamanlı topla-dağıt elektrikli araç rotalama problemi (EARP-ZP-EZTD) olmak üzere dört problemin çözülmesi için geliştirilen matematiksel modeller sunulmuştur. Geliştirilen modellerin doğruluğunun test edilmesinde kullanılan veri setlerinin nasıl oluşturulduğu ve veri setlerinin özellikleri anlatılmıştır. Geliştirilen matematiksel modellere ait kesin çözüm sonuçları haritalar üzerinde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında geliştirilen meta-sezgisel çözüm yönteminin detayları bulunmaktadır. Uygun bir başlangıç çözümü oluşturmak için kullanılan Clarke & Wright tasarruf sezgisel algoritmasının (CW'nin) detayları, her bir problem için nasıl entegre edildiğini gösteren sözde-kodlar (pseudo-code) ile desteklenerek açıklanmıştır. Başlangıç çözümünü iyileştirmek ve optimal çözüme yakınsamak için kullanılan DKA algoritması, komşuluk yapıları, sarma ve yerel arama adımlarında görevlendirilen operatörler ve komşuluk değiştirme adımları detaylı olarak anlatılmış, sözde-kodlar ve görsel öğelerle desteklenmiştir.

Beşinci bölümde, geliştirilen matematiksel modellere ve DKA algoritması temelli meta-sezgisel çözüm yöntemlerine ait deneysel sonuçlar ile operatörlerin performans analizleri her bir problem türü için ayrı ayrı sunulmuştur.

Altıncı ve son bölümde ise, tez çalışması boyunca incelenen bilimsel literatür göz önünde bulundurularak elde edilen bulgular ile araştırma fırsatlarına yer verilmiştir. Ayrıca geliştirilen meta-sezgisel çözüm yöntemlerinin performansları karşılaştırmalı olarak özetlenmiş, tez çalışmasının bilimsel literatüre yaptığı katkı detaylı olarak sunulmuştur.

# 2. LİTERATÜR

Araç Rotalama Problemi (ARP) 1950'lerden beri birçok farklı varyasyon ve çözüm yöntemi ile incelenmektedir. ARP'nin amacı, bir depodan başlayarak müşterilere en iyi ziyaret sırasını bularak aynı depoya geri dönmektir. Amaç fonksiyonu genel olarak mesafeyi veya seyahat süresini en aza indirmeye yöneliktir. Kapasiteli ARP'de müşteri talepleri ve araç kapasitesi de dikkate alınır. Son zamanlarda araştırmacılar ARP'ye egzoz emisyonunun minimize edilmesi gibi çevresel faktörleri de eklemeye başlamıştır. Bunu yapmak için rotanın enerji talebini tahmin etmek gereklidir, çünkü emisyonlar yakıt/enerji tüketimi ile orantılıdır. ARP'nin çevresel faktörleri dikkate alan türleri konusundaki yayınlara yönelik güncel incelemeler için Demir ve diğ. (2014), Lin ve diğ. (2014), Bektaş ve diğ. (2016), Bektaş ve diğ. (2019), Ferreira ve diğ. (2020), Asghari ve Al-E-Hashem (2021) ve Moghdani ve diğ. (2021) çalışmaları incelenebilir.

EA'ların düşük emisyonlu ve enerji verimli özellikleri, son dönemde bu araç türünün önemli bir popülarite kazanmasına yol açmıştır. EA'ların yaygın kullanımı, aynı zamanda bu araçlara özgü bazı zorlukları da ortaya çıkarmaktadır. Elektrikli araç rotalama problemi (EARP) kapsamlı rota planlaması, enerji kullanımının optimize edilmesi, Şİ'lerin etkin kullanımı ve toplama/dağıtım kısıtlarının yönetilmesi gibi faktörleri ele alır. EA'ların enerji tüketimi sürüş hızı, yol koşulları ve araç yükü gibi faktörlere bağlı olarak değişir ve bu faktörler rota planlaması ve enerji yönetimi açısından önemlidir. Bu nedenle, EARP çözümleri, araçların enerji kullanımını en aza indirirken zaman ve mesafe açısından etkili rotalar oluşturmayı amaçlar. Şarj planlaması, EA'ların sınırlı batarya kapasiteleri ve şarj süreleri dikkate alındığında önemli bir faktördür. EARP çözümleri, araçların şarj sürelerini en aza indirirken, aynı zamanda Şİ'leri en uygun şekilde kullanacak şekilde planlar. Toplama/dağıtım ve zaman penceresi kısıtlarında EA'ların yük kapasitesi, müşteri miktar ve zaman aralığı talepleri dikkate alınarak etkili ve zamanında hizmet sunma hedeflenir. Bu kısıtların yönetimi, doğru rota planlamasını ve zaman kullanımını en üst düzeye çıkarmak için önemlidir. EARP'nin temel amacı, enerji verimliliği, şarj planlaması ve toplama/dağıtım kısıtlarını en uygun şekilde dikkate alarak, EA'lar için en etkili

rotaları belirlemektir. Bu sürdürülebilir taşımacılığın yaygınlaşmasına ve enerji tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunur.

EA'ların dağıtım faaliyetlerine kesintisiz devam edebilmesi için BDİ'lerde bataryalarının değiştirilmesi ya da Şİ'lerde şarj edilmesi gerekmektedir. EA'ların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri olan şarj süresi, yeni teknolojilerin ortaya çıkmasına rağmen hala İYMA'lara kıyasla görece uzundur. Şarj teknolojilerinin gelişmesinin yanında batarya değişimi ile de Şİ'de beklemenin önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde ve bazı Avrupa ülkelerinde kurulan BDİ'lerin tüm dünyaya yayılmasının önünde bazı engeller mevcuttur. İlk ve en önemli sebep her bir BDİ'nin ilk kurulum maliyeti yarım milyon doların üzerinde olmasıdır (Inbar 2015). Ayrıca BDİ'de farklı özelliklerdeki araç bataryalarının stokta tutulması ve bu bataryaların dolu olduğunu garanti etmek istasyon işletmecileri için teknik ve ekonomik açıdan büyük yükler getirmektedir (Inbar 2015).

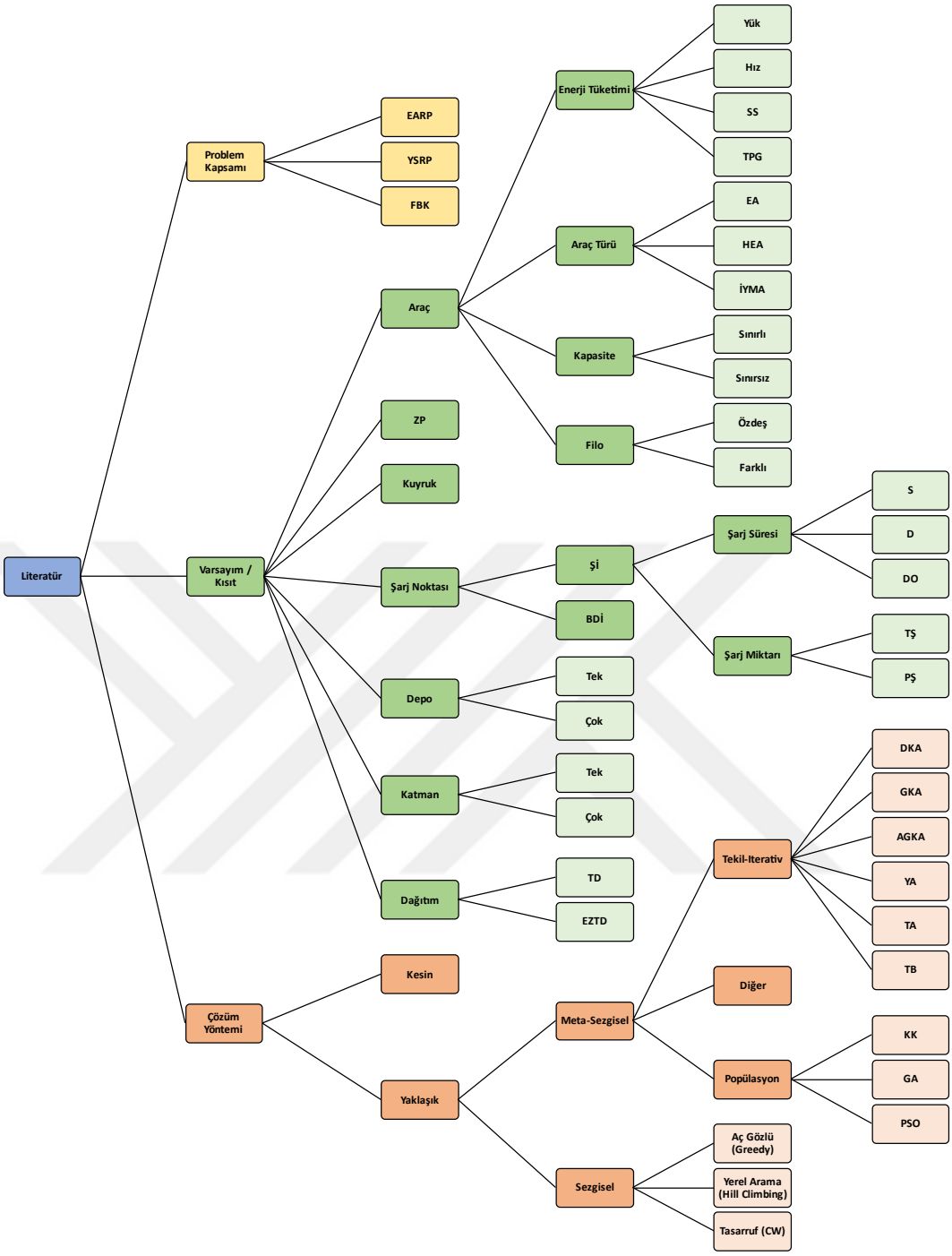
BDİ'lerde karşılaşılan diğer bir sorun batarya tasarımıdır. Batarya değişiminde bataryalar kolayca erişilebilir ve bütün bir yapıda bulunmalıdır. Güç kablolarının ve soğutma sistemi ekipmanının birkaç kez bağlantısının kesilip yeniden bağlanması için, bataryanın araçtan kolayca ve hızlı bir şekilde çıkarılabilecek ve hızla yeniden takılabilecek şekilde özel olarak tasarlanması gerekir (Upadhyay 2017). Bir teknolojinin başarılı olması ve baskın bir trend haline gelmesi için çapraz platform ya da marka uyumluluğu büyük öneme sahiptir. Batarya değişiminin yaygınlaşması için, farklı üreticilerin aynı standartlarda değiştirilebilir batarya paketlerini üretmesi gerekir. Üreticiler, araçlarını tescilli tasarımlara göre tasarlar. Standart formatlı bir batarya kullanmak üreticinin esnekliğini ve inovasyon kapasitesini sınırlar (Upadhyay 2017).

Bataryaların her şarjdan sonra performansı azaldığından EA'ların menzili de zamanla kısalmaktadır. Batarya değiştirme senaryosunda, BDİ'de özellikle batarya yıpranması nedeniyle, farklı enerji depolama kapasitelerine sahip bataryalar bulunacaktır. Çoğu firma veya bireysel kullanıcı daha fazla menzil sunduğu için batarya değişiminde daha yeni pil paketlerini tercih etme eğiliminde olacaktır. Düşük kapasiteli bataryaların menzilinin yeni bataryalarla aynı olmamasından dolayı, bataryasının kullanım döngü sayısı düşük olan kullanıcılar, döngü sayısı yüksek ve

performansı daha düşük bir batarya ile değiştirilmesi konusunda istekli olmayacaktır. Müşteri memnuniyetini sağlayabilmek için, BDİ işletmecileri düşük performansa sahip batarya paketlerini daha hızlı bir şekilde envanterden çıkarmak zorunda kalabilir. Bu durum geri dönüşüm maliyetinin önemli ölçüde artmasına sebep olacaktır (Upadhyay 2017).

Tez kapsamında EARP literatürü incelenirken, yalnızca uluslararası indekslerde taranan, hakemli dergilerde İngilizce dilinde yayınlanan makaleler dikkate alınmıştır. EA'ların kullanılmadığı, rota üzerinde şarj etme veya batarya değiştirme işleminin yapılmadığı, dağıtım ya da toplama faaliyetlerinin gerçekleştirilmediği çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Toplamda 95 çalışma incelenmiş ve Şekil 2.1'deki kriterlere göre sınıflandırılmıştır. Yapılan sınıflandırmanın detayları problem kapsamı, varsayım ve kısıtlar açısından Tablo 2.1'de, çözüm yöntemleri ve sezgisel algoritmalar açısından ise Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Bu çalışmada EARP lojistik operasyonları kapsamında ele alınsa da EA'ların bireysel kullanımını konu alan bilimsel çalışmalar da mevcuttur. Bireysel amaçla kullanılan EA'ların menzilini etkileyen en önemli unsurların başında sürücünün sürüş tarzı gelmektedir. Yüksek ve ani hızlanmalarda menzil kısalırken düşük hızlarda menzil uzamaktadır (Musk ve Straubel 2012). Literatürde sürücünün kullanım davranışlarının menzil ile ilişkisini inceleyen çalışmalar mevcuttur (Birrell ve diğ. 2015; Marmaras ve diğ. 2017; Yang ve diğ. 2016). Batarya verimliliğinin eskiye nazaran artması sonucunda EA'lar üretim ortamlarında da kullanılmaya başlamıştır. Üretim tesislerinin iç lojistik gereksinimlerinde (Zhou & Tan, 2018), toplu ulaşımda (Iacobucci ve diğ. 2019), evde bakım hizmetlerinde (Erdem ve Koç 2022) ve paylaşımlı araç hizmetlerinde (Jung ve diğ. 2017) EA'ların kullanımını konu alan bilimsel araştırmalar da mevcuttur.




**Şekil 2.1:** Literatür sınıflandırma kriterleri

Literatürde, İYMA'lar için enerji/yakıt tüketimi ve emisyonları tahmin etmek amacıyla mikroskopik, makroskopik ve faktör modelleri olmak üzere üç ana kategoriye ayrılan modeller bulunmaktadır (Demir ve diğ. 2014). Faktör modelleri, enerji ve yakıtı mesafeyle doğru orantılı olarak hesaplayarak en basit yaklaşımı sunar. Makroskopik modeller, emisyon hesaplamalarında geniş ağlar veya filolar üzerinde çalışarak toplu ağ parametrelerine (ör. ortalama hız) odaklanır. Mikroskobik modeller

ise, detaylı araç modelleri ve sürüş döngüleri ile kullanılan yüksek hassasiyetli simülasyonlar için anlık (saniye-saniye) enerji/yakıt tüketimi ve emisyon değerlerini hesaplar. EARP literatüründe de modelleri aynı şekilde gruplamak mümkündür. İncelenen 95 çalışmadan 67'sinde EA'ların enerji tüketiminin yalnızca gidilen mesafe ile orantılı olarak hesaplandığı faktör modelleri mevcuttur. 28 çalışmada ise mesafeye ek olarak, EA'nın mevcut yük miktarı, hızı, yolun eğimi, sürücünün kullanım stili vb. gibi kriterlerin dikkate alındığı mikroskopik modeller mevcuttur (Tablo 2.1).

EA'nın enerji tüketimi hesaplamasında mesafe, yük ve hızı dikkate alan literatürdeki ilk çalışma Lin ve diğ. (2016b) tarafından yayınlanmıştır. Şİ kapasitelerinin sınırlı olduğu ve kuyrukta bekleme sürelerinin maliyet olarak amaç fonksiyonuna yansıtıldığı bu çalışmada, özdeş olmayan EA'lardan oluşan karma bir filo dikkate alınmıştır. Önerilen matematiksel model küçük test verileri ile çözülmüş olsa da büyük problemler için sezgisel bir yöntem geliştirilmemiştir.

İncelenen çalışmalardan beşinde kat edilen mesafeye ek olarak EA'nın iki düğüm arasındaki yük miktarının enerji tüketimi hesaplamasına dahil edildiği gözlemlenmiştir (Futalef ve diğ. 2023; Kancharla ve Ramadurai 2020; Rastani ve Çatay 2021; Xiao ve diğ. 2023; Xu ve diğ. 2022).

De Cauwer ve diğ. (2017) tarafından sürücünün rota üzerindeki araç kullanım profilini yapay sinir ağları ile tahmin ederek gerçekçi bir tüketim tahmini sağlanmaya çalışılmıştır. Basso ve diğ. (2019) tarafından zaman pencereli (ZP) EARP kapsamında ayrıntılı topografya ve hız profillerinin dikkate alındığı iki aşamalı enerji tüketim tahmin modeli sunulmuştur. Dağıtım ağında enerji maliyet katsayılarını hesaplamak için bir model açıklanmıştır. Bu modelde EA'nın toplam ağırlığına göre belirlenen katsayılara bağlı olarak doğrusal bir fonksiyon vardır. Bu katsayılar, topografya, hız, güç aktarma sistemi verimliliği ve trafik ışıkları ve kavşaklardaki hızlanma ve frenlemenin etkisine dair bilgileri içerir.

Schneider ve diğ. (2014), EARP-ZP'nin çözümü için DKA ve Tabu Arama (TA) algoritmasının birlikte kullanıldığı bir meta-sezgisel geliştirmiştir. Desaulniers ve diğ. (2016) da aynı problemin çözümünde, EA'ların rota üzerinde bir defa veya çok kez şarj edilmesi ile tam veya parçalı şarj edilmesi varsayımlarının kombinasyonlarından oluşan dört farklı şarj stratejisini ele almıştır. EARP-ZP'nin

çözümünde DKA'nın kullanıldığı diğer bir çalışma Bruglieri ve diğ. (2015) tarafından yapılmıştır. Homojen bir EA filosunun rotalanması için karma tam sayılı doğrusal programlama formülasyonu önerilmiştir. Amaç fonksiyonunda, kullanılan EA sayısının, toplam seyahat süresinin, toplam şarj süresinin ve bekleme süresinin en küçüklenmesi hedeflenmiştir.

EA'ların şarj seviyesinin azalması sonucunda en yakın şarj istasyonuna gidip şarj edilmeleri gerekmektedir. EARP literatüründe şarj süresi ile ilgili varsayımları üç ana başlıkta toplamak mümkündür; sabit (S) (Agárdi ve diğ. 2019; Cai ve diğ. 2023; Ghobadi ve diğ. 2021; Lu ve diğ. 2020; Pan ve diğ. 2021; Shao ve diğ. 2018; Shao ve diğ. 2017; Urazel ve Keskin 2021; Zhao ve Lu 2019), doğrusal (D) ve doğrusal olmayan şarj fonksiyonu (DO). Sabit şarj süresi varsayımında, EA'nın Şİ'ye geldiğinde şarj seviyesi ne olursa olsun sabit bir sürede tam dolu şekilde Şİ'den ayrıldığı kabul edilmiştir. Doğrusal şarj fonksiyonunda ise şarj hızı sabittir, şarj süresi bataryanın mevcut şarj seviyesinden şarj edilecek seviyeye kadar olan enerji miktarının şarj hızına bölünmesi ile hesaplanır. Örneğin 20kW kapasiteli boş bir bataryanın 2kW/saat hızla şarj eden bir soketle şarj edilmesi senaryosunda, şarj süresinin 10 saat olması beklenmektedir, ancak gerçek durum bu şekilde değildir. Genel olarak bataryalar %80 şarj seviyesine kadar doğrusal bir hızla şarj olurken; kalan %20'lik kısım daha yavaş ve azalan bir hız ile şarj olmaktadır (Pelletier ve diğ. 2017). Tez kapsamında incelenen çalışmalardan 16'sında doğrusal olmayan şarj fonksiyonu dikkate alınmıştır. Bruglieri ve diğ. (2017); Cataldo-Díaz ve diğ. (2022); Futalef ve diğ. (2023); Karakatič (2021); Keskin ve diğ. (2019); Koç ve diğ. (2019); Li ve diğ. (2022), çalışmalarında zaman penceresi, doğrusal olmayan şarj fonksiyonu ve parçalı şarj kısıtlarını dikkate almıştır. Barco ve diğ. (2017); Xu ve diğ. (2022); Zuo ve diğ. (2019) ise diğer iki kısıtla beraber tam şarj kısıtını dikkate almıştır. Froger ve diğ. (2019); Guo ve diğ. (2022); Kancharla ve Ramadurai (2020); Kim ve Chung (2023); Lee (2020); Montoya ve diğ. (2017a) tarafından yapılan çalışmalarda zaman penceresi olmaksızın doğrusal olmayan şarj fonksiyonu kullanılmıştır. Kim ve Chung (2023), şarj ve deşarj hızlarının şarj durumuna bağlı olduğu doğrusal olmayan şarj ve deşarj fonksiyonlarını dikkate alan bir EARP ela almıştır. Bu çalışmada, şarj durumuna bağlı özelliklerin etkisi araştırılmış ve doğrusal olmayan bir deşarj fonksiyonu geliştirilmiştir. Ayrıca, karma tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş ve yerel arama (YA) algoritması içeren etkin bir sezgisel çözüm yöntemi önerilmiştir.

Deneysel sonuçlar, EA'ların rotanın farklı noktalarındaki şarj durumunun etkisini göz ardı ederek, sabit veya doğrusal şarj süresi varsayımlarının dikkate alınmasının düşük kaliteli çözümlere yol açabileceğini göstermiştir. Ayrıca, sonuçlar, şarj istasyonlarının türüne ve ziyaretlerin sırasına bağlı olarak optimal şarj davranışının değiştiğini de göstermektedir.

Tez kapsamında incelenen EARP literatüründeki 95 çalışmadan 34'ü yalnızca parçalı şarj kısıtını dikkate alırken; Cataldo-Díaz ve diğ. (2022); Desaulniers ve diğ. (2016); Zang ve diğ. (2022) parçalı ve tam şarj kısıtlarını ayrı ayrı ele alarak şarj stratejisinin çözüm üzerindeki etkisini incelemiştir. Montoya ve diğ. (2017b) EARP'nin çözümünde DO şarj fonksiyonu ve parçalı şarj varsayımını dikkate almış, seyahat ve şarj sürelerinin toplamının en küçüklenmesini hedeflemiştir. Problemin çözümü için YA algoritmasını içeren bir meta-sezgisel önerilmiştir. Keskin ve Çatay (2016), EARP-ZP'yi parçalı şarja izin veren (EARP-ZP-PŞ) bir senaryo ile ele almış ve bu kapsamda bir matematiksel model geliştirilmiştir. Özdeş EA'lardan oluşan bir filo, doğrusal şarj fonksiyonu ve parçalı şarj varsayımlarının kullanıldığı çalışmada, enerji tüketiminin hesaplanmasında faktör modeli kullanılmıştır. Önerilen Adaptif Geniş Komşuluk Arama (AGKA) meta-sezgiselinin etkinliğini test etmek için Schneider ve diğ. (2014)'nin veri setleri kullanılmış ve bazı veri setlerinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Lijun ve diğ. (2023), yeşil ve sürdürülebilir taşımacılığın geliştirilmesi amacıyla EA kullanan lojistik şirketlerinin kentsel dağıtım hizmetlerini ele almaktadır. Çalışmada zaman bağımlı yarı-açık çok depo EARP, Şİ ve BDİ birlikte incelemektedir. Şİ'ye gelen bir EA'nın parçalı olarak şarj edilebileceği varsayımı kullanılmıştır. Problemin çözümü için çok amaçlı bir benzetilmiş tavlama (TB) algoritması tasarlanmıştır.

EARP'nin farklı bir türevi de İki Kademeli EARP (2K-EARP) olarak literatürde çalışılmıştır. 2K-EARP, İki Kademeli Araç Rotalama Probleminin (2K-ARP'nin) yalnızca ikinci ya da her iki kademede EA'ların kullanıldığı bir uzantısıdır. 2K-EARP'de ana depo ve uydu depolardan oluşan birincil bir dağıtım düzeyi ve uydu depolar ile müşteriler arasındaki ikincil bir dağıtım düzeyi bulunmaktadır. 2K-EARP'nin genel hedefleri arasında, toplam yolculuk mesafesini en aza indirmek, genel

enerji tüketimini azaltmak, araç sayısı ve şarj etkinliklerini optimize etmek bulunmaktadır.

Literatür dikkatle incelendiğinde 2K-EARP kapsamında yayınlanan 8 çalışma mevcuttur (Agárdi ve diğ. 2019; Akbay ve diğ. 2022; Breunig ve diğ. 2019; Ghobadi ve diğ. 2022; Goli ve diğ. 2022; Jie ve diğ. 2019b; Wang ve Zhou 2021; Wu ve Zhang 2021). Jie ve diğ. (2019a) ve Wu ve Zhang (2021) EA'ların BDİ'lerde batarya değişimi yaptığı senaryoyu kullanmışlardır. Batarya değişim işlemi standart bir işlem süresine sahip olduğu için Şİ varsayımındaki doğrusal-doğrusal olmayan şarj süresi ve tam-parçalı şarj varsayımlarına göre daha az karmaşık bir problemdir. Breunig ve diğ. (2019) ise şarj istasyonu kullanımı varsayımı ile 2K-EARP'ye çözüm aramışlar ve şarj stratejisi olarak doğrusal şarj fonksiyonu ile tam şarj varsayımlarını dikkate almışlardır. Agárdi ve diğ. (2019) birinci kademede homojen bir İYMA filosu, ikinci kademede homojen bir EA filosu varsayımı ile toplam rota uzunluğunun en küçüklenmesini amaçlamıştır. Sabit şarj süresi ve tam şarj stratejisinin dikkate alındığı çalışmada problemin çözümünde GA kullanılmıştır. (Akbay ve diğ. 2022) ise Agárdi ve diğ. (2019) ile aynı filo varsayımı ve amaç fonksiyonunu kullansa da zaman penceresi, doğrusal şarj fonksiyonu ve tam şarj kısıtlarını dikkate almıştır. 2K-EARP'nin başlangıç çözümünün oluşturulmasında CW tasarruf sezgiseli kullanılırken, çözümün iyileştirilmesi için DKA algoritması önerilmiştir.

EARP literatüründe tez kapsamında incelenen 95 çalışmanın 81'inde EA'ların merkezi tek bir depodan çıkarak aynı depoya döndüğü tek depolu senaryo altında modeller ve çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Birden fazla deponun olduğu modellerin kullanıldığı 14 çalışmanın 6'sında (Breunig ve diğ. 2019; Ghobadi ve diğ. 2022; Goli ve diğ. 2022; Wang ve Zhou 2021; Wang ve diğ. 2023; Wang ve diğ. 2022) çok katmanlı bir ağ yapısı varken, çok katmanlı ağ yapısının olduğu 8 çalışma (Bac ve Erdem 2021; Erdem ve Koç 2022; Ghobadi ve diğ. 2021; Karakatič 2021; Koç ve diğ. 2019; Lijun ve diğ. 2023; Paz ve diğ. 2018a; Xu ve diğ. 2023) bulunmaktadır. Tek depolu modellerden 4'ünde (Agárdi ve diğ. 2019; Akbay ve diğ. 2022; Jie ve diğ. 2019b; Wu ve Zhang 2021) çok katmanlı ağ yapısı bulunmaktadır.

Paz ve diğ. (2018b), çalışmasında çok depo ve homojen filo EARP-ZP'yi ele almış ve çözümüne yönelik karma tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Geliştirilen modelde; i) Şİ sayısı ve yeri, ii) depoların sayısı ve yeri, iii)

EA'ların sayısı ve rotasına yönelik kararlar verilmeye çalışılmıştır. Her EA'nın aynı depodan çıkıp aynı depoya döndüğü, şarj fonksiyonunun doğrusal olduğu, batarya değişim süresinin sabit olduğu ve şarj süresinin batarya değişim süresinden her zaman uzun olduğu varsayılmıştır. Araç hızının sabit olduğu, enerji tüketiminin gidilen yol ile doğru orantılı olduğu varsayılmıştır. Model beş, on ve on beş müşteriden oluşan, Schiffer ve Walther (2017) tarafından oluşturulan veri setleri kullanılarak CPLEX ile çözülmüştür.

Dağıtım ağlarında firmalar filo büyüklüğüne ve filodaki araçların özelliklerine karar verirken, müşterilerin talepleri, taşınacak yüklerin özellikleri ve miktarı, dağıtım yapılacak bölgedeki yasal zorunluluklar, talep noktalarının fiziki özellikleri vb. gibi kriterleri dikkate almak zorundadır. Literatürde bu problem Filo Büyüklüğü ve Karması (Fleet Size and Mix) (FBK) olarak yer almaktadır. Goeke ve Schneider (2015), EARP-ZP'yi karma filo varsayımı ile ele almıştır (EARP-ZP-KF). İYMA'lar ve EA'lar birlikte rotalanırken, EA'lar için enerji tüketimi, İYMA'lar için yakıt tüketimi tahmini yapılmıştır. Tüketim tahmininde hız, yol karakteristiği, yük miktarı ve hava durumu dikkate alınarak gerçekçi bir model geliştirilmiştir. Problemin çözümü için AGKA algoritması kullanılmıştır. Hiermann ve diğ. (2016), EARP-ZP, FBK ve Şİ'ler için yer seçim problemine (YSR) odaklanmıştır. Farklı batarya kapasitelerine sahip sınırsız sayıda EA olduğunu varsaymışlardır. Çözüm yaklaşımları, yerel arama (YA) ve etiketleme (labeling) tekniklerini barındıran bir AGKA algoritmasını içermektedir. Koç ve diğ. (2014) KRP ile FBK problemini önermiştir. Problemi çözmek için hibrit bir GA geliştirmişler ve sadece İYMA'lardan oluşan karma bir araç filosunun, homojen olan senaryoya göre avantajlarını ortaya koymuşlardır. Rezgui ve diğ. (2019) EARP ve FBK birlikte çözmek için DKA algoritması geliştirmiştir.

Wang ve diğ. (2023), şehir lojistik ağlarında birden fazla depo arasındaki iş birliğini ve Şİ'lerin paylaşımını ele alan işbirlikçi, çok-depolu, EARP-ZP ve FBK problemi üzerine odaklanmıştır. Makale, toplam işletme maliyetini ve EA sayısını en aza indirmeyi amaçlayan çok amaçlı doğrusal olmayan bir programlama modeli önermektedir. Hesaplama karmaşıklığını azaltmak amacıyla müşterileri kümelemek ve depolara olasılıksal olarak atamak için Gauss karışım kümeleme algoritması geliştirilmiştir. EA rotalarını ve şarj kararlarını optimize etmek için tabu arama ve çok amaçlı GA kullanılmıştır.

Literatürde, merkezi bir depodan EA'larla mal dağıtımını dikkate alan problemler incelenmiştir. Ancak, birçok gerçek dünya uygulamasında toplama ve dağıtım yapısı bulunmaktadır. Merkezi depodan çıkarken ziyaret edilecek müşterilerin dağıtım taleplerini alıp, müşterilerden toplanan malların depoya getirildiği senaryo literatürde iki farklı problem türü olarak ele alınmıştır. Birincisi, her bir müşteri açısından toplama veya dağıtım taleplerinden yalnızca birinin geçerli olduğu topla-dağıt (TD) problemidir. İkincisi ise, her bir müşterinin hem toplama hem de dağıtım talebinin olduğu eş zamanlı toplama ve dağıtım (EZTD) problemidir. Bazı çalışmalarda da hem TD hem de EZTD problemlerinde geçerli olan depo-müşteri veya müşteri-depo arasındaki taşımanın, müşteri-müşteri arasında olduğu modeller önerilmiştir. Tez kapsamında incelenen 95 çalışmanın 8'inde (Ghobadi ve diğ. 2021; Goeke 2019; Grandinetti ve diğ. 2016; Lin ve diğ. 2016a; Soysal ve diğ. 2020; Xiao ve diğ. 2023; Yang ve diğ. 2022; Zhao ve Lu 2019) TD, 3'ünde (Cai ve diğ. 2023; Xu ve diğ. 2022; Yilmaz ve Kalayci 2022) EZTD kısıtları dikkate alınmıştır.

Goeke (2019), hem zaman penceresi hem de topla-dağıt kısıtlarının dikkate alındığı EARP-ZP-TD için bir model önermiştir. EA'ların rota üzerinde bulunan Şİ'lerde parçalı olarak şarj edildiği model, şarj miktarına yönelik kararların da verildiği granüler-TA algoritması ile çözülmüştür. Xiao ve diğ. (2023) de EARP-ZP-TD'nin çözümü için adaptif seçim mekanizmasına dayalı genetik operatörler, benzerlik derecesine dayalı seçim operatörü ve TA için modifikasyon operatörleri içeren üç tür yeni operatörü birleştiren çeşitlilik artırıcı bir memetik algoritma önermiştir. Yilmaz ve Kalayci (2022) literatürde EARP ile EZTD kısıtını birlikte dikkate alan ilk çalışmadır. Karma tam sayılı bir programlama modeli önerilerek küçük boyutlu veri setleri kullanılarak CPLEX çözümleri elde edilmiştir. Büyük boyutlu veri setleri kapsamında, başlangıç çözümünün oluşturulması için CW tasarruf algoritmasına dayanan bir sezgisel kullanılmıştır. Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarından oluşan 12 DKA varyantı kullanılarak büyük boyutlu veri setlerinde kısa sürede kaliteli çözümlere ulaşılmıştır.

Yang ve Sun (2015), EARP kapsamında Şİ yerine BDİ'lerin kullanıldığı ve aday konumlardan hangilerinde BDİ açılması gerektiğinin kararını veren bir model önermiştir. EARP ile BDİ yer seçimi eş zamanlı olarak yapıldığı için bu problem literatürde elektrikli araç yer seçimi ve rotalama problemi (EAYSRP) olarak

tanımlanmıştır. EAYSRP, tam sayılı programlama modeli olarak formüle edilmiş, dört aşamalı SIGALNS olarak adlandırılan sezgisel ve iki aşamalı TA-CW tasarruf sezgiseli kullanılarak çözülmüştür. Geliştirilen modelde amaç, BDİ kurma maliyeti ve araçların yük taşıma maliyetleri toplamını minimize etmektir. İki farklı model tanımı yapılmış, ilk modelde her bir EA BDİ'yi bir defa ziyaret edebilirken, ikinci modelde bu sınırın olmadığı varsayılmıştır. Hof ve diğ. (2017a), Yang ve Sun (2015) tarafından tanımlanan EAYSRP'yi zaman penceresi kısıtı ile birlikte ele almış, çözüm için AGKA algoritmasını önermiştir. Schiffer ve Walther (2017), EARP ile Şİ yer seçim problemini birlikte ele almış, mesafe, maliyet, EA ve gerekli Şİ sayısı minimizasyonu gibi farklı amaç fonksiyonlarının olduğu senaryolarla çözümde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Zhang ve diğ. (2019) ise EARP ile BDİ yer seçim probleminin birlikte ele alındığı modelde, optimal BDİ konumu ve sayısının stokastik talep altında bulunması için DKA algoritması önermiştir.

**Tablo 2.1:** Elektrikli araç rotalama problemi literatürü

| | Problem | | Araç | | Enerji Tüketimi | | | | Filo | | EA Kap | | Diğer Kısıtlar | | | | | | Şİ / BDİ | | | Şarj Süresi | | | Şarj Miktarı | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Çalışma** | YSRP | FBK | HEA | İYMA | Yük | Hız | SS | TPG | Özdeş | Farklı | Sınırlı | Sınırsız | ÇK | ZP | Kuyruk | TD | EZTD | ÇD | Şİ | BDİ | ŞİBDİ | S | D | DO | TŞ | PŞ |
| Schneider ve diğ. (2014) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | |
| Bruglieri ve diğ. (2015) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Goeke ve Schneider (2015) | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Li-Ying ve Yuan-Bin (2015) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Yang ve Sun (2015) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | | - | - | - | - | - |
| Desaulniers ve diğ. (2016) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Grandinetti ve diğ. (2016) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Hiermann ve diğ. (2016) | | ✓ | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Keskin ve Catay (2016) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Lin ve diğ. (2016a) | | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Vaz Penna ve diğ. (2016) | | ✓ | ✓ | | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Barco ve diğ. (2017) | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | |
| Bruglieri ve diğ. (2017) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Hof ve diğ. (2017b) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | | - | - | - | - | - |
| Montoya ve diğ. (2017a) | | | | | | | | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Schiffer ve Walther (2017) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Shao ve diğ. (2017) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| Keskin ve Catay (2018) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Paz ve diğ. (2018a) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ |
| Shao ve diğ. (2018) | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| Zhang ve diğ. (2018) | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Agárdi ve diğ. (2019) | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| Basso ve diğ. (2019) | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Breunig ve diğ. (2019) | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Cortés-Murcia ve diğ. (2019) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Froger ve diğ. (2019) | | | | | | | | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |

**Tablo 2.1 (devam):** Elektrikli araç rotalama problemi literatürü

| | Problem | | Araç | | Enerji Tüketimi | | | | Filo | | EA Kap | | Diğer Kısıtlar | | | | | | Şİ / BDİ | | | Şarj Süresi | | | Şarj Miktarı | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Çalışma** | YSRP | FBK | HEA | İYMA | Yük | Hız | SS | TPG | Özdeş | Farklı | Sınırlı | Sınırsız | ÇK | ZP | Kuyruk | TD | EZTD | ÇD | Şİ | BDİ | ŞİBDİ | S | D | DO | TŞ | PŞ |
| Goeke (2019) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Jie ve diğ. (2019b) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | | | ✓ | | - | - | - | - | - |
| Keskin ve diğ. (2019) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Koç ve diğ. (2019) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Zhang ve diğ. (2019) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | | - | - | - | - | - |
| Zhao ve Lu (2019) | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| Zuo ve diğ. (2019) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | |
| Kancharla ve Ramadurai (2020) | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Lee (2020) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | |
| Löffler ve diğ. (2020) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Lu ve diğ. (2020) | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| Meng ve Ma (2020) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Park ve Jin (2020) | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Raeesi ve Zografos (2020) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | | ✓ | | - | - | - | - | - |
| Soysal ve diğ. (2020) | | | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | |
| Tahami ve diğ. (2020) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Taş (2020) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Wang ve diğ. (2020) | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Zhang ve diğ. (2020) | | | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Zhao ve diğ. (2020) | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Bac ve Erdem (2021) | | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Ghobadi ve diğ. (2021) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| Iwańkowicz (2021) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Karakatič (2021) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Keskin ve diğ. (2021) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Lin ve diğ. (2021) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |

**Tablo 2.1 (devam):** Elektrikli araç rotalama problemi literatürü

| | Problem | | Araç | | Enerji Tüketimi | | | | Filo | | EA Kap | | Diğer Kısıtlar | | | | | | Şİ / BDİ | | | Şarj Süresi | | | Şarj Miktarı | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Çalışma** | YSRP | FBK | HEA | İYMA | Yük | Hız | SS | TPG | Özdeş | Farklı | Sınırlı | Sınırsız | ÇK | ZP | Kuyruk | TD | EZTD | ÇD | Şİ | BDİ | Şİ&BDİ | S | D | DO | TŞ | PŞ |
| Pan ve diğ. (2021) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ |
| Rastani ve Çatay (2021) | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Urazel ve Keskin (2021) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| Wang ve Zhou (2021) | | | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | - | - | - | - | - |
| Wu ve Zhang (2021) | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Yu ve diğ. (2021) | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Zhou ve diğ. (2021) | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Zhu ve diğ. (2021) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Akbay ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Basso ve diğ. (2022) | | | | | | | ✓ | | - | - | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Cataldo-Díaz ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Duman ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Elahi ve Avakh Darestani (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Erdem ve Koç (2022) | | | | | | | | | ✓ | | - | - | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Fateme Attar ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Ghobadi ve diğ. (2022) | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Goli ve diğ. (2022) | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | - | - | - | ✓ | |
| Guo ve diğ. (2022) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Jia ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ | |
| Kim ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ | |
| Li ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Lin ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Liu ve diğ. (2022) | | | | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Messaoud (2022) | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ | |
| Sánchez ve diğ. (2022) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Wang ve diğ. (2022) | ✓ | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |

**Tablo 2.1 (devam):** Elektrikli araç rotalama problemi literatürü

| | Problem | | Araç | | Enerji Tüketimi | | | | Filo | | EA Kap | | Diğer Kısıtlar | | | | | | Şİ / BDİ | | | Şarj Süresi | | | Şarj Miktarı | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Çalışma** | YSRP | FBK | HEA | İYMA | Yük | Hız | SS | TPG | Özdeş | Farklı | Sınırlı | Sınırsız | ÇK | ZP | Kuyruk | TD | EZTD | ÇD | Şİ | BDİ | Şİ&BDİ | S | D | DO | TŞ | PŞ |
| Xu ve diğ. (2022) | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | |
| Yang ve diğ. (2022) | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Yao ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | - | - | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Yilmaz ve Kalayci (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Zang ve diğ. (2022) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Zhang ve diğ. (2022) | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Cai ve diğ. (2023) | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| Farahani ve diğ. (2023) | | | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Futalef ve diğ. (2023) | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| Hien ve diğ. (2023) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Kim ve Chung (2023) | | | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | ✓ | | |
| Li ve diğ. (2023) | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Lijun ve diğ. (2023) | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ |
| Wang ve diğ. (2023) | | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Wang ve Zhao (2023) | | ✓ | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ |
| Xiao ve diğ. (2023) | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| Xu ve diğ. (2023) | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - |
| **Bu tez çalışması** | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |

**YSRP:** Yer Seçimi ve Rotalama Problemi; **FBK:** Filo Büyüklüğü ve Karması Optimizasyonu; **HEA:** Hibrit Elektrikli Araç; **İYMA:** İçten Yanmalı Motorlu Araç; **SS:** Stokastik Süreler; **TPG:** Topografya; **ÇK:** Çok Kademeli Dağıtım Ağı; **ZP:** Zaman Penceresi; **Kuyruk:** Şarj İstasyonu Kuyrukta Bekleme; **TD:** Topla-Dağıt; **EZTD:** Eş Zamanlı Toplama ve Dağıtım; **ÇD:** Çoklu Depo; **Şİ:** Şarj İstasyonu; **BDİ:** Batarya Değişim İstasyonu; **S:** Sabit Şarj Fonksiyonu; **D:** Doğrusal Şarj Fonksiyonu; **DO:** Doğrusal Olmayan Şarj Fonksiyonu; **TŞ:** Tam Şarj; **PŞ:** Parçalı Şarj.

**Tablo 2.2:** EARP literatürü (çözüm yöntemleri)

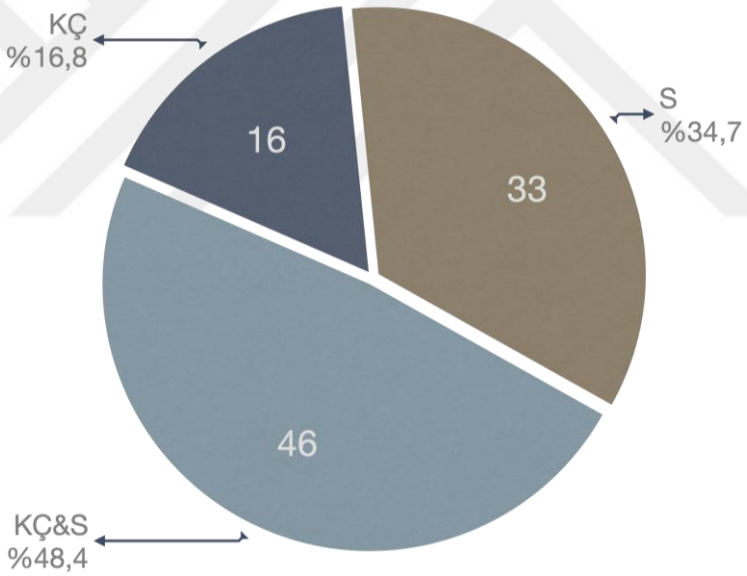
| **Çalışma** | KÇ | KÇ&S | S | DKA | GKA | AGKA | KK | CW | GA | YA | TB | TA | AG | PSO | Diğer |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Schneider ve diğ. (2014) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | |
| Bruglieri ve diğ. (2015) | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Goeke ve Schneider (2015) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Li-Ying ve Yuan-Bin (2015) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | |
| Yang ve Sun (2015) | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| Desaulniers ve diğ. (2016) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Grandinetti ve diğ. (2016) | | ✓ | | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Hiermann ve diğ. (2016) | | ✓ | | | | ✓ | | | | ✓ | | | | | |
| Keskin ve Catay (2016) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Lin ve diğ. (2016a) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Vaz Penna ve diğ. (2016) | | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | | |
| Barco ve diğ. (2017) | | | ✓ | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Bruglieri ve diğ. (2017) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Hof ve diğ. (2017b) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Montoya ve diğ. (2017a) | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | |
| Schiffer ve Walther (2017) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Shao ve diğ. (2017) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | |
| Keskin ve Catay (2018) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Paz ve diğ. (2018a) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Shao ve diğ. (2018) | | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | | | | | |
| Zhang ve diğ. (2018) | | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ | | | | | |
| Agárdi ve diğ. (2019) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| Basso ve diğ. (2019) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Breunig ve diğ. (2019) | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | | |
| Cortés-Murcia ve diğ. (2019) | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | |
| Froger ve diğ. (2019) | | ✓ | | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Goeke (2019) | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | | |
| Jie ve diğ. (2019b) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Keskin ve diğ. (2019) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Koç ve diğ. (2019) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Zhang ve diğ. (2019) | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | |
| Zhao ve Lu (2019) | | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Zuo ve diğ. (2019) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kancharla ve Ramadurai (2020) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Lee (2020) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Löffler ve diğ. (2020) | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | |
| Lu ve diğ. (2020) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Meng ve Ma (2020) | | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | |
| Park ve Jin (2020) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Raeesi ve Zografos (2020) | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | | | | |
| Soysal ve diğ. (2020) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Tahami ve diğ. (2020) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Taş (2020) | | ✓ | | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Wang ve diğ. (2020) | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Zhang ve diğ. (2020) | | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Zhao ve diğ. (2020) | | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | |
| Bac ve Erdem (2021) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Ghobadi ve diğ. (2021) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | |
| Iwańkowicz (2021) | | | ✓ | | | | | | | | | | | | ✓ |

**Tablo 2.2 (devam):** EARP literatürü (çözüm yöntemleri)

| Çalışma | KÇ | KÇ&S | S | DKA | GKA | AGKA | KK | CW | GA | YA | TB | TA | AG | PSO | Diğer |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Karakatič (2021) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | |
| Keskin ve diğ. (2021) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Lin ve diğ. (2021) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | ✓ |
| Pan ve diğ. (2021) | | | ✓ | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Rastani ve Çatay (2021) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Urazel ve Keskin (2021) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | |
| Wang ve Zhou (2021) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Wu ve Zhang (2021) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Yu ve diğ. (2021) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | ✓ | | | | |
| Zhou ve diğ. (2021) | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | | |
| Zhu ve diğ. (2021) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | |
| Akbay ve diğ. (2022) | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | |
| Basso ve diğ. (2022) | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| Cataldo-Díaz ve diğ. (2022) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Duman ve diğ. (2022) | | ✓ | | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Elahi ve Avakh Darestani (2022) | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | | | | |
| Erdem ve Koç (2022) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Fateme Attar ve diğ. (2022) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Ghobadi ve diğ. (2022) | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | | ✓ |
| Goli ve diğ. (2022) | | ✓ | | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Guo ve diğ. (2022) | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | |
| Jia ve diğ. (2022) | | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | |
| Kim ve diğ. (2022) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | |
| Li ve diğ. (2022) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | |
| Lin ve diğ. (2022) | | | ✓ | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Liu ve diğ. (2022) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| Messaoud (2022) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | |
| Sánchez ve diğ. (2022) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Wang ve diğ. (2022) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| Xu ve diğ. (2022) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Yang ve diğ. (2022) | | ✓ | | | | | | | | | | | | | ✓ |
| Yao ve diğ. (2022) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Yilmaz ve Kalayci (2022) | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | |
| Zang ve diğ. (2022) | ✓ | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Zhang ve diğ. (2022) | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | |
| Cai ve diğ. (2023) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | |
| Farahani ve diğ. (2023) | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | |
| Futalef ve diğ. (2023) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | |
| Hien ve diğ. (2023) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | |
| Kim ve Chung (2023) | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | | |
| Li ve diğ. (2023) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| Lijun ve diğ. (2023) | | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | | | |
| Wang ve diğ. (2023) | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ |
| Wang ve Zhao (2023) | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | | | | |
| Xiao ve diğ. (2023) | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ |
| Xu ve diğ. (2023) | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| **Bu tez çalışması** | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | | ✓ | | |

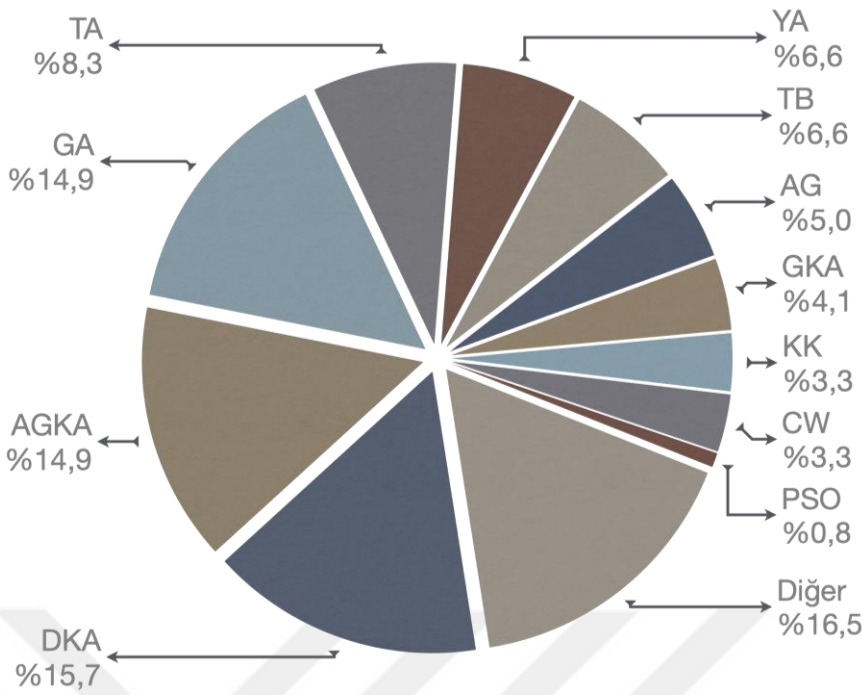
**KÇ:** Kesin Çözüm, **S:** Sezgisel/Meta-Sezgisel Çözüm, **DKA:** Değişken Komşuluk Arama, **GKA:** Genel Komşuluk Arama, **AGKA:** Adaptif Geniş Komşuluk Arama, **KK:** Karınca Kolonisi, **CW:** Clarke & Wright, **GA:** Genetik Algoritma, **YA:** Yerel Arama, **TB:** Tavlama Benzetimi, **TA:** Tabu Arama, **AG:** Aç Gözlü Arama, **PSO:** Parçacık Sürü Optimizasyonu.

Bu çalışmada, farklı kısıt ve varsayımların bulunduğu EARP modelleri için literatürde önerilen çözüm yöntemleri, matematiksel kesin çözüm yöntemleri (KÇ), sezgisel ve/veya meta-sezgisel çözüm yöntemleri (S) ve bu iki grubun birlikte ele alındığı (KÇ&S) olmak üzere üç grupta ele alınmıştır (Tablo 2.2). Şekil 2.2'de de gösterildiği gibi incelenen 95 çalışmanın 16'sında yalnızca KÇ yöntemleri önerilirken; 33 çalışmada yalnızca sezgisel/meta-sezgisel çözüm yöntemleri önetilmiştir. 46 çalışmada ise önerilen sezgisel/meta-sezgisel çözüm yöntemine ait sonuçlar geliştirilen matematiksel modelin çözümü ile karşılaştırılmıştır. KÇ yöntemleri arasında tam sayılı doğrusal programlama modelleri, dinamik programlama modelleri ve ağaç arama yöntemleri vb. bulunur. Tez kapsamında incelenen çalışmalar KÇ yöntemleri açısından alt gruplarda detaylı olarak sunulmamış; S çözüm yöntemleri açısından ise en sık kullanılan algoritmalar farklı sütunlar altında sınıflandırılmış, diğer S çözüm yöntemleri ise son sütunda belirtilmiştir.




**Şekil 2.2:** Çözüm yaklaşımına göre yayın dağılımı

İncelenen çalışmalarda çözüm yöntemi olarak önerilen sezgisel algoritmalara bakılacak olursa %15,7 ile en yaygın kullanılan DKA; daha sonra ise sırasıyla %14,9 ile AGKA ve GA, %8,3 ile TA, %6,6 ile YA ve TB, %5 ile AG, %4,1 ile GKA, %3,3 ile KK ve CW şeklinde ön plana çıkmaktadır. Çoğu çalışmada birden fazla sezgisel algoritma kullanılmıştır. Hangi çalışmada hangi çözüm yaklaşımlarının kullanıldığını net olarak görebilmek için Tablo 2.2'nin incelenmesi faydalı olacaktır. Ayrıca Şekil 2.3'teki kısaltmaların anlamı Kısaltmalar Listesi ve Tablo 2.2'nin altında verilmiştir.




**Şekil 2.3:** Sezgisel çözüm yöntemlerinin dağılımı

Tez kapsamında incelenen 95 çalışmanın 7'sinde (Bac ve Erdem 2021; Bruglieri ve diğ. 2017; Bruglieri ve diğ. 2015; Hof ve diğ. 2017b; Lu ve diğ. 2020; Wang ve Zhou 2021; Wang ve diğ. 2020) DKA tek başına kullanılırken, 10'unda (Akbay ve diğ. 2022; Farahani ve diğ. 2023; Ghobadi ve diğ. 2021; Li-Ying ve Yuan-Bin 2015; Lin ve diğ. 2021; Löffler ve diğ. 2020; Schneider ve diğ. 2014; Yilmaz ve Kalayci 2022; Zhang ve diğ. 2019; Zhou ve diğ. 2021) DKA ile farklı çözüm yöntemleri birlikte kullanılmıştır. İncelenen çalışmalardan 14'ünde (Erdem ve Koç 2022; Goeke ve Schneider 2015; Jie ve diğ. 2019b; Kancharla ve Ramadurai 2020; Keskin ve Catay 2016; Keskin ve Catay 2018; Keskin ve diğ. 2021; Keskin ve diğ. 2019; Koç ve diğ. 2019; Rastani ve Çatay 2021; Xu ve diğ. 2022; Zhang ve diğ. 2022; Zhang ve diğ. 2020; Zhao ve Lu 2019) AGKA algoritması tek başına kullanılırken, (Guo ve diğ. 2022; Yang ve Sun 2015) AGKA, CW, TB ve AG'den oluşan bir sezgisel önermişlerdir.

# 3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

## 3.1 Kullanılacak Veri Setlerinin Oluşturulması

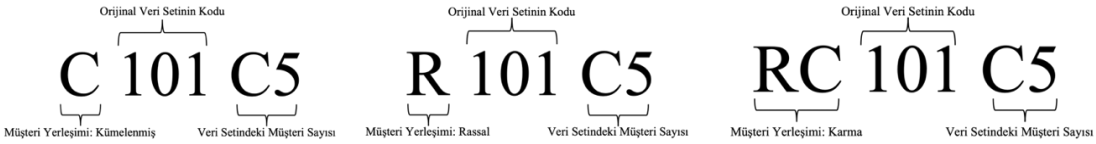
Matematiksel modellerin doğruluğunun test edilebilmesi, önerilen sezgisel çözüm yönteminin performans analizinin yapılabilmesi amacıyla 5, 10, 15 ve 100 müşteriden oluşan veri setleri literatürde yer alan diğer veri setlerinden faydalanılarak türetilmiştir.

Schneider ve diğ. (2014) Solomon (1987)'un zaman pencereli araç rotalama problemi için oluşturduğu veri setlerini temel alarak 5, 10, 15 ve 100 müşterilik veri setleri oluşturmuştur. Bu veri setleri 56 adet büyük (100 müşteri ve 21 şarj istasyonu içermektedir) ve 36 adet de küçük (5, 10 ve 15 müşteri içermektedir). Bu veri setleri dağıtım noktası olan müşterilerin konumlarına göre 3 grupta değerlendirilmiştir: kümelenmiş müşteri dağılımları (C), rastgele müşteri dağılımları (R) ve her iki kümenin karışımı olarak rastgele kümelenmiş müşteri dağılımları (RC). Müşteri konumu dağılımını temsil eden harften sonra gelen ve 1 veya 2 ile başlayan veri setleri zaman penceresi açısından kısa ve uzun planlama ufkuna sahiptir. R1, C1 ve RC1 veri setleri kısa planlama ufkuna sahipken, R2, C2 ve RC2 kodlu veri setleri ise uzun planlama ufkuna sahiptir. Kısa planlama ufkuna sahip veri setleri için diğer gruba oranla daha fazla EA kullanılmasını gerekli kılmaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen EARP-EZTD ve EARP-ZP-EZTD'de diğer iki problemden farklı olarak dağıtım talebine ek olarak toplama talebi de söz konusudur. Schneider ve diğ. (2014)'ün veri setlerinde ise yalnızca dağıtım talebi bulunmaktadır. Bu nedenle müşteri dağıtım ve toplama taleplerinin, tez kapsamında geliştirilen matematiksel modelin yapısına uygun olarak yeniden belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, orijinal veri setindeki müşteri talepleri Salhi ve Nagy (1999)'nin uyguladığı yöntemde olduğu gibi yeniden hesaplanmıştır. Bu yönteme göre, öncelikle her bir müşterinin koordinatları $(x_i, y_i)$ kullanılarak bir katsayı $k_i = \min(x_i/y_i, y_i/x_i)$ belirlenmiştir. Daha sonra bu belirlenen katsayı ve referans alınan veri setinin müşteri talebi $(q_i)$, her bir müşterinin dağıtım $(D_i)$ ve toplama $(P_i)$ taleplerinin hesaplanması

için kullanılmıştır. Sırasıyla dağıtım ve toplama talepleri için $D_i = k_i * q_i$ ve $P_i = (1 - k_i) * q_i$ eşitlikleri kullanılmıştır.

Sonuç olarak oluşturulan veri setlerini ifade eden kodlama Şekil 3.1'de açıklandığı gibidir.




**Şekil 3.1:** Veri seti isimlendirmede kullanılan kodlama

## 3.2 Matematiksel Modellerin Kurulması ve Doğruluğunun Test Edilmesi

Bu tez çalışmasında, zaman penceresi ve eş zamanlı toplama ve dağıtım kısıtlarını içeren gerçekçi bir model tasarlayabilmek için öncelikle temelde yer alan EARP matematiksel modeli geliştirilmiştir. Bu model ARP ve EARP'nin temel kısıtlarını içermektedir. Geliştirilen model, üçlü indis yapısı, bataryanın değişimi değil şarj edilmesi, bataryanın parçalı olarak şarj edilmesine izin verilmesi ve heterojen filo gibi ilerleyen çalışmalarda da kullanılabilecek farklı senaryolar için de çözüm üretebilmesi açısından literatürde sunulan diğer matematiksel modellerden ayrışmaktadır.

EARP için geliştirilen matematiksel modelin ardından, gerçekçi kısıtlar da dikkate alındığında dağıtım stratejisinde bulunması gereken önemli varsayım ve kısıtların dahil edilmesi ile iki farklı model daha geliştirilmiştir. Birinci model müşterilerin olası taleplerinin belirli zaman dilimleri içerisinde karşılanması gerektiği varsayımını içeren EARP-ZP, ikinci model ise özellikle tersine lojistikte karşımıza çıkan müşterilere ürün dağıtımı yapılırken aynı zamanda da aynı araçlarla müşterilerden ürün toplama işleminin de gerçekleştiği eş zamanlı topla-dağıt (EZTD) kısıtını içeren EARP-EZTD modelidir. Nihai model olarak sunulan EARP-ZP-EZTD matematiksel modeli zaman penceresi ve eş zamanlı topla-dağıt kısıtlarını içermektedir. Modellerin karşılaştırmaları içerdikleri kısıtlara bağlı olarak Tablo 3.1'de sunulmuştur. Modellerin oluşturulması sırasında yapılan varsayımlar

karşılaştırmalı olarak Tablo 3.2'de sunulmuştur. Modellerin kurulumunda kullanılan notasyonlar, kümeler, parametreler, karar değişkenleri ve formüller ise ilgili alt başlıklar altında sunulmuştur.

**Tablo 3.1:** Matematiksel modellerin kısıt karşılaştırması

| Kısıtlar | | TM | M1 | M2 | BM |
|---|---|---|---|---|---|
| **Şarj İstasyonu Varsayımı** | Şarj istasyonu | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| **Şarj Süresi** | Doğrusal | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| **Şarj Türü** | Tam | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| **Araç Rotalama Kısıtları** | Araç kapasitesi | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Zaman Penceresi | | ✓ | | ✓ |
| | Eş Zamanlı Topla-Dağıt | | | ✓ | ✓ |

**TM:** EARP, **M1:** EARP-ZP, **M2:** EARP-EZTD, **BM:** EARP-ZP-EZTD.

**Tablo 3.2:** Oluşturulan modellerde kullanılan varsayımlar ve karşılaştırması

| Varsayım | TM | M1 | M2 | BM |
|---|---|---|---|---|
| Model EARP için geliştirilmiştir. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Müşterilerin yalnızca dağıtım talebi bulunmaktadır. | ✓ | ✓ | | |
| Müşterilerin hem dağıtım hem toplama talebi bulunmaktadır. | | | ✓ | ✓ |
| Müşterilerin dağıtım taleplerinin tamamı karşılanmalıdır. | ✓ | ✓ | | |
| Müşterilerin toplama ve dağıtım taleplerinin tamamı karşılanmalıdır. | | | ✓ | ✓ |
| Şİ'yi ziyaret eden EA, Şİ'den tam şarjla ayrılır. Parçalı şarja izin verilmemektedir. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Amaç fonksiyonu EA'lar tarafından gidilen toplam mesafenin en küçüklenmesi şeklinde tasarlanmıştır. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Her müşteri yalnızca bir EA tarafından ziyaret edilebilir. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Araç filosunda yalnızca aynı özelliklere sahip özdeş EA'lar bulunmaktadır. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Tek bir depo bulunmaktadır. EA'lar depodan tura başlar ve turu depoda tamamlar. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Turun herhangi bir aşamasında araçtaki yük miktarı araç kapasitesini aşamaz. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Şİ'ler aynı EA tarafından birden fazla kez ziyaret edilebilir. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Şİ'lerde EA'ların sabit hızda şarj edildiği varsayılmıştır. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Her bir EA 1 birim mesafeyi 1 birim sürede kat etmektedir. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Müşteri taleplerinin bölünmediği varsayılmaktadır. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Müşteriler yalnızca belirli zaman aralıklarında EA'lar tarafından ziyaret edilebilir. | | ✓ | | ✓ |

**TM:** EARP, **M1:** EARP-ZP, **M2:** EARP-EZTD, **BM:** EARP-ZP-EZTD.

### 3.2.1 Elektrikli Araç Rotalama Problemi

EARP'nin çözümü için geliştirilen matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

#### Notasyonlar ve Kümeler

$n_d$ = depo sayısı

$n_r$ = şarj istasyonu sayısı

$n_c =$ müşteri sayısı

$n_k =$ mevcut elektrikli araç sayısı

$N_D =$ depo kümesi $\{1, \dots, n_d\}$

$N_R =$ şarj istasyonları kümesi $\{n_d + 1, \dots, n_d + n_r\}$

$N_C =$ müşteriler kümesi $\{n_d + n_r + 1, \dots, n_d + n_r + n_c\}$

$N_{RC} =$ şarj istasyonları ve müşteriler kümesi $\{n_d + 1, \dots, n_d + n_r + n_c\}$

$N =$ tüm düğümler kümesi $\{1, \dots, n_d + n_r + n_c\}$

$N_k =$ Depoda bulunan elektirikli araçlar kümesi $\{1, \dots, n_k\}$

**Parametreler**

$d_{ij} =$ $i$ ve j düğümleri arasındaki mesafe

$Q_k =$ elektrikli araçların her birinin kapasitesi

$BC_k =$ elektirikli araç batarya kapasitesi

$h_k = k$ elektrikli aracının enerji tüketim katsayısı (oranı)

$D_j =$ müşteri $j'$nin dağıtılan ürün için adet cinsinden talep miktarı $(\forall j \in N_C)$

**Karar Değişkenleri**

$$x_{kij} = \begin{cases} 1, & k \text{ aracı } i'\text{den } j'\text{ye giderse} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (\forall k \in N_k, \forall i, j \in N_D \cup N_R \cup N_c)$$

$U_{kij} = i'$den $j'$ye giderken $k'$ıncı araçtaki dağıtılacak ürün sayısı $(\forall i, j \in N, \forall k \in N_k)$

$BSCa_{ik} = k$ aracının $i$ düğümüne varıştaki şarj seviyesi $(\forall i \in N, \forall k \in N_k)$

$BSCd_{ik} = k$ aracının $i$ düğümünden ayrılıştaki şarj seviyesi $(\forall i \in N, \forall k \in N_k)$

**Model**

$$Enk\ Z = \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} * x_{kij} \tag{3.1}$$

$$\sum_{k\in N_k}\sum_{i\in N} x_{kij} = 1 \qquad \forall j \in N_C \qquad (3.2)$$

$$\sum_{i\in N} x_{kji} - \sum_{i\in N} x_{kij} = 0 \qquad \forall k \in N_k\,, \forall j \in N \qquad (3.3)$$

$$\sum_{j\in N'_{RC}} x_{kij} \leq 1 \qquad \forall k \in N_k\,, \forall i \in N_D \qquad (3.4)$$

$$\sum_{j\in N'_{RC}} x_{kji} \leq 1 \qquad \forall k \in N_k\,, \forall i \in N_D \qquad (3.5)$$

$$U_{kij} = 0 \qquad \forall i \in N_{RC}\,, \forall j \in N_D, \forall k \in N_k \qquad (3.6)$$

$$U_{kij} \leq Q_k * x_{kij} \qquad \forall i,j \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.8)$$

$$x_{kii} = 0 \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.9)$$

$$BSCa_{ik} \geq 0 \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.10)$$

$$BSCd_{ik} = BC_k \qquad \forall i \in N_D, \forall k \in N_k \qquad (3.11)$$

$$BSCa_{jk} \leq BSCa_{ik} - \left(h_k * d_{ij}\right) * x_{kij} + BC_k * (1 - x_{kij}) \qquad \forall i \in N_C\,, \forall j \in N, i \neq j, \forall k \in N_k \qquad (3.12)$$

$$BSCa_{jk} \leq BSCd_{ik} - \left(h_k * d_{ij}\right) * x_{kij} + BC_k * (1 - x_{kij}) \qquad \forall i,j \in N, i \neq j, \forall k \in N_k \qquad (3.13)$$

$$BSCa_{ik} \leq BSCd_{ik} \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.14)$$

$$BSCd_{ik} \leq BC_k \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.15)$$

$$BSCa_{ik} = BSCd_{ik} \qquad \forall i \in N_C, \forall k \in N_k \qquad (3.16)$$

$$BSCd_{ik} = BC_k \qquad \forall i \in N_R, \forall k \in N_k \qquad (3.17)$$

$$\sum_{i\in N} U_{kij} = \sum_{i\in N} U_{kji} \qquad \forall j \in N_R, \forall k \in N_k \qquad (3.18)$$

$$\sum_{k\in N_k}\sum_{i\in N} U_{kij} - \sum_{k\in N_k}\sum_{i\in N} U_{kji} = D_j \qquad \forall j \in N_{RC} \qquad (3.20)$$

$$d_{ij} \geq x_{kji} \qquad \forall i,j \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.22)$$

$$x_{kij} \in \{0,1\} \qquad \forall \mathrm{k} \in N_k, \forall \mathrm{i}, j \in N_D \cup N_R \cup N_C \qquad (3.23)$$

$$U_{kij}, BSCa_{ik}, BSCd_{ik} \geq 0 \qquad \forall \mathrm{i}, j \in N, \forall \mathrm{k} \in N_k \qquad (3.24)$$

Amaç fonksiyonu (3.1) depodan müşterilere taşıma yapan EA'ların kat ettiği toplam taşıma mesafesinin en küçüklemesini sağlamaktadır. Kısıt (3.2) her bir müşterinin tam olarak bir kere ziyaret edilmesini sağlarken kısıt (3.3) ise her bir müşteri ve Şİ'ye EA girişi kadar EA çıkışının da olmasını, depodan çıkan EA'ların depoya geri dönmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.4), kısıt (3.5) ve kısıt (3.22) depodaki EA'ların yalnızca ihtiyaç halinde kullanılmasına izin vermektedir. Kısıt (3.6)

müşteriden depoya dönen EA'larda dağıtılacak ürün kalmayacağını ifade etmektedir. Kısıt (3.8) EA'da bulunan toplam dağıtılacak yükün EA kapasitesini aşamayacağını ifade etmektedir. Kısıt (3.9) mevcut düğümden yine düğümün kendisine bir hareketin olmasını önleyerek bir elemanlı alt tur oluşumunu engellemektedir. Kısıt (3.10-3.17) batarya durumu kısıtlarıdır. Kısıt (3.18) Şİ'yi ziyaret eden bir EA'da bulunan dağıtılacak yük miktarının aynı kalacağını. Kısıt (3.20) müşterilerin dağıtım taleplerinin ilgili EA'larca karşılanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.23) ve (3.24) değişkenlerin doğasını tanımlamaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen EARP matematiksel modeli C101C5 veri seti üzerinde test edilmiştir. C101C5 veri seti karakteristikleri Tablo 3.3'te, düğüm bilgileri ise Tablo 3.4'te verilmiştir.

**Tablo 3.3:** EARP için C101C5 veri seti karakteristikleri

| **Parametre** | **Değer** |
|---|---|
| EA Sayısı ($n_k$) | 3 |
| Depo Sayısı ($n_d$) | 1 |
| Şarj İstasyonu Sayısı ($n_r$) | 3 |
| Müşteri Sayısı ($n_c$) | 5 |
| EA Yük Kapasitesi ($Q_k$) | 200 |
| EA Batarya Kapasitesi ($BC_k$) | 77,75 |
| EA Birim Mesafe Şarj Tüketimi ($h_k$) | 1 |

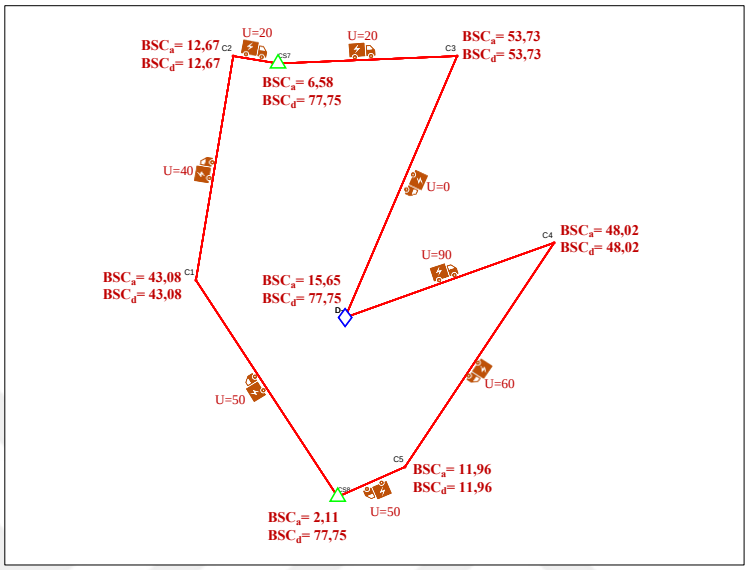
**Tablo 3.4:** EARP için C101C5 veri seti düğüm bilgileri

| **Düğüm** | **Tür** | **Koordinat (X)** | **Koordinat (Y)** | **Talep ($D_j$)** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Depo | 40 | 50 | 0 |
| 2 | Şİ | 40 | 50 | 0 |
| 3 | Şİ | 31 | 84 | 0 |
| 4 | Şİ | 39 | 26 | 0 |
| 5 | M | 20 | 55 | 10 |
| 6 | M | 25 | 85 | 20 |
| 7 | M | 55 | 85 | 20 |
| 8 | M | 68 | 60 | 30 |
| 9 | M | 48 | 30 | 10 |

**Şİ:** Şarj İstasyonu, **M:** Müşteri.

C101C5 veri seti CPLEX ile çözülmüş ve 2,47 saniyede optimum çözüme ulaşılmıştır. Amaç fonksiyonu olan toplam mesafe 280,90 olarak bulunmuştur. Çözüm sonucu elde edilen rota Şekil 3.2'de verilmiştir. Veri setinde 3 adet EA bulunmasına rağmen geliştirilen matematiksel model ile gereksiz EA kullanımı engellenerek 1 EA ile optimal sonuca ulaşılmıştır. EA'lar baklava dilimi şeklinde olan ve "D" ile ifade edilen depodan hareket ederek, C1-C5 ile gösterilen müşteriler arasında taşıma

yamakta ve depoya dönmektedir. Batarya kapasitesinin turu yeterli olmadığı durumlarda ise CS6, CS7 ve CS8 ile gösterilen Şİ'lere uğrayarak bataryanın şarj edilmesi sağlanmaktadır. EA'lar depoda da şarj edilmektedir, CS6 depo ile aynı konumda bulunmaktadır. Şİ'lerin dağıtım talebi bulunmamaktadır.




**BSCa:** Varış şarj seviyesi, **BSCd:** Ayrılış şarj seviyesi, **U:** Dağıtılacak yük miktarı.

**Şekil 3.2:** C101C5 veri setinin EARP kapsamında matematiksel model ile çözümü

Oluşturulan rota ve elde edilen sonuç, müşteri talepleri, EA şarj durumları, EA kapasitesi ve EA'da taşınan anlık yük miktarı göz önünde bulundurularak izlenmiş ve herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Geliştirilen matematiksel model doğrulanmıştır.

### 3.2.2 Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi

EARP-ZP için kabul edilen varsayımlar çerçevesinde, EARP için geliştirilen ve bir önceki bölümde sunulan matematiksel modele eklenen parametreler, karar değişkenleri, ek kısıtlar ve açıklamaları aşağıda sunulduğu gibidir.

#### Parametreler

$g_k = k$ elektirikli aracının şarj dolum katsayısı (oranı)

$s_i = i$ düğümü ziyaret edildiğinde verilmesi gereken hizmet süresi

$a_i = i$ müşterisinin ziyaret edilebileceği en erken zaman

$b_i = i$ müşterisinin ziyaret edilebileceği en geç zaman

**Karar Değişkenleri**

$w_{ki} = i$ düğümünün $k.$ araç tarafından ziyaret edildiği zaman $(\forall i \in N, \forall k \in N_k)$

**Model**

$$w_{ki} = 0 \qquad \forall i \in N_D, \forall k \in N_k \qquad (3.25)$$

$$w_{kj} \geq w_{ki} + d_{ij} + s_i - M * (1 - x_{kij}) \qquad \forall i, j \in N_{RC}, \forall k \in N_k \qquad (3.26)$$

$$w_{ki} \geq a_i \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.27)$$

$$w_{ki} \leq b_i \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.28)$$

$$w_{ki} + d_{ij} * x_{kij} + g_k * (BSCd_{ik} - BSCa_{ik}) - M * (1 - x_{kij}) \leq w_{kj} \qquad \forall i \in N_R, \forall j \in N, i \neq j, \forall k \in N_k \qquad (3.29)$$

Kısıt (3.25) depodan dağıtıma başlayan EA'lar için başlangıç zamanının sıfır olduğunu göstermektedir. Kısıt (3.26) her bir düğümün servis başlangıç zamanlarının düğümler arası mesafe ve her bir düğümün servis zamanlarını dikkate alarak hesaplanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.27) ve (3.28) her bir düğümün ziyaret edilebileceği en erken ve en geç zamanı sınırlandırmaktadır. Kısıt (3.29) EA'ların Şİ'ye geldiğinde bataryada bulunan enerjinin dikkate alınarak kalan miktar kadar şarj edilmesini sağlamaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen EARP-ZP matematiksel modeli C101C5 veri seti üzerinde test edilmiştir. C101C5 veri seti karakteristikleri Tablo 3.5'te, düğüm bilgileri ise Tablo 3.6'da verilmiştir.

**Tablo 3.5:** EARP-ZP için C101C5 veri seti karakteristikleri

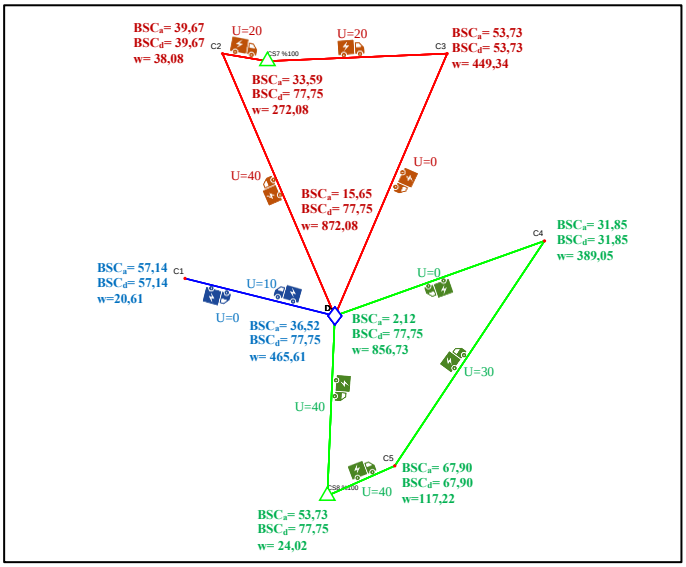
| Parametre | Değer |
|---|---|
| EA Sayısı $(n_k)$ | 3 |
| Depo Sayısı $(n_d)$ | 1 |
| Şarj İstasyonu Sayısı $(n_r)$ | 3 |
| Müşteri Sayısı $(n_c)$ | 5 |
| EA Yük Kapasitesi $(Q_k)$ | 200 |
| EA Batarya Kapasitesi $(BC_k)$ | 77,75 |
| EA Şarj Dolum Katsayısı $(g_k)$ | 3,47 |
| EA Birim Mesafe Şarj Tüketimi $(h_k)$ | 1 |

**Tablo 3.6:** EARP-ZP için C101C5 veri seti düğüm bilgileri

| Düğüm | Tür | Koordinat (X) | Koordinat (Y) | Talep ($D_j$) | En Erken Ziyaret Zamanı ($a_i$) | En Geç Ziyaret Saati ($b_i$) | Servis Süresi ($s_i$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Depo | 40 | 50 | 0 | 0 | 1236 | 0 |
| 2 | Şİ | 40 | 50 | 0 | 0 | 1236 | 0 |
| 3 | Şİ | 31 | 84 | 0 | 0 | 1236 | 0 |
| 4 | Şİ | 39 | 26 | 0 | 0 | 1236 | 0 |
| 5 | M | 20 | 55 | 10 | 355 | 407 | 90 |
| 6 | M | 25 | 85 | 20 | 176 | 228 | 90 |
| 7 | M | 55 | 85 | 20 | 744 | 798 | 90 |
| 8 | M | 68 | 60 | 30 | 737 | 809 | 90 |
| 9 | M | 48 | 30 | 10 | 263 | 325 | 90 |

**Şİ:** Şarj İstasyonu, **M:** Müşteri.

C101C5 veri seti CPLEX ile çözülmüş ve 0,07 saniyede optimum çözüme ulaşılmıştır. Amaç fonksiyonu olan toplam mesafe 247,15 olarak bulunmuştur. Çözüm sonucu elde edilen rota Şekil 3.3'te verilmiştir. 3 EA ile optimal sonuca ulaşılmıştır. EA'lar baklava dilimi şeklinde olan ve "D" ile ifade edilen depodan hareket ederek, C1-C5 ile gösterilen müşteriler arasında taşıma yamakta ve depoya dönmektedir. Batarya kapasitesinin turu yeterli olmadığı durumlarda ise CS6, CS7 ve CS8 ile gösterilen Şİ'lere uğrayarak bataryanın şarj edilmesi sağlanmaktadır. EA'lar depoda da şarj edilmektedir, CS6 depo ile aynı konumda bulunmaktadır. Şİ'lerin dağıtım talebi bulunmamaktadır.




**BSCa:** Varış şarj seviyesi, **BSCd:** Ayrılış şarj seviyesi, **U:** Dağıtılacak yük miktarı, **w:** Düğüme varış zamanı.

**Şekil 3.3:** C101C5 veri setinin EARP-ZP kapsamında matematiksel model ile çözümü

Oluşturulan rota ve elde edilen sonuç, müşteri talepleri, EA şarj durumları, EA kapasitesi ve EA'da taşınan anlık yük miktarı göz önünde bulundurularak izlenmiş ve herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Geliştirilen matematiksel model doğrulanmıştır.

### 3.2.3 Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi

EARP-EZTD için kabul edilen varsayımlar çerçevesinde, EARP için geliştirilen ve Bölüm 3.2.1'de sunulan matematiksel modele eklenen parametreler, karar değişkenleri, ek kısıtlar ve açıklamaları aşağıda sunulduğu gibidir.

**Parametreler**

$P_j =$ müşteri $j'$nin toplanan ürün için adet cinsinden talep miktarı $(\forall j \in N_C)$

**Karar Değişkenleri**

$V_{kij} = i'$den $j'$ye giderken $k'$inci araçtaki toplanan ürün sayısı $(\forall i, j \in N, \forall k \in N_k)$

**Model**

$$V_{kji} = 0 \qquad \forall i \in N_{RC}, \forall j \in N_D, \forall k \in N_k \qquad (3.7)$$

$$\sum_{i \in N} V_{kij} = \sum_{i \in N} V_{kji} \qquad \forall j \in N_R, \forall k \in N_k \qquad (3.19)$$

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} V_{kij} - \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} V_{kji} = P_j \qquad \forall j \in N_{RC} \qquad (3.21)$$

Kısıt (3.7) depolardan müşterilere doğru yola çıkan EA'larda toplanmış ürün olmadığını ifade etmektedir. Kısıt (3.19) Şİ'yi ziyaret eden bir EA'da bulunan toplanmış yük miktarının aynı kalacağını ifade etmektedir. Kısıt (3.21) müşterilerin toplama taleplerinin ilgili EA'larca karşılanmasını sağlamaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen EARP-EZTD matematiksel modeli C101C5 veri seti üzerinde test edilmiştir. C101C5 veri seti karakteristikleri Tablo 3.7'de düğüm bilgileri ise Tablo 3.8'de verilmiştir.

**Tablo 3.7:** EARP-EZTD için C101C5 veri seti karakteristikleri

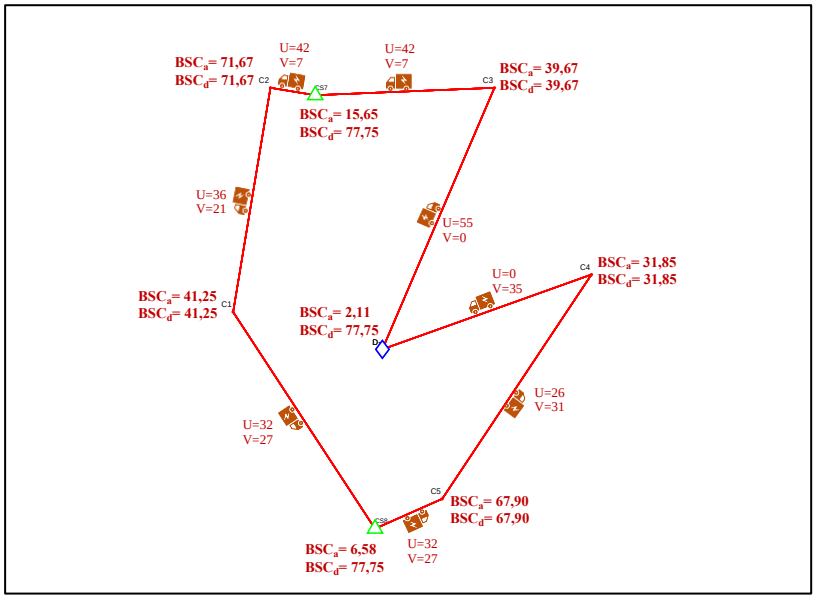
| Parametre | Değer |
|---|---|
| EA Sayısı $(n_k)$ | 3 |
| Depo Sayısı $(n_d)$ | 1 |
| Şarj İstasyonu Sayısı $(n_r)$ | 3 |
| Müşteri Sayısı $(n_c)$ | 5 |
| EA Yük Kapasitesi $(Q_k)$ | 200 |
| EA Batarya Kapasitesi $(BC_k)$ | 77,75 |
| EA Birim Mesafe Şarj Tüketimi $(h_k)$ | 1 |

**Tablo 3.8:** EARP-EZTD için C101C5 veri seti düğüm bilgileri

| Düğüm | Tür | Koordinat (X) | Koordinat (Y) | Dağıtım Talebi $(D_j)$ | Toplama Talebi $(P_j)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Depo | 40 | 50 | 0 | 0 |
| 2 | Şİ | 40 | 50 | 0 | 0 |
| 3 | Şİ | 31 | 84 | 0 | 0 |
| 4 | Şİ | 39 | 26 | 0 | 0 |
| 5 | M | 20 | 55 | 4 | 6 |
| 6 | M | 25 | 85 | 6 | 14 |
| 7 | M | 55 | 85 | 13 | 7 |
| 8 | M | 68 | 60 | 26 | 4 |
| 9 | M | 48 | 30 | 6 | 4 |

**Şİ:** Şarj İstasyonu, **M:** Müşteri.

C101C5 veri seti CPLEX ile çözülmüş ve 1,35 saniyede optimum çözüme ulaşılmıştır. Amaç fonksiyonu olan toplam mesafe 208,90 olarak bulunmuştur. Çözüm sonucu elde edilen rota Şekil 3.4'te verilmiştir. Veri setinde 3 adet EA bulunmasına rağmen geliştirilen matematiksel model ile gereksiz EA kullanımı engellenerek 1 EA ile optimal sonuca ulaşılmıştır. EA'lar baklava dilimi şeklinde olan ve "D" ile ifade edilen depodan hareket ederek, C1-C5 ile gösterilen müşteriler arasında taşıma yamakta ve depoya dönmektedir. Batarya kapasitesinin turu yeterli olmadığı durumlarda ise CS6, CS7 ve CS8 ile gösterilen Şİ'lere uğrayarak bataryanın şarj edilmesi sağlanmaktadır. EA'lar depoda da şarj edilmektedir, CS6 depo ile aynı konumda bulunmaktadır. Şİ'lerin dağıtım ve toplama talebi bulunmamaktadır.




**BSCa:** Varış şarj seviyesi, **BSCd:** Ayrılış şarj seviyesi, **U:** Dağıtılacak yük miktarı, **V:** Toplanmış yük miktarı.

**Şekil 3.4:** C101C5 veri setinin EARP-EZTD kapsamında matematiksel model ile çözümü

Oluşturulan rota ve elde edilen sonuç, müşteri dağıtım ve toplama talepleri, EA şarj durumları, EA kapasitesi ve EA'da taşınan anlık yük miktarı göz önünde

bulundurularak izlenmiş ve herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Geliştirilen matematiksel model doğrulanmıştır.

### 3.2.4 Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi

EARP için geliştirilen matematiksel modele, zaman penceresi ve eş zamanlı toplama ve dağıtım kısıtlarının eklenmesiyle elde edilen EARP-ZP-EZTD'nin çözümü için önerilen matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

**Model**

$$Enk\ Z = \sum_{k\in N_k}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} d_{ij} * x_{kij} \tag{3.1}$$

$$\sum_{k\in N_k}\sum_{i\in N} x_{kij} = 1 \qquad \forall j \in N_C \tag{3.2}$$

$$\sum_{i\in N} x_{kji} - \sum_{i\in N} x_{kij} = 0 \qquad \forall k \in N_k\ , \forall j \in N \tag{3.3}$$

$$\sum_{j\in N'_{RC}} x_{kij} \leq 1 \qquad \forall k \in N_k\ , \forall i \in N_D \tag{3.4}$$

$$\sum_{j\in N'_{RC}} x_{kji} \leq 1 \qquad \forall k \in N_k\ , \forall i \in N_D \tag{3.5}$$

$$U_{kij} = 0 \qquad \forall i \in N_{RC}\ , \forall j \in N_D, \forall k \in N_k \tag{3.6}$$

$$V_{kji} = 0 \qquad \forall i \in N_{RC}\ , \forall j \in N_D, \forall k \in N_k \tag{3.7}$$

$$U_{kij} \leq Q_k * x_{kij} \qquad \forall i,j \in N, \forall k \in N_k \tag{3.8}$$

$$x_{kii} = 0 \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \tag{3.9}$$

$$BSCa_{ik} \geq 0 \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \tag{3.10}$$

$$BSCd_{ik} = BC_k \qquad \forall i \in N_D, \forall k \in N_k \tag{3.11}$$

$$BSCa_{jk} \leq BSCa_{ik} - \left(h_k * d_{ij}\right) * x_{kij} + BC_k * (1 - x_{kij}) \qquad \forall i \in N_C\ , \forall j \in N, i \neq j, \forall k \in N_k \tag{3.12}$$

$$BSCa_{jk} \leq BSCd_{ik} - \left(h_k * d_{ij}\right) * x_{kij} + BC_k * (1 - x_{kij}) \qquad \forall i,j \in N, i \neq j, \forall k \in N_k \tag{3.13}$$

$$BSCa_{ik} \leq BSCd_{ik} \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \tag{3.14}$$

$$BSCd_{ik} \leq BC_k \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \tag{3.15}$$

$$BSCa_{ik} = BSCd_{ik} \qquad \forall i \in N_C, \forall k \in N_k \tag{3.16}$$

$$BSCd_{ik} = BC_k \qquad \forall i \in N_R, \forall k \in N_k \qquad (3.17)$$

$$\sum_{i \in N} U_{kij} = \sum_{i \in N} U_{kji} \qquad \forall j \in N_R, \forall k \in N_k \qquad (3.18)$$

$$\sum_{i \in N} V_{kij} = \sum_{i \in N} V_{kji} \qquad \forall j \in N_R, \forall k \in N_k \qquad (3.19)$$

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} U_{kij} - \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} U_{kji} = D_j \qquad \forall j \in N_{RC} \qquad (3.20)$$

$$\sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} V_{kij} - \sum_{k \in N_k} \sum_{i \in N} V_{kji} = P_j \qquad \forall j \in N_{RC} \qquad (3.21)$$

$$d_{ij} \geq x_{kji} \qquad \forall i, j \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.22)$$

$$x_{kij} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.23)$$

$$U_{kij}, BSCa_{ik}, BSCd_{ik}, w_{ki} \geq 0 \qquad \forall i, j \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.24)$$

$$w_{ki} = 0 \qquad \forall i \in N_D, \forall k \in N_k \qquad (3.25)$$

$$w_{kj} \geq w_{ki} + d_{ij} + s_i - M * (1 - x_{kij}) \qquad \forall i, j \in N_{RC}, \forall k \in N_k \qquad (3.26)$$

$$w_{ki} \geq a_i \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.27)$$

$$w_{ki} \leq b_i \qquad \forall i \in N, \forall k \in N_k \qquad (3.28)$$

$$w_{ki} + d_{ij} * x_{kij} + g_k * (BSCd_{ik} - BSCa_{ik}) - M * (1 - x_{kij}) \leq w_{kj} \qquad \forall i \in N_R, \forall j \in N, i \neq j, \forall k \in N_k \qquad (3.29)$$

Amaç fonksiyonu (3.1) depodan müşterilere taşıma yapan EA'ların kat ettiği toplam taşıma mesafesinin en küçüklemesini sağlamaktadır. Kısıt (3.2) her bir müşterinin tam olarak bir kere ziyaret edilmesini sağlarken kısıt (3.3) ise her bir müşteri ve Şİ'ye EA girişi kadar EA çıkışının da olmasını, depodan çıkan EA'ların depoya geri dönmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.4), kısıt (3.5) ve kısıt (3.22) depodaki EA'ların yalnızca ihtiyaç halinde kullanılmasına izin vermektedir. Kısıt (3.6) müşteriden depoya dönen EA'larda dağıtılacak ürün kalmayacağını ifade etmektedir. Kısıt (3.7) depolardan müşterilere doğru yola çıkan EA'larda toplanmış ürün olmadığını ifade etmektedir. Kısıt (3.8) EA'da bulunan toplam dağıtılacak yükün EA kapasitesini aşamayacağını ifade etmektedir. Kısıt (3.9) mevcut düğümden yine düğümün kendisine bir hareketin olmasını önleyerek bir elemanlı alt tur oluşumunu engellemektedir. Kısıt (3.10-3.17) batarya durumu kısıtlarıdır. Kısıt (3.18) Şİ'yi ziyaret eden bir EA'da bulunan dağıtılacak yük miktarının aynı kalacağını, kısıt (3.19) ise toplanmış yük miktarının aynı kalacağını ifade etmektedir. Kısıt (3.20) müşterilerin dağıtım taleplerinin, kısıt (3.21) ise toplama taleplerinin ilgili EA'larca karşılanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.23) ve (3.24) değişkenlerin doğasını tanımlamaktadır. Kısıt

(3.25) depodan dağıtıma başlayan EA'lar için başlangıç zamanının sıfır olduğunu göstermektedir. Kısıt (3.26) her bir düğümün servis başlangıç zamanlarının düğümler arası mesafe ve her bir düğümün servis zamanlarını dikkate alarak hesaplanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.27) ve (3.28) her bir düğümün ziyaret edilebileceği en erken ve en geç zamanı sınırlandırmaktadır. Kısıt (3.29) EA'ların sadece ihtiyacı kadar, parçalı olarak da şarj edilebilmesini sağlamaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen EARP-ZP-EZTD matematiksel modeli C101C5 veri seti üzerinde test edilmiştir. C101C5 veri seti karakteristikleri Tablo 3.9'da düğüm bilgileri ise Tablo 3.10'da verilmiştir.

**Tablo 3.9:** EARP-ZP-EZTD için C101C5 veri seti karakteristikleri

| **Parametre** | **Değer** |
|---|---|
| EA Sayısı ($n_k$) | 3 |
| Depo Sayısı ($n_d$) | 1 |
| Şarj İstasyonu Sayısı ($n_r$) | 3 |
| Müşteri Sayısı ($n_c$) | 5 |
| EA Yük Kapasitesi ($Q_k$) | 200 |
| EA Batarya Kapasitesi ($BC_k$) | 77,75 |
| EA Şarj Dolum Katsayısı ($g_k$) | 3,47 |
| EA Birim Mesafe Şarj Tüketimi ($h_k$) | 1 |

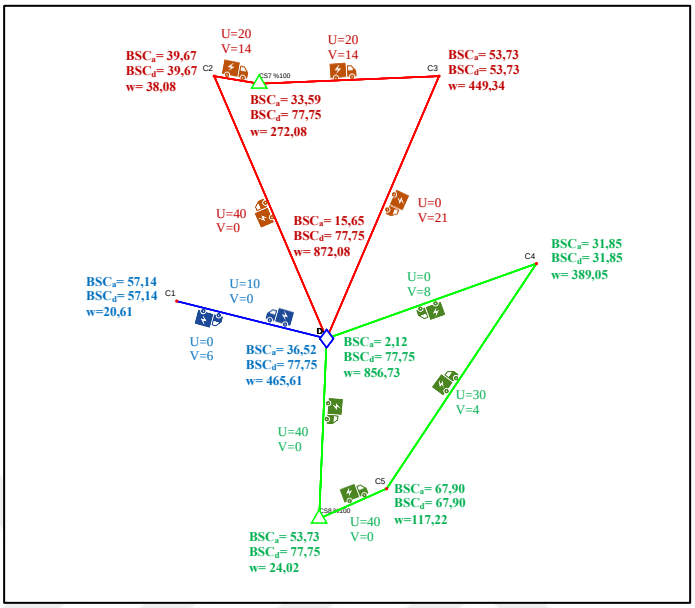
**Tablo 3.10:** EARP-ZP-EZTD için C101C5 veri seti düğüm bilgileri

| **Düğüm** | **Tür** | **Koordinat (X)** | **Koordinat (Y)** | **Dağıtım Talebi ($D_j$)** | **Toplama Talebi ($P_j$)** | **En Erken Ziyaret Zamanı ($a_i$)** | **En Geç Ziyaret Saati ($b_i$)** | **Servis Süresi ($s_i$)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Depo | 40 | 50 | 0 | 0 | 0 | 1236 | 0 |
| 2 | Şİ | 40 | 50 | 0 | 0 | 0 | 1236 | 0 |
| 3 | Şİ | 31 | 84 | 0 | 0 | 0 | 1236 | 0 |
| 4 | Şİ | 39 | 26 | 0 | 0 | 0 | 1236 | 0 |
| 5 | M | 20 | 55 | 4 | 6 | 355 | 407 | 90 |
| 6 | M | 25 | 85 | 6 | 14 | 176 | 228 | 90 |
| 7 | M | 55 | 85 | 13 | 7 | 744 | 798 | 90 |
| 8 | M | 68 | 60 | 26 | 4 | 737 | 809 | 90 |
| 9 | M | 48 | 30 | 6 | 4 | 263 | 325 | 90 |

**Şİ:** Şarj İstasyonu, **M:** Müşteri.

C101C5 veri seti CPLEX ile çözülmüş ve 0,07 saniyede optimum çözüme ulaşılmıştır. Amaç fonksiyonu olan toplam mesafe 247,15 olarak bulunmuştur. Çözüm sonucu elde edilen rota Şekil 3.5'te verilmiştir. 3 EA ile optimal sonuca ulaşılmıştır. EA'lar baklava dilimi şeklinde olan ve "D" ile ifade edilen depodan hareket ederek, C1-C5 ile gösterilen müşteriler arasında taşıma yamakta ve depoya dönmektedir. Batarya kapasitesinin turu yeterli olmadığı durumlarda ise CS6, CS7 ve CS8 ile

gösterilen şarj istasyonlarına uğrayarak bataryanın şarj edilmesi sağlanmaktadır. EA'lar depoda da şarj edilmektedir, CS6 depo ile aynı konumda bulunmaktadır. Şİ'lerin dağıtım talebi bulunmamaktadır.




**BSCa:** Varış şarj seviyesi, **BSCd:** Ayrılış şarj seviyesi, **U:** Dağıtılacak yük miktarı, **V:** Toplanmış yük miktarı, **w:** Düğüme varış zamanı.

**Şekil 3.5:** C101C5 veri setinin EARP-ZP-EZTD kapsamında matematiksel model ile çözümü

Oluşturulan rota ve elde edilen sonuç, müşteri talepleri, EA şarj durumları, EA kapasitesi ve EA'da taşınan anlık yük miktarı göz önünde bulundurularak izlenmiş ve herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Geliştirilen matematiksel model doğrulanmıştır.

# 4. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

EARP birçok pratik uygulamada karşılaşılan önemli bir optimizasyon problemdir. EARP, bir EA'nın bir dizi müşteriyi belirli bir zamanda ziyaret ederek, başlangıç noktasına geri dönmesini gerektiren bir rota oluşturma problemini ifade eder. Bu problem, NP-hard bir problem olarak sınıflandırılmıştır ve literatürde birçok çözüm yöntemi önerilmiştir. Bu tez çalışmasında, DKA algoritması ve türevleri kullanılarak EARP'nin çözümü için bir yöntem önerilmiştir. Bununla birlikte, DKA için etkili bir başlangıç çözümü çözüm süresinin kısaltılması açısından önemlidir. Literatür taraması sonucu Clarke & Wright tasarruf sezgiselinin (Clarke ve Wright 1964) EARP'nin başlangıç çözümünde etkili olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, CW ile DKA algoritması birleştirilerek, EARP'nin çözümünde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu bölümde, başlangıç çözümü oluşturma yönteminin, DKA ve türevlerinin, komşuluk yapıları ve operatörlerin detaylı açıklaması yapılmaktadır.

## 4.1 Başlangıç Çözümünün Tasarlanması

ARP'nin çözümünde kullanılan metasezgisel algoritmaların performansı, iyi bir başlangıç çözümüne sahip olmalarına bağlıdır. Bu nedenle, daha gelişmiş başlangıç çözüm algoritmalarının kullanımı büyük önem taşımaktadır. Literatürde, birçok sezgisel yöntem başlangıç çözümü elde etmek için önerilmiştir. Örneğin, Schneider ve diğ. (2015) ile Polat ve diğ. (2015) tarafından geliştirilen DKA algoritması, CW'yi kullanarak etkin bir şekilde başlangıç çözümü elde etmektedir. Hof ve diğ. (2017b) ise, tasarruf sezgiselini kullanarak BDİ'lerin en uygun şekilde konumlandırılması için genişletilmiş bir algoritma önermiştir. Algoritmanın genişletilmesinde, açgözlü yerel arama sezgiseli kullanılarak, 2-opt (Lin 1965) ve Or-opt (Or 1976) gibi operatörler de kullanılmıştır.

Polat ve diğ. (2015), DKA algoritmasında etkin ve hızlı bir şekilde başlangıç çözümü elde etmek için CW'den yararlanmışlardır. Sezgiselin, rota zaman kısıtı ve araç kapasitesini anlık olarak dikkate alması problemi zaman limitli eş zamanlı topla-dağıt kısıtını ortadan kaldırmakta ve problemi zaman limitli ARP'ye indirgemektedir.

Belgin ve diğ. (2018) tarafından önerilen DKA algoritmasında ise, her iki aşamadaki rotaların elde edilmesinde en yakın komşuluk algoritmasından yararlanılmıştır.

Bu tez kapsamında geliştirilen metasezgisel çözüm yaklaşımında, her bir model varsayımını dikkate alan CW temelli sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. CW, ARP için geliştirilen en eski yöntemlerden biri olmakla birlikte, ticari rotalama paket programlarında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Altınel ve Öncan 2005). Literatürde, metasezgisel yöntemlerin klasik sezgisellere göre daha üstün performans gösterdiği bilinmekle birlikte, CW'nin ARP için uygulama kolaylığı ve iyi bir başlangıç çözümü sağlaması, algoritmanın popülerliğini artırmaktadır (Cordeau ve diğ. 2002; Laporte ve Semet 2002). DKA algoritmasının uygun ve kaliteli bir çözümden başlaması toplam çözüm süresinin kısaltılması için önemli bir faktördür. Bu nedenle bu tezde başlangıç çözümünün oluşturulması için CW kullanılmıştır.

CW'de öncelikle bir tasarruf matrisi oluşturur. Bu matris, müşteriler arasındaki potansiyel tasarrufu ölçer. Tasarruf maliyeti hesaplama, CW'nin ilk adımıdır. Öncelikle, depodan başlayan ve bir müşteriyi ziyaret ettikten sonra depoya dönüş yapan gidiş-dönüş turlar oluşturulmaktadır. Oluşturulan gidiş-dönüş turlarda eğer EA şarj kapasitesi yetersiz olursa, en düşük ekleme maliyetine sahip Şİ rotaya eklenir. Şİ eklenmesine rağmen uyumsuzluk giderilemezse ilgili gidiş-dönüş tur iptal edilir. Tüm turlar oluşturulduktan sonra, elde edilen gidiş-dönüş turlarda bulunan müşteriler dikkate alınarak her bir müşteri çiftini ve bu müşteri çiftine ait tasarruf değerlerini içeren tasarruf listesi oluşturulur. Tasarruf değerlerinin hesaplanmasında ise 4.1 numaralı formülasyon kullanılmıştır.

$$s_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij} \tag{4.1}$$

Burada $d_{i0}$, $d_{0j}$ ve $d_{ij}$ sırasıyla $i$. müşteri ile depo, $j$. müşteri ile depo ve $i$ ve $j$ müşterileri arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

Rota oluşturma adımında ise gidiş-dönüş turlar tasarruf değerine göre büyükten küçüğe sıralanır. Sonrasında, en büyük tasarruf değerine sahip müşteri çiftinden başlayarak o müşterileri içeren turlar birleştirilir. Birleştirmeden sonra elde edilen yeni tur eğer EA kapasitesini ihlal ediyorsa, birleştirme işlemi iptal edilir, ilgili müşteri çifti tasarruf listesinden çıkartılır ve bir sonraki tasarruf değeri en yüksek müşteri çifti ile

birleştirme işlemine devam edilir. Tur birleşiminden sonra şarj kapasitesi kısıtı ihlal ediliyorsa, en düşük ekleme maliyetine sahip Şİ tura eklenir. Şİ eklendikten sonra da uygunluk sağlanamıyorsa ikinci bir Şİ eklemesi yapılmaz ve birleştirme işlemi iptal edilerek tasarruf listesinden ilgili müşteri çifti çıkartılır. İşleme bir sonraki en yüksek tasarruf değerine sahip müşteri çiftiyle devam edilir. Bu durum tasarruf listesinde müşteri çifti kalmayana kadar tekrarlanır. Her birleştirme işleminden sonra ise tasarruf listesi güncellenir.

**Algoritma 1:** EARP ve EARP-EZTD için C&W Tasarruf Sezgiseli Temelli Başlangıç Çözüm Algoritması

```
1  Başla
2  while Rotaya eklenmemiş müşteri mevcut do
3  |   Gidiş-dönüş turları oluştur (depo-müşteri-depo);
4  |   if EA'nın şarj seviyesi turu tamamlamak için yetersiz then
5  |   |   Tura en düşük maliyetle Şİ ekle;
6  |   |   if EA'nın şarj seviyesi turu tamamlamak için yetersiz then
7  |   |   |   Gidiş-dönüş turundaki müşteriyi Ziyaret Edilmemiş Müşteriler Listesine ekle;
8  |   |   else
9  |   |   |   Mevcut gidiş-dönüş turunu Tur Listesine ekle;
10 |   |   end if
11 |   else
12 |   |   Mevcut gidiş-dönüş turunu Tur Listesine ekle;
13 |   end if
14 end while
15 Tasarruf değerlerini hesaplayarak Tasarruf Listesini oluştur;
16 Tasarruf Listesini tasarruf değerleri azalan sırada sırala;
17 while Tasarruf Listesi boş değil do
18 |   Tasarruf Listesinin en başındaki iki gidiş-dönüş turu birleştir ve bir aday rota oluştur;
19 |   if Müşterilerden biri veya ikisi herhangi bir rotaya atanmış then
20 |   |   Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
21 |   |   Oluşturulan aday rotayı sil;
22 |   else
23 |   |   Aday rotanın EA yük kapasitesi uygunluğunu kontrol et;
24 |   |   if EA yük kapasitesi uygun değil then
25 |   |   |   Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
26 |   |   |   Oluşturulan aday rotayı sil;
27 |   |   else
28 |   |   |   Aday rotanın EA batarya uygunluğunu kontrol et;
29 |   |   |   if EA batarya kapasitesi uygun değil then
30 |   |   |   |   Aday rotaya en düşük maliyetle Şİ ekle;
31 |   |   |   |   Aday rotanın EA batarya uygunluğunu kontrol et;
32 |   |   |   |   if EA batarya kapasitesi uygun değil then
33 |   |   |   |   |   Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
34 |   |   |   |   |   Oluşturulan aday rotayı sil;
35 |   |   |   |   else
36 |   |   |   |   |   Aday rotayı nihai rota olarak belirle;
37 |   |   |   |   |   Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
38 |   |   |   |   end if
39 |   |   |   else
40 |   |   |   |   Aday rotayı nihai rota olarak belirle;
41 |   |   |   |   Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
42 |   |   |   end if
43 |   |   end if
44 |   end if
45 end while
46 if Ziyaret Edilmemiş Müşteriler Listesinde müşteri mevcut then
47 |   Listedeki müşterileri Aç Gözlü Ekleme Operatörü ile mevcut rotalara ekle;
48 end if
49 Bitir
```

**Algoritma 2:** EARP-ZP ve EARP-ZP-EZTD için C&W Tasarruf Sezgiseli Temelli Başlangıç Çözüm Algoritması

```
Başla
while Rotaya eklenmemiş müşteri mevcut do
    Gidiş-dönüş turları oluştur (depo-müşteri-depo);
    if EA'nın şarj seviyesi turu tamamlamak için yetersiz then
        Tura en düşük maliyetle Şİ ekle;
        if EA'nın şarj seviyesi turu tamamlamak için yetersiz then
            Gidiş-dönüş turundaki müşteriyi Ziyaret Edilmemiş Müşteriler Listesine ekle;
        else
            Mevcut gidiş-dönüş turunu Tur Listesine ekle;
        end if
    else
        Mevcut gidiş-dönüş turunu Tur Listesine ekle;
    end if
end while
Tasarruf değerlerini hesaplayarak Tasarruf Listesini oluştur;
Tasarruf Listesini tasarruf değerleri azalan sırada sırala;
while Tasarruf Listesi boş değil do
    Tasarruf Listesinin en başındaki iki gidiş-dönüş turu birleştir ve bir aday rota oluştur;
    if Müşterilerden biri veya ikisi herhangi bir rotaya atanmış then
        Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
        Oluşturulan aday rotayı sil;
    else
        Aday rotanın EA yük kapasitesi uygunluğunu kontrol et;
        if EA yük kapasitesi uygun değil then
            Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
            Oluşturulan aday rotayı sil;
        else
            Aday rotanın EA batarya uygunluğunu kontrol et;
            if EA batarya kapasitesi uygun değil then
                Aday rotaya en düşük maliyetle Şİ ekle;
                Aday rotanın EA batarya uygunluğunu kontrol et;
                if EA batarya kapasitesi uygun değil then
                    Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
                    Oluşturulan aday rotayı sil;
                else
                    Aday rotanın zaman penceresi uygunluğunu kontrol et;
                    if Zaman penceresi kısıtı açısından uygun değil then
                        Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
                        Oluşturulan aday rotayı sil;
                    else
                        Aday rotayı nihai rota olarak belirle;
                        Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
                    end if
                end if
            else
                Aday rotanın zaman penceresi uygunluğunu kontrol et;
                if Zaman penceresi kısıtı açısından uygun değil then
                    Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
                    Oluşturulan aday rotayı sil;
                else
                    Aday rotayı nihai rota olarak belirle;
                    Seçilen iki gidiş-dönüş turu Tasarruf Listesinden sil;
                end if
            end if
        end if
    end if
end while
if Ziyaret Edilmemiş Müşteriler Listesinde müşteri mevcut then
    Listedeki müşterileri Aç Gözlü Ekleme Operatörü ile mevcut rotalara ekle;
end if
Bitir
```

## 4.2 Değişken Komşuluk Arama Algoritması

DKA algoritması, eniyileme problemlerinin çözümünde kullanılan ve meta-sezgisel bir yaklaşımdır. DKA, problemi birden fazla çözüm yöntemiyle çözmeye çalışır ve daha sonra bu yöntemler arasında geçiş yaparak çözümü eniyilemeye çalışır. DKA, ilk olarak Mladenovic ve Hansen tarafından 1997 yılında önerilmiştir. Bu yöntem, çeşitli optimizasyon problemlerinde başarıyla uygulanmıştır, özellikle de kısıtlı kaynakların olduğu problem alanlarında.

DKA algoritması, birincil arama alanı olarak tanımlanan bir çözüm uzayını kullanır. Bu çözüm uzayı, farklı birincil arama stratejilerine dayanarak farklı şekillerde tanımlanabilir. Örneğin, birincil arama uzayı, tüm olası rota kombinasyonları gibi bir veri kümesini temsil edebilir.

DKA algoritması, arama alanının genişliğini azaltmak için değişken komşuluk yöntemleri kullanır. Bu yöntemler, mevcut bir çözüme benzer diğer çözümleri aramak için kullanılır. Daha spesifik olarak, her bir çözüm için farklı bir komşuluk yapısı tanımlanır ve bu komşuluk yapısı, bir sonraki arama adımında kullanılır.

Bu yaklaşım, problem çözümü için çok sayıda çözüm yöntemi kullanarak başarılı sonuçlar elde etmeye izin verir. Bunlar arasında yerel arama (YA), tavlama benzetimi (TB), genetik algoritmalar (GA'lar), tabu arama (TA) ve benzeri yöntemler yer alır.

DKA algoritması genellikle iki temel adımdan oluşur: sarsma (shaking) ve yerel arama (local search). Sarsma adımında, mevcut çözümün rastgele değiştirilmiş versiyonu oluşturulur. Bu, önceden tanımlanmış bir "sarsma faktörü" ile mevcut çözümden sapmalar içeren yeni bir çözüm oluşturulması anlamına gelir. Bu yeni çözümler, mevcut çözümden daha kötü olabilirler, ancak daha iyi çözümler için bir potansiyel oluştururlar.

Yerel arama adımında, mevcut çözümün etrafında bir bölge belirlenir ve bu bölgedeki çözümler incelenir. Bu bölge, önceden tanımlanmış bir "komşuluk yapısı" kullanılarak belirlenir. Bu komşuluk yapısı, mevcut çözümde bir veya birkaç

değişiklik yaparak elde edilen çözümleri ifade eder. Örneğin, iki müşterinin rotaları değiştirilebilir veya bir müşterinin rotası tamamen çıkarılabilir.

Bu adımların tekrarlanması, mevcut en iyi çözüme ulaşıncaya kadar devam eder. Bu yaklaşım, daha önce belirtilen komşuluk yapılarına dayanır ve farklı problem türleri için özelleştirilmiş birçok komşuluk yapısı vardır. Bu yapılar, problemin doğasına bağlı olarak, çözüm arama sürecinin hızını ve etkinliğini artırmaya yardımcı olabilir.

Komşuluk yapılarını keşfetmek ve yerel arama yapmak için kendine has özelliklere sahip olan DKA türleri veya varyasyonları vardır. En yaygın DKA türlerinden bazıları Temel DKA, Değişken Komşuluk İnişi (DKİ), İndirgenmiş DKA, Genel DKA, Eğik DKA, Değişken Komşuluk Ayrıştırma Arama, Kümelenmiş DKA, Rassal DKA olarak sıralanabilir.

### 4.2.1 Temel Değişken Komşuluk Arama

Temel Değişken Komşuluk Araması (T-DKA), DKA'nın en basit şeklidir. Bir dizi komşuluk yapısı tanımlamayı, mevcut çözümü sarsmayı, yerel arama gerçekleştirmeyi ve yerel aramanın sonucuna göre çözümü güncellemeyi içerir. Bu tez çalışmasında kullanılan DKA türlerinden biri olan T-DKA'da sıralı komşuluk değiştirme adımı kullanılmıştır. T-DKA algoritmasının sözde kodları (pseudocodes) Algoritma 3'te sunulmuştur.

### 4.2.2 Değişken Komşuluk İnişi

DKİ bir optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan yerel arama tabanlı bir metasezgisel algoritmadır. Bu algoritma, başlangıçta belirlenen bir çözümden başlayarak, çözümü yavaş yavaş iyileştirerek en iyi çözüme ulaşmayı amaçlar. DKA ve DKİ her ikisi de yerel arama tabanlı metasezgisel algoritmalar olmakla birlikte, birkaç önemli farklılığa sahiptirler. DKA, öncelikle iki farklı aşamadan oluşur: birinci aşama çözümün rastgele bir başlangıç noktasından başlayarak birkaç farklı komşuluk yapısı kullanılarak aranması, ikincisi eğer bu arama belli bir zaman veya adım sınırına

ulaşırsa, çözümün farklı bir başlangıç noktasından yeniden başlatılması ve ilk adımdan tekrarlaması. Bu süreç, çözümün arama alanında daha geniş bir alanı keşfetmesine ve daha iyi çözümler bulmasına yardımcı olur.

**Algoritma 3:** Temel DKA Algoritması (Sıralı)

**Fonksiyon** Temel DKA $(x, k_{max}, l_{max}, M, N)$
**Komşuluk Değiştirme Adımı:** Sıralı
$f_{best} \leftarrow x$ *Başlangıç Çözümü*
**Başla**
**while** *Durdurma koşulu sağlanmadı* **do**
    $k \leftarrow 1; l \leftarrow 1;$
    **while** $k \leq k_{max}$ **do**
        $x' \leftarrow$ **Sarsma** $(x, k, N)$;
        **if** $f_{(x')} < f_{best}$ **then**
            $x \leftarrow x';$
            $f_{best} = f_{(x')};$
            $k \leftarrow 1;$
        **else**
            $k = k + 1;$
            **while** $l \leq l_{max}$ **do**
                $x'' \leftarrow$ **Yerel Arama** $(x', l, M)$;
                **if** $f_{(x'')} < f_{best}$ **then**
                    $x' \leftarrow x''; x \leftarrow x';$
                    $f_{best} = f_{(x'')};$
                    $k \leftarrow 1; l \leftarrow 1;$
                **else**
                    $l = l + 1;$
                **end if**
            **end while**
        **end if**
    **end while**
**end while**
**Çıktı** $x$
**Bitir**

DKİ, her zaman bir başlangıç noktasından başlar ve önceden belirlenmiş birkaç farklı komşuluk yapısını sırayla kullanarak çözümü arar. DKİ'nin durağı olmayabilir ve sadece belirli bir adım veya zaman sınırına ulaşıldığında sona erer.

Bir diğer önemli farklılık ise, DKA'nın çözümdeki değişiklikleri daha radikal bir şekilde gerçekleştirmesidir. DKA, öncelikle farklı komşuluk yapıları kullanırken, çözümün bir bölümünü tamamen değiştirebilir veya bölünmüş bir şekilde yeniden birleştirebilir. Bununla birlikte, DKİ genellikle daha az radikal değişiklikler yapar ve komşuluk yapısını sadece küçük bir bölgeye odaklar.

Sonuç olarak, DKA ve DKİ benzer ama farklı yerel arama tabanlı metasezgisel algoritmalar olmakla birlikte, DKA daha geniş bir arama alanı kullanırken, DKİ daha küçük bir arama alanı kullanır ve daha az radikal değişiklikler yapar.

### 4.2.3 İndirgenmiş Değişken Komşuluk Arama

İndirgenmiş Değişken Komşuluk Arama (İ-DKA) algoritmasında, yerel arama adımı atlanır ve algoritma, sarsma yoluyla yalnızca farklı komşuluk yapılarının keşfedilmesine odaklanır. Bu, İ-DKA'yı hesaplama açısından daha hızlı hale getirir, ancak çözüm alanından yararlanma konusunda potansiyel olarak daha az etkilidir. Bu tez çalışmasında kullanılan DKA türlerinden biri olan İ-DKA'da sıralı, boru ve döngüsel komşuluk değiştirme adımları kullanılmıştır. İ-DKA algoritmasının sözde kodları (pseudocodes) sıralı, boru ve döngüsel komşuluk değiştirme adımları için ayrı ayrı ve sırayla Algoritma 4, Algoritma 5 ve Algoritma 6'da sunulmuştur.

**Algoritma 4:** İndirgenmiş DKA Algoritması (Sıralı)

**Fonksiyon** İndirgenmiş DKA $(x, k_{max}, l_{max}, M, N)$
**Komşuluk Değiştirme Adımı:** Sıralı
$f_{best} \leftarrow x$ *Başlangıç Çözümü*
**Başla**
**while** *Durdurma koşulu sağlanmadı* **do**
    $k \leftarrow 1$;
    **while** $k \leq k_{max}$ **do**
        $x' \leftarrow$ **Sarsma** $(x, k, N)$;
        $l \leftarrow rassal(M)$;
        $x'' \leftarrow$ **Sarsma** $(x', l, M)$;
        **if** $f_{(x'')} < f_{best}$ **then**
            $x \leftarrow x''$;
            $f_{best} = f_{(x'')}$;
            $k \leftarrow 1$;
        **else**
            $k = k + 1$;
        **end if**
    **end while**
**end while**
**Çıktı** $x$
**Bitir**

### 4.2.4 Eğik Değişken Komşuluk Arama

Eğik DKA (E-DKA), T-DKA algoritmasının komşuluk yapılarının önyargılı veya çarpık bir şekilde keşfedilmesini sağlayan bir çeşididir. Bu yaklaşım, çözüm

uzayın tamamını tekdüze bir şekilde keşfetmek yerine, çözüm uzayında gelecek vadeden belirli alanlara öncelik vererek arama sürecini iyileştirmeyi amaçlar.

E-DKA ile T-DKA arasındaki temel fark, komşuluklardan birini aday çözüm olarak seçme şeklidir. E-DKA'da seçim süreci, iyi çözüme daha yakın olan çözümlere yöneliktir ancak yine de diğer alanların keşfedilmesine izin verir. Bu taraflı seçim, aramayı gelecek vaat eden bölgelere yönlendirerek daha iyi bir çözüm bulma şansını artırabilir.

**Algoritma 5:** İndirgenmiş DKA Algoritması (Boru)

**Fonksiyon** İndirgenmiş DKA $(x, k_{max}, l_{max}, M, N)$
**Komşuluk Değiştirme Adımı:** Boru
$f_{best} \leftarrow x$ *Başlangıç Çözümü*
**Başla**
**while** *Durdurma koşulu sağlanmadı* **do**
    $k \leftarrow 1$;
    **while** $k \leq k_{max}$ **do**
        $x' \leftarrow$ **Sarsma** $(x, k, N)$;
        $l \leftarrow rassal(M)$;
        $x'' \leftarrow$ **Sarsma** $(x', l, M)$;
        **if** $f_{(x'')} < f_{best}$ **then**
            $x \leftarrow x''$;
            $f_{best} = f_{(x'')}$;
        **else**
            $k = k + 1$;
        **end if**
    **end while**
**end while**
**Çıktı** $x$
**Bitir**

**Algoritma 6:** İndirgenmiş DKA Algoritması (Döngüsel)

**Fonksiyon** İndirgenmiş DKA $(x, k_{max}, l_{max}, M, N)$
**Komşuluk Değiştirme Adımı:** Döngüsel
$f_{best} \leftarrow x$ *Başlangıç Çözümü*
**Başla**
**while** *Durdurma koşulu sağlanmadı* **do**
    $k \leftarrow 1$;
    **while** $k \leq k_{max}$ **do**
        $x' \leftarrow$ **Sarsma** $(x, k, N)$;
        $l \leftarrow rassal(M)$;
        $x'' \leftarrow$ **Sarsma** $(x', l, M)$;
        **if** $f_{(x'')} < f_{best}$ **then**
            $x \leftarrow x''$;
            $f_{best} = f_{(x'')}$;
        **end if**
        $k = k + 1$;
    **end while**
**end while**
**Çıktı** $x$
**Bitir**

### 4.2.5 Genel Değişken Komşuluk Arama

Genel Değişken Komşuluk Arama (G-DKA), T-DKA'nın ikinci bir komşuluk arama seviyesi sunan bir uzantısıdır. T-DKA'nın sarsma ve yerel arama adımlarından sonra, G-DKA farklı bir komşuluk yapısı kullanarak başka bir sarsma işlemi gerçekleştirir ve ardından ikinci bir yerel arama gerçekleştirir. Bu iki seviyeli keşif, algoritmanın çözüm uzayını daha etkili bir şekilde keşfetmesine yardımcı olabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan DKA türlerinden biri olan G-DKA'da boru ve döngüsel komşuluk değiştirme adımları kullanılmıştır. G-DKA algoritmasının sözde kodları (pseudocodes) boru ve döngüsel komşuluk değiştirme adımları için ayrı ayrı ve sırayla Algoritma 7 ve Algoritma 8'da sunulmuştur.

**Algoritma 7:** Genel DKA Algoritması (Boru)

**Fonksiyon** Genel DKA $(x, k_{max}, l_{max}, M, N)$
**Komşuluk Değiştirme Adımı:** Boru
$f_{best} \leftarrow x$ *Başlangıç Çözümü*
**Başla**
**while** *Durdurma koşulu sağlanmadı* **do**
    $k \leftarrow 1$;
    **while** $k \leq k_{max}$ **do**
        $x' \leftarrow$ **Sarsma** $(x, k, N)$;
        **if** $f_{(x')} < f_{best}$ **then**
            $x \leftarrow x'$;
            $f_{best} = f_{(x')}$;
        **else**
            $l \leftarrow 1$;
            **while** $l \leq l_{max}$ **do**
                $x'' \leftarrow$ **Yerel Arama** $(x', l, M)$;
                **if** $f_{(x'')} < f_{best}$ **then**
                    $x' \leftarrow x''$; $x \leftarrow x'$;
                    $f_{best} = f_{(x'')}$;
                **else**
                    $k = k + 1$; $l = l + 1$;
                **end if**
            **end while**
        **end if**
    **end while**
**end while**
**Çıktı** $x$
**Bitir**

**Algoritma 8:** Genel DKA Algoritması (Döngüsel)

```
1  Fonksiyon Genel DKA (x, k_max, l_max, M, N)
2  Komşuluk Değiştirme Adımı: Döngüsel
3  f_best ← x Başlangıç Çözümü
4  Başla
5  while Durdurma koşulu sağlanmadı do
6      k ← 1;
7      while k ≤ k_max do
8          x' ← Sarsma (x, k, N );
9          if f_(x') < f_best then
10             x ← x';
11             f_best = f_(x');
12         else
13             l ← 1;
14             while l ≤ l_max do
15                 x'' ← Yerel Arama (x', l, M);
16                 if f_(x'') < f_best then
17                     x' ← x''; x ← x';
18                     f_best = f_(x'');
19                 end if
20                 l = l + 1;
21             end while
22         end if
23         k = k + 1;
24     end while
25 end while
26 Çıktı x
27 Bitir
```

### 4.2.6 Değişken Komşuluk Ayrıştırma Arama

Değişken Komşuluk Ayrıştırma Arama (DKAA), problemi daha küçük alt problemlere ayrıştıran ve DKA'yı her bir alt probleme bağımsız olarak uygulayan bir DKA çeşididir. Bu ayrıştırma, problemi coğrafi konum, zaman penceresi, talep miktarı vb. gibi kriterlere göre gerçekleştirilebilir. Her bir alt problemi DKA kullanarak çözdükten sonra, ana problem için tam bir çözüm oluşturmak üzere kısmi çözümler birleştirilir. DKAA, daha küçük ve daha yönetilebilir alt problemlere odaklanarak arama uzayının karmaşıklığını azalttığından, özellikle büyük ölçekli problemler için etkili olabilir.

### 4.2.7 Kümelenmiş Değişken Komşuluk Arama

Kümelenmiş Değişken Komşuluk Arama (K-DKA) algoritması, bir DKA işleminin başka bir DKA işlemine gömülü olduğu spesifik bir çeşididir. Bu iç içe yapı,

çözüm uzayının daha kapsamlı bir şekilde keşfedilmesini sağlar. Dış DKA döngüsünde, tanımlanan komşuluk yapılarından biri kullanılarak bir sallama işlemi gerçekleştirilir ve ardından çözüm uzayını iç DKA döngüsünde daha fazla keşfetmek için K-DKA çağrılır. Kümelenmiş yaklaşım, algoritmanın yerel optimumdan daha etkili bir şekilde kaçmasına ve çözüm uzayının gelecek vaat eden bölgelerini keşfetmesine yardımcı olabilir.

### 4.2.8 Rassal Değişken Komşuluk Arama

Rassal Değişken Komşuluk Arama (R-DKA) algoritması, arama sürecinde rassallaştırmayı içeren bir DKA çeşididir. R-DKA, sarsma ve komşuluk keşfi için deterministik bir prosedürü takip etmek yerine, seçilen komşuluk yapısı içinde yeni çözümler üretmek için rassallaştırmaya güvenir. Bu rassal yaklaşım, algoritmanın keşif yeteneklerini geliştirebilir ve yerel optimumdan daha etkili bir şekilde kaçmasına yardımcı olabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan DKA türlerinden biri olan R-DKA'da sıralı, boru ve döngüsel komşuluk değiştirme adımları kullanılmıştır. R-DKA'nın T-DKA'dan farkı komşuluk yapılarının sırasının önceden belirlenmesi değil, her döngüde rassal olarak belirlenmesi şeklinde özetlenebilir. Bu nedenle R-DKA'ya ait sözde kodlar verilmemiştir.

Yukarıda kısaca anlatılan DKA varyantlarının her birinin, belirli soruna ve çözüm alanının özelliklerine bağlı olarak kendi güçlü ve zayıf yönleri vardır. Uygulamada, farklı DKA türleri ile deneyler yapmak veya hatta çözülmekte olan sorunun gereksinimlerine göre uyarlanmış bir hibrit algoritma geliştirmek için bunları birleştirmek faydalı olacaktır.

Bu nedenle bu tez çalışmasında zaman penceresi ve eş zamanlı toplama ve dağıtım kısıtlarının bulunduğu EARP'nin dört problemin çözümünde kullanılan DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarına ait bilgiler Tablo 4.1'de sunulmuştur.

**Tablo 4.1:** DKA türlerinde kullanılan komşuluk değiştirme adımları

| Komşuluk Değiştirme Adımı / DKA Türü | Sıralı | Boru | Döngüsel |
|---|---|---|---|
| İndirgenmiş DKA | V1 | V2 | V3 |
| Temel DKA | V4 | - | - |
| Genel DKA | - | V5 | V6 |
| Rassal DKA | V7 | V8 | V9 |
| Kümelenmiş DKA | V10 | V11 | V12 |

## 4.3 DKA Komşuluk Yapıları

Komşuluk ve operatör kavramlarının anlamı, aralarındaki farkın ortaya konmasıyla açıklanabilir. Komşuluk, bir çözümün yakınında bulunan diğer çözümleri ifade eder. Örneğin, bir sıralama problemi için bir komşu çözüm, mevcut sıralamanın iki elemanının yerini değiştirerek elde edilebilir. Komşuluk, bir problemde hangi tür değişikliklerin yapılacağını belirler.

Operatörler, bir çözümdeki değişiklikleri tanımlayan işlemlerdir. Örneğin, bir swap operatörü, iki elemanın yerini değiştirir. Bir invert operatörü, bir alt diziyi ters çevirir. Operatörler, bir komşuluk yapısı için belirli bir işlevi gerçekleştiren temel yapı taşlarıdır. Yani, komşuluk yapısı, bir çözümün yakınındaki diğer çözümlerin kümesini belirlerken, operatörler, belirli bir komşuluk yapısı üzerinde değişiklikleri gerçekleştirmek için kullanılır. Operatörler, bir problemdeki farklı komşuluk yapıları için farklı şekillerde tanımlanabilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan komşuluk yapıları ARP ve EARP literatüründe kullanılan komşuluklardan oluşmaktadır. EARP, özellikle elektrikli araçlar gibi sınırlı menzil veya şarj süresi olan araçlarla ilgili olduğu için, Şİ'lerin etkisi önemlidir. Bu nedenle, EARP'nin çözümü sırasında Şİ'lere de dikkat edilir. Şİ'lerin etkisini hesaba katmak için, EARP gibi problemlerde Exchange komşuluğu gibi komşuluk yapıları da kullanılabilir. Bu komşuluk yapısı, belirli bir müşteri veya Şİ'nin rotalarda yer değiştirmesiyle farklı bir çözüm elde etmeyi sağlar. Bu nedenle, EARP gibi lojistik problemlerde, Şİ'leri de dikkate alan çeşitli komşuluk yapıları kullanılarak daha iyi çözümler elde edilebilir.

**Tablo 4.2:** Sarma ve Yerel Arama adımında kullanılan operatörler

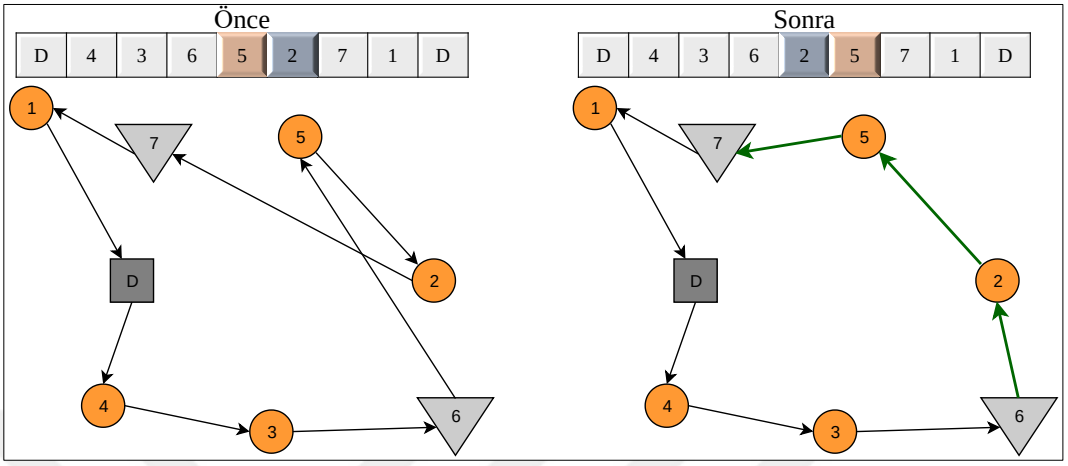
| Sarsma | | Yerel Arama | |
|---|---|---|---|
| **Rota İçi** | Replace | **Rota İçi** | Best Swap (C) |
| | Swap | | Best Swap (All) |
| | 2-Opt | | En İyi Ekleme (Best Insert) |
| | 3-Opt | | En İyi Ters Çevirme (Best Invert) |
| | 3-Opt (v2) | | Consecutive Charging Station Insertion |
| | Insert (C) | | Clustering |
| | Insert (C + CS) | | |
| **Rotalar Arası** | Shift | **Rotalar Arası** | Merge Two Routes |
| | Exchange | | |
| | Cross | | |
| **Bozma** | Shaw Customer Removal | **Onarma** | Greedy Insert |
| | Farhest N Customer Removal | | Distant Based Customer Insert |
| | Random N Customer Removal | | Create Single Customer Route |
| | Min Capacity Route Removal | | Create a Route with All Removed |
| | Random Route Removal | | |
| | Farthest 1 Customer Removal | | |
| | Single Customer Route Removal | | |

### 4.3.1 Sarsma Adımı Operatörleri

Sarsma adımında kullanılan operatörler rota-içi, rotalar-arası ve bozma operatörleri olarak üç grupta ele alınmıştır. Rota-içi operatörler, bir rota üzerindeki düğümlerin yerlerinin değiştirilmesini sağlamaktadır. Rotalar-arası operatörler ise birden fazla EA'nın kullanıldığı yani birden fazla rotadan oluşan çözümlerde müşterilerin farklı EA'dan hizmet almasını sağlamaktadır. Rotalar-arası operatörler EA'ların sınırlı olan yük kapasitesinden kaynaklı çözümsüzlükleri gidermede ve kapasite dengelemesi konusunda etkilidir. Sarsma adımında kullanılan diğer operatör grubu ise bozma operatörleridir. Mevcut çözümdeki müşterilerin çözümden çıkarıldığı ve silinenler listesinde tutulduğu, yerel arama adımında yeniden çözüme eklendiği bir yapı söz konusudur.

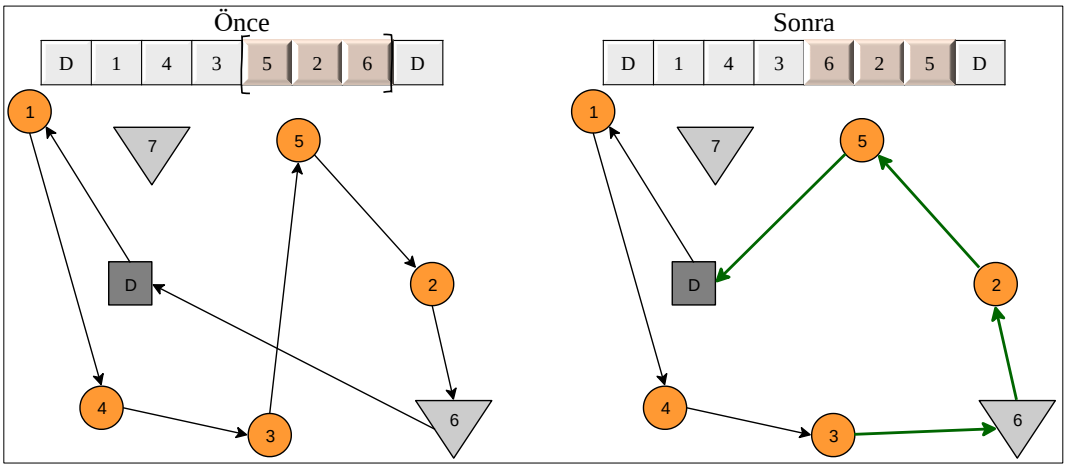
Swap operatörü, aynı rotada bulunan iki müşterinin yerlerini değiştirerek mevcut çözümün değiştirilmesini amaçlayan bir DKA operatörüdür. Seçilen müşterilerin yerleri değiştirildikten sonra elde edilen yeni oluşan çözümün uygunluğu hesaplanır. Eğer yeni çözüm kısıtları sağlıyor ve mevcut çözümden daha iyi bir uygunluğa sahipse, yeni çözüm kabul edilir ve mevcut çözüm yerine kullanılır. Eğer yeni çözüm kısıtları sağlamıyor veya daha kötü bir uygunluğa sahipse, mevcut çözüm aynı şekilde kalır. Bu operatör, küçük değişikliklerle yeni ve daha iyi bir çözüm elde etmeyi amaçlar. Şekil 4.1'de swap operatörünün uygulandığı bir çözüme ait örnek

gösterim sunulmuştur. Solda çözümün operatör uygulanmadan önceki rota planı, sağda ise operatör uygulandıktan sonraki çözüme ait rota planı bulunmaktadır. Rassal olarak 2 ve 5 numaralı düğümler seçilmiş ve rotadaki sıraları değiştirilmiştir.




**Şekil 4.1:** Swap operatörü örnek gösterimi

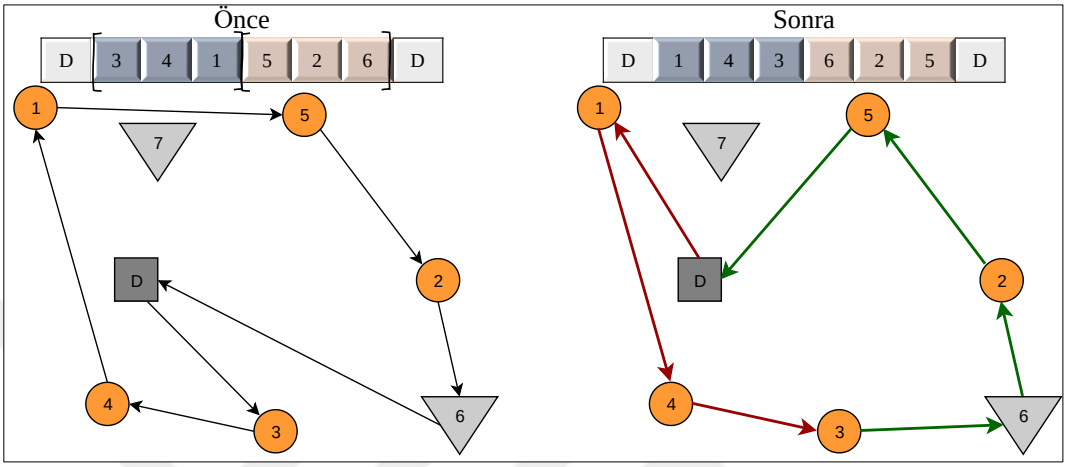
2-Opt operatöründe, mevcut bir çözümdeki bir rotada iki kesme noktası seçilir. Seçilen kesme noktalarının arasındaki müşterilerin sıraları tersine çevrilir. Şekil 4.2'de 2-Opt operatörünün uygulandığı bir çözüme ait örnek gösterim sunulmuştur. Solda çözümün operatör uygulanmadan önceki rota planı, sağda ise operatör uygulandıktan sonraki çözüme ait rota planı bulunmaktadır. Rassal olarak seçilen birinci kesme noktası 3 ile 5 numaralı düğümlerin arasında, ikinci kesme noktası ise 6 numaralı düğüm ile depo düğümü arasındadır. Bu iki kesme noktası arasındaki düğümlerin sırası ters çevrilmiştir.




**Şekil 4.2:** 2-Opt operatörü örnek gösterimi

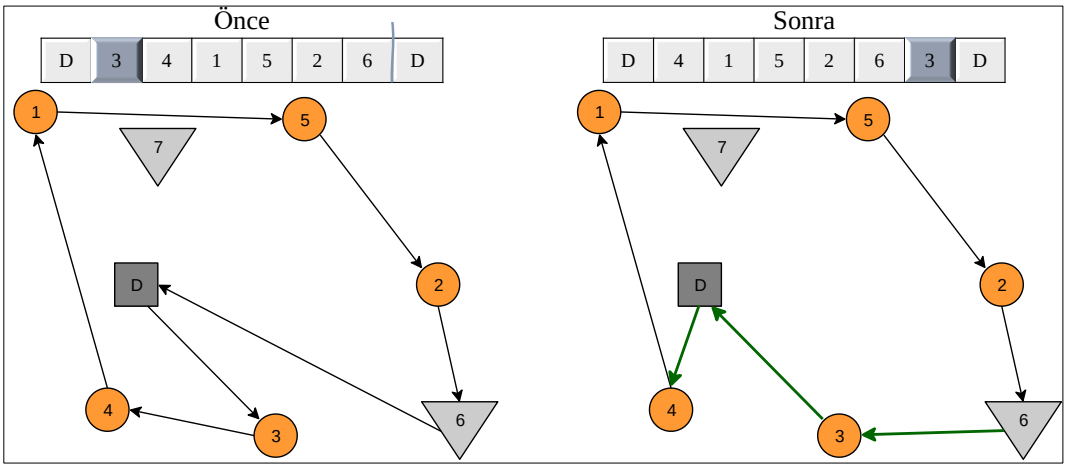
3-Opt Operatörü, 2-Opt operatörü ile oldukça benzerdir ancak 3-Opt, 2-Opt operatöründen farklı olarak üç kesme noktası seçerek sıralamayı değiştirir. Mevcut bir

çözümde, üç kesme noktası seçilir. Bu yöntem, 2-Opt operatöründen daha fazla müşteri kombinasyonu test eder ve daha iyi sonuçlar elde edebilir. Ancak 3-Opt operatörü, daha fazla işlemci zamanı gerektirir ve 2-Opt operatörüne göre daha yavaş çalışabilir. Şekil 4.3'te 3-Opt operatörünün uygulandığı bir çözüme ait örnek gösterim sunulmuştur.




**Şekil 4.3:** 3-Opt operatörü örnek gösterimi

Insert operatörü, rotada rassal olarak seçilen bir düğümü aynı rotada rassal olarak belirlenen bir konuma eklemeyi amaçlar. Şekil 4.4'te Insert operatörünün uygulandığı bir çözüme ait örnek gösterim sunulmuştur. Bu tez çalışmasında Insert operatörü iki farklı versiyonda uygulanmıştır. "Insert C" operatörü yalnızca müşterilerden birini seçerken, "Insert All" tüm düğümlerin içinden bir düğüm seçmektedir. İkinci versiyonda Şİ'lerin de farklı bir konuma taşınması söz konusudur.




**Şekil 4.4:** Insert operatörü örnek gösterimi

Rotalar arası operatörlerden olan Exchange Operatörü, birden fazla EA'nın kullanıldığı yani birden fazla rotadan oluşan mevcut çözümdeki iki rota arasındaki

müşterilerin yerlerini değiştirir. Mevcut bir çözümde, iki rota seçilir. Seçilen rotalardaki müşterilerin yerleri değiştirilir.

Cross operatörü, Exchange operatöründe olduğu gibi birden fazla EA'nın kullanıldığı bir çözümde iki rota arasında müşteri kesişim noktalarının belirlenmesiyle gerçekleştirilir. Mevcut bir çözümde, iki rota seçilir. İki rota arasındaki kesişim noktaları belirlenir ve müşteriler değiştirilir.

Shift operatöründe de mevcut bir çözümde, iki rota seçilir. Rotalardan birindeki müşterilerden biri veya daha fazlası rassal olarak seçilerek diğer rotada rassal olarak belirlenen konuma aktarılır.

Sarsma adımında kullanılan bozma operatörlerinden ilki Shaw Müşteri Çıkarma operatörüdür. Bu operatör, birbirine benzer özellikte olan n adet müşteriyi çözümden kaldırmak için kullanılır. Öncelikle rassal olarak bir müşteri seçilir ve çözümden kaldırılır. Bu müşteri silinenler listesine eklenir. Silinenler listesine en son eklenen müşteriye en benzer n-1 adet müşteri de çözümden kaldırılır. Benzerlik seviyesi, ilgili müşteri çifti arasındaki Shaw değeri temel alınarak hesaplanır.

Rastgele müşteri çıkarma operatörü ise mevcut çözümden n adet rassal seçilen müşteriyi çıkarır ve silinenler listesine ekler. Müşteri çıkarma işleminden sonra çözümde yer alan Şİ'lerden ziyaret ihtiyacı olmayanlar var ise bu Şİ'ler da aynı çözümden çıkarılır.

Mesafeyi en çok artıran birer müşteri çıkarma operatörü, her bir rotadan o rotanın mesafesini en çok yükselten birer adet müşteriyi ilgili rotalardan kaldırır ve kaldırılan müşterileri silinenler listesine ekler. Bunun için her bir müşterinin bir önceki ve bir sonraki düğümle aralarındaki toplam mesafe hesaplanır ve en yüksek toplam mesafe değerine sahip müşteri rotadan kaldırılır. Böylelikle toplamda rota sayısı kadar müşteri çözümden çıkarılmış olur.

Mesafeyi en çok artıran N tane müşteri çıkarma operatöründe ise öncelikle çözümde yer alan rotalardan kaldırılacak müşteri sayısı rassal olarak belirlenir. Sonra belirlenen sayıda müşteri bir önceki operatörde olduğu gibi en yüksek mesafe değerine sahip müşterilerden başlanmak üzere çözümden çıkartılır.

Rastgele rota kaldırma operatörü mevcut çözümden rassal olarak bir rota seçer ve rotayı çözümden kaldırır. Kaldırılan rotada yer alan müşteriler ise silinenler listesine eklenir.

En düşük doluluktaki rotayı çıkarma operatöründe öncelikle her bir rotadaki toplam talep miktarı belirlenir. Yani her EA'nın kapasite kullanım oranları belirlenmiş olur. Daha sonra en düşük doluluğa sahip rota çözümden kaldırılır ve kaldırılan rotadaki müşteriler silinenler listesine eklenir.

Mevcut bir çözüme herhangi bir bozma ve onarma operatörü uygulandıktan sonra zaman zaman tek bir müşteri içeren rotalar elde edilebilmektedir. Tek müşterili rotaları kaldırma operatörü ile bu rotalar kaldırılarak, müşteri silinenler listesine eklenir.

### 4.3.2 Yerel Arama Adımı Operatörleri

Sarsma adımı, yerel optimumlardan kaçmayı ve arama uzayının yeni bölgelerini keşfetmeyi amaçlarken, yerel arama adımı, problemin yapısından yararlanarak yüksek kaliteli çözümlere yakınsamayı amaçlar. Sarsma ve yerel arama adımları, DKA algoritmasında keşif (exploration) ve sömürüyü (exploitation) dengelemek ve yüksek kaliteli çözümleri verimli bir şekilde bulmak için birlikte çalışan birbirini tamamlayan iki adımdır. Bu bölümde yerel arama adımında kullanılan operatörler hakkında bilgi verilecektir. Sarsma adımında olduğu gibi bu adımda da rota-içi ve rotalar-arası operatörler bulunmaktadır. Buna ek olarak, sarsma adımındaki bozma operatörlerine karşılık olarak yerel arama adımında onarma operatörleri kullanılmaktadır.

Rota içi yerel arama operatörlerinden ilki Best Swap operatörüdür. Best Swap operatörü bir dizi olası swap arasından en iyi swap hareketini bulmaya çalışır. Mevcut çözümdeki olası tüm swap hareketlerinin sonucunda oluşacak yeni çözümlerin amaç fonksiyonu değerlendirilir ve en iyi iyileştirmeyi sağlayan aday çözüm seçilir. Swap operatörü rastgele iki elemanı değiştirirken, Best Swap operatörü aday çözümler kümesi oluşturur ve en iyi çözümü seçerek değiştirir. Bu tez çalışmasında Best Swap operatörü iki farklı şekilde kullanılmıştır. İlk versiyonda (Best Swap (C)) yalnızca

mevcut çözümdeki müşteriler dikkate alınırken, ikinci versiyonda (Best Swap (All)) müşterilerle birlikte Şİ'ler de dikkate alınmıştır.

En İyi Ekleme (Best Insert) operatörü, mevcut çözümdeki her bir elemanı, olası pozisyonlar kümesine yerleştirerek en iyi ekleme işlemini bulmaya çalışır. Bir aday çözüm kümesi oluşturur ve her bir aday çözüm için amaç fonksiyonunu değerlendirir ve en iyi iyileştirmeyi sağlayan aday çözümü seçer. Eğer en iyi aday çözüm mevcut çözümü iyileştirirse, yeni çözüm kabul edilir.

EARP'nin yapısı gereği Şİ'lerin rota üzerindeki ziyaret sayısı ve sırası çözümün uygun olup olmaması ile daha iyi bir çözüm olup olmaması üzerinde oldukça etkilidir. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında iki farklı Şİ ekleme fonksiyonu geliştirilmiştir. Birincisinde çözümde Şİ ihtiyacı doğan düğümlerin arasına Şİ eklenirken öncül düğüme en yakın Şİ (Nearest CS) seçilerek eklenir. İkincisinde ise öncül ve ardıl düğümlerin arasına mesafeyi en az artıracak şekilde Şİ (Greedy CS) seçilir ve eklenir. En İyi Ters Çevirme (Best Invert) operatörü bu tez çalışması kapsamında, ters çevirme (Invert) operatörünün bazı değişikliklerle geliştirilmiş bir versiyonudur. Öncelikle mevcut çözüm ters çevrilerek birinci aday çözüm elde edilir. Mevcut çözümdeki tüm Şİ'ler kaldırılarak, Greedy CS fonksiyonu ile Şİ eklenir ve ikinci aday çözüm elde edilir. Üçüncü aday çözüm ise Nearest CS fonksiyonu ile Şİ eklenen çözümdür. Dördüncü ve beşinci aday çözümler ise ikinci ve üçüncü aday çözümlerin ters çevrilmesi ile elde edilir. Elde edilen 5 aday çözüm arasında en düşük mesafeye sahip aday çözüm yeni çözüm olarak kabul edilir.

İki müşteri arasında seyahatin tek Şİ'ye uğrayarak gerçekleşmesinin mümkün olmadığı durumlar için ise arka arkaya iki farklı Şİ ekleme operatörü (Consecutive Charging Station Insertion) geliştirilmiştir.

Rota-içi operatör grubundan olan son operatör ise kümeleme (Clustering) operatörüdür. Mevcut çözümde rassal olarak seçilen bir rotadaki tüm müşteriler koordinatlarına göre iki gruba ayrılarak bir rotadan iki rota elde edilir. Elde edilen yeni rotalar batarya kısıtını sağlamıyorsa Şİ ekleme fonskiyonu ile Şİ eklenerek uygun hale getirilmeye çalışılır. Elde edilen aday çözüm mevcut çözümden daha iyi ise yeni çözüm olarak kabul edilir.

Yerel arama adımında kullanılan rotalar-arası tek operatör iki rotayı birleştirme operatörüdür (Merge two Routes). Mevcut çözümde en düşük kapasite kullanımına sahip iki EA'nın rotaları seçilerek birleştirilir. Elde edilen aday çözüm mevcut çözümden daha iyi ise yeni çözüm olarak kabul edilir.

Aç gözlü müşteri ekleme (Greedy Insert) operatörü, sarsma adımında çözümden kaldırılan müşterileri tekrar mevcut çözüme geri ekleyerek çözümü iyileştirmeye çalışır. İşlem, silinenler listesinde yer alan ilk müşteriden başlayarak gerçekleştirilir.

Müşteri ekleme işlemi, en düşük seyahat mesafesinin elde edileceği pozisyon belirlenerek gerçekleştirilir. Bu bağlamda, mevcut çözümde yer alan düğüm $i$ ve düğüm $i$'nin ardıl düğümü olan düğüm $k$ arasına silinen listesinde yer alan müşteri $j$'nin eklenme maliyeti ($\delta_{ij}$) denklem 4.2'ye göre hesaplanır. $\delta_{ij}$, müşteri $j$ 'nin $i$ ve $k$ düğümleri arasındaki seyahat mesafesi ($t_{ij}$ ve $t_{jk}$) ile $i$ ve $k$ düğümleri arasındaki seyahat mesafesi ($t_{ik}$) arasındaki farktır.

$$\delta_{ij} = t_{ij} + t_{jk} - t_{ik} \tag{4.2}$$

Sonuç olarak, silinenler listesindeki müşteri $j$, en düşük $\delta_{ij}$ değerine sahip pozisyona eklenir. Ekleme işlemi sonrasında kapasite veya batarya uyumsuzluğu ortaya çıkarsa, listedeki en düşük ekleme maliyetine sahip diğer müşterilerle ekleme işlemine devam edilir. Açgözlü Müşteri Ekleme operatörü, daha önce çözümden kaldırılan müşterileri geri ekleyerek çözümü iyileştirmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, müşterilerin en iyi konumda eklenmesini sağlayarak çözümü optimize etmeyi hedefler.

Mesafe bazlı müşteri ekleme (Distance Based Customer Insert) operatörü öncelikle silinler listesinde yer alan her bir müşterinin mevcut çözümün her bir ekleme pozisyonuna eklenmesinin mesafeye olan etkisini dikkate almaktadır. $distance_{kij}$ silinenler listesindeki $k$. müşterinin çözümdeki $i$ ve $j$ düğümleri arasına eklenmesiyle elde edilen mesafe değeri olsun. Bu değer, ekleme yapılmadan önceki tur uzunluğu ile ekleme yapıldıktan sonraki tur uzunluğu arasındaki farkı ifade etmektedir. Silinenler listesinde yer alan her bir müşteri için mesafe değeri hesaplanır ve ardından ilgili müşteri en düşük mesafe değerine sahip pozisyona eklenir.

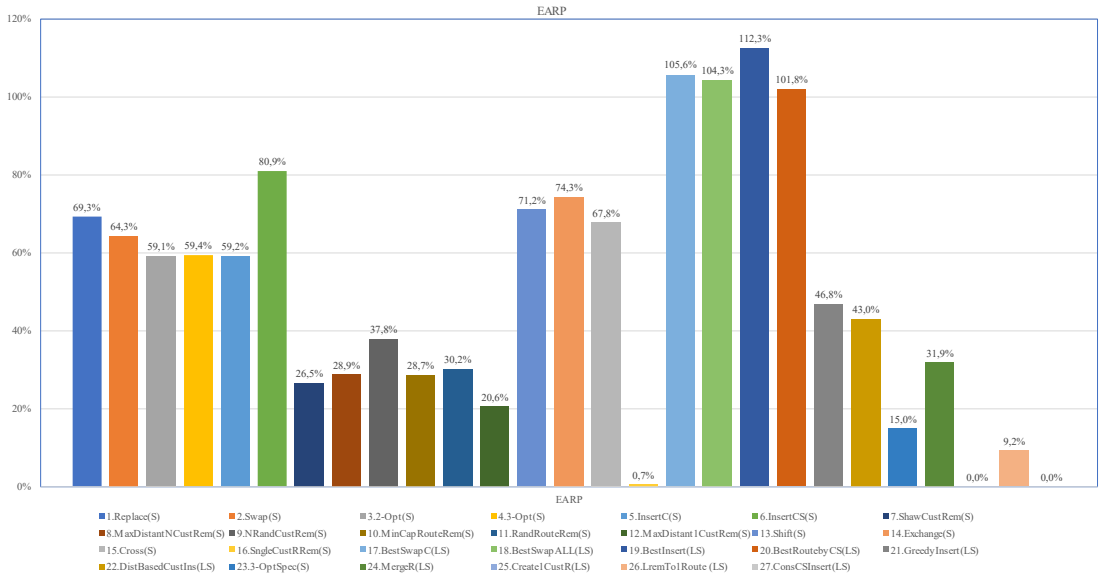
Tek müşterili rota ekleme (Create Single Customer Route) operatörü, silinenler listesinde yer alan her bir müşteri için o müşteriye en yakın depodan başlayacak şekilde tek müşteri içeren rotalar oluşturmaktadır (depo-müşteri-depo). Böylelikle aramada çeşitliliğin sağlanması hedeflenmektedir.

Silinen listesindeki müşterilerle bir rota oluşturma (Create a Route with All Removed) operatörü, silinenler listesindeki tüm müşterileri aç gözlü müşteri ekleme operatörünü kullanarak mevcut rotalara eklemeden, yeni bir rota oluşturacak şekilde ekler.

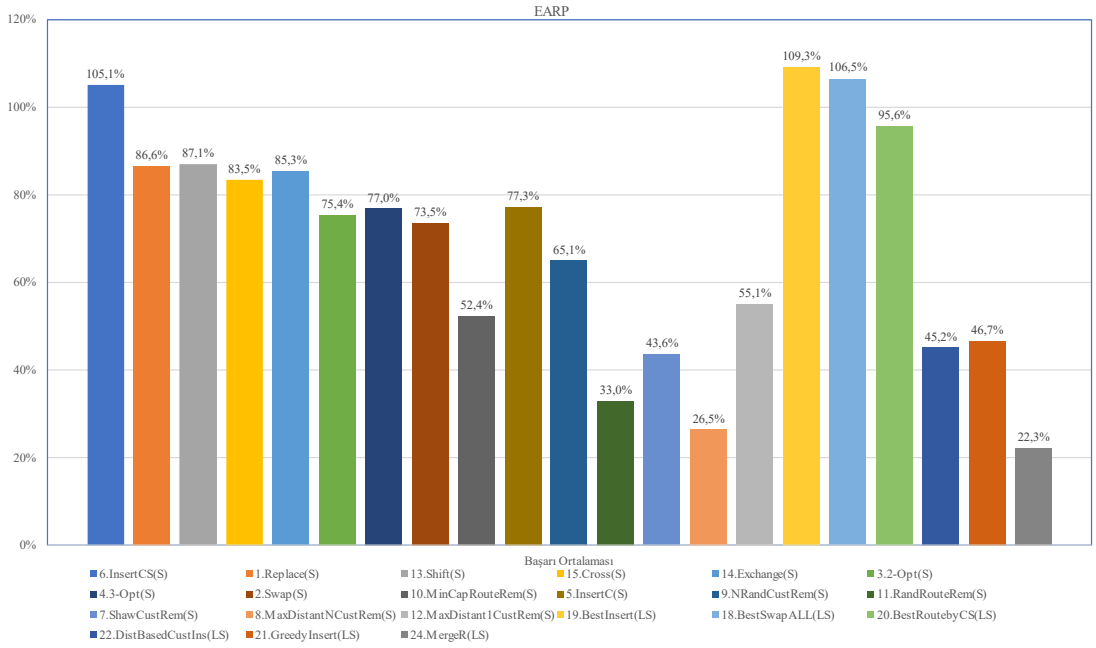
## 4.4 Operatör Performans Testleri

Detayları 4.1 numaralı bölümde verilen CW kullanılarak oluşturulan başlangıç çözümü, DKA ile iteratif olarak iyileştirilmektedir. Önerilen DKA varyantlarından boru komşuluk değiştirme adımının (KDA'nın) kullanıldığı İ-DKA (V2) aynı zaman sınırı içinde diğer varyantlardan daha iyi çözümlere ulaşmıştır. 100 müşteriden oluşan büyük boyutlu veri setlerinin tümünü temsil edebilecek şekilde 6 veri seti (C101_21, C201_21, R101_21, R201_21, RC101_21, RC201_21) seçilmiştir.

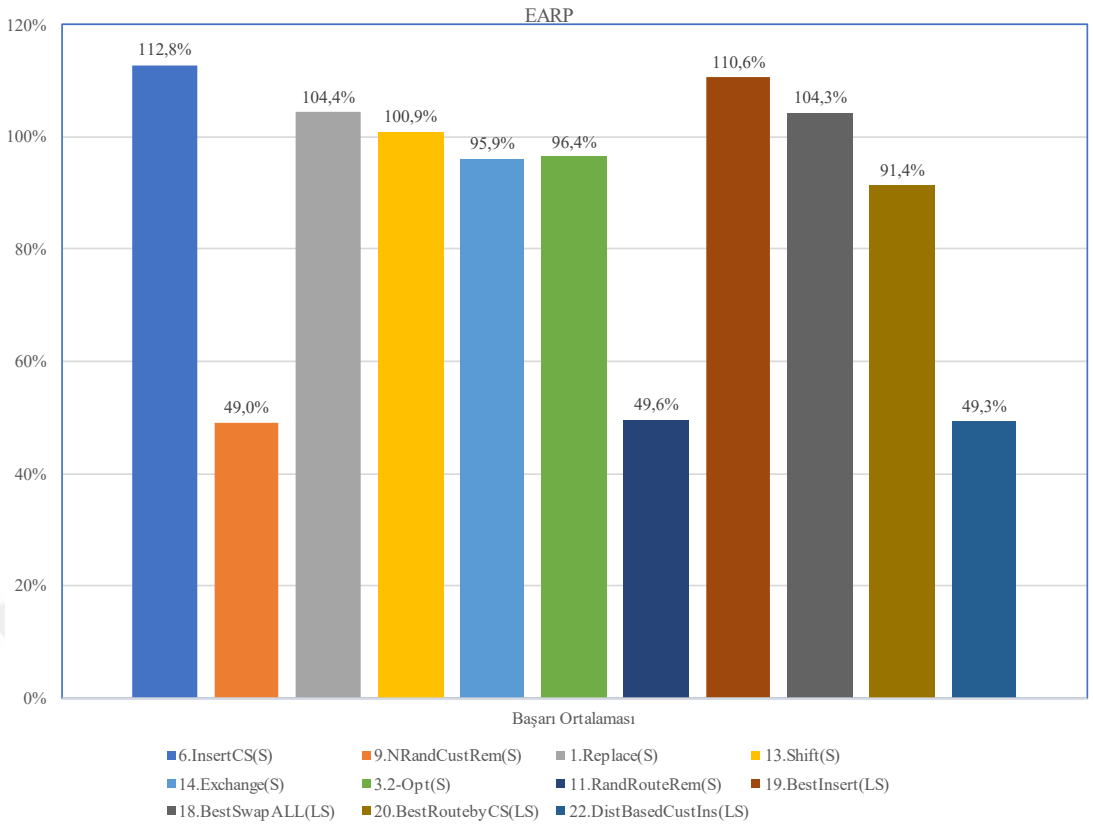
EARP kapsamında DKA algoritmasında kullanılan operatörlerin çözüme ne kadar katkı sunduklarını analiz edebilmek için operatör performans testleri yapılmıştır. 6 veri seti üzerinde 600 saniye zaman sınırı ve 10 tekrar yapılarak DKA varyantlarından boru KDA'nın kullanıldığı İ-DKA (V2) 27 operatör dahil edilerek çalıştırılmıştır. Şekil 4.5'te sunulan performans puanlarına göre en az başarı puanına sahip 6 operatör çıkarılarak 21 operatör ile aynı parametrelerle yeniden çalıştırılmış ve Şekil 4.6'daki performans puanlarına ulaşılmıştır. 21 operatörden en düşük başarı oranına sahip 10 operatör daha çıkarılarak 11 operatör ile yeniden çalıştırılmış ve Şekil 4.13'te gösterilen sonuçlara ulaşılmıştır.




**Şekil 4.5:** EARP kapsamında 27 operatöre ait başarı oranları




**Şekil 4.6:** EARP kapsamında 21 operatöre ait başarı oranları



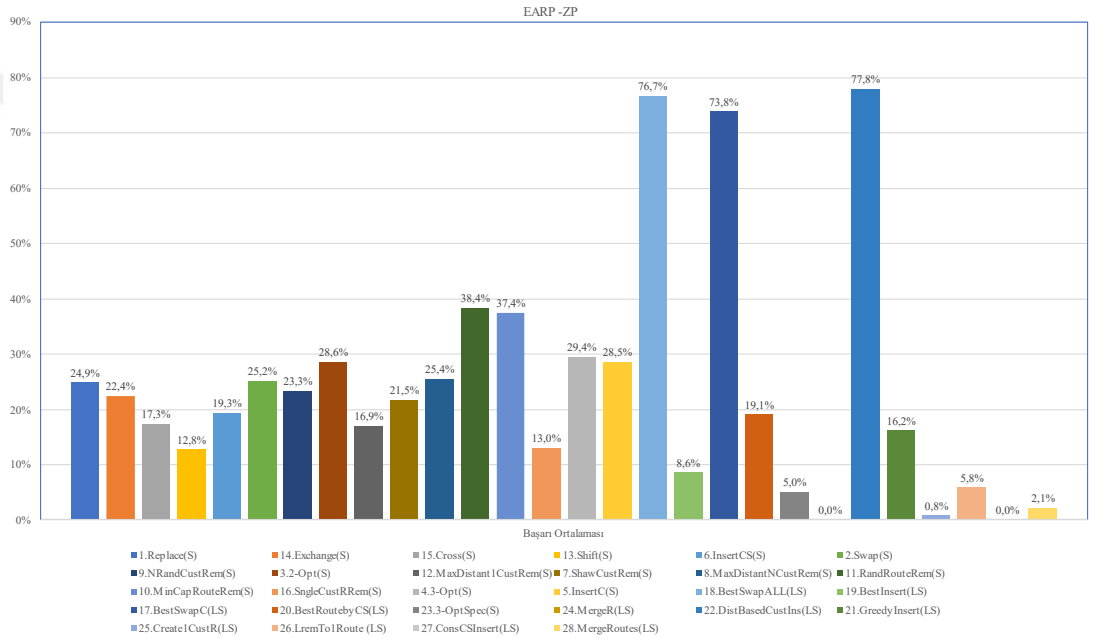

**Şekil 4.7:** EARP kapsamında 11 operatöre ait başarı oranları

Her bir operatör grubu ile yapılan deneylere ait uygunluk değerleri Tablo 4.3'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere 11 operatörden en düşük başarı puanına sahip 3 operatörün daha çıkarılması ile elde edilen 8 operatörlü deneyin sonuçları süregelen iyileşme sürecinin bittiğini ve 11 operatörden daha kötü çözümlere ulaşıldığını göstermektedir.

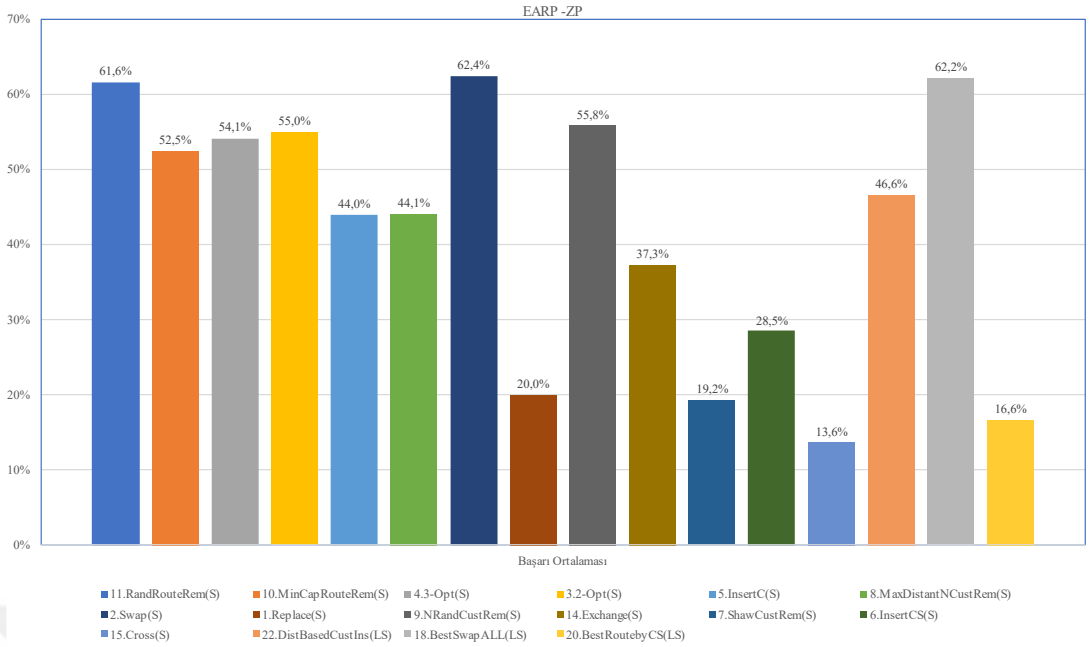
**Tablo 4.3:** EARP kapsamında operatör gruplarının performans karşılaştırması

| **İndirgenmiş DKA-Boru KDA (V2)** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Operatör Seti** | **27 Operatör** | | **21 Operatör** | | **11 Operatör** | | **8 Operatör** | |
| **Veri Seti** | **f** | **%** | **f** | **%** | **f** | **%** | **f** | **%** |
| C101_21 | 922,50 | 3,19 | 919,58 | 2,86 | 894,01 | 0,00 | 1202,09 | 34,46 |
| C201_21 | 624,23 | 3,91 | 600,75 | 0,00 | 608,76 | 1,33 | 1002,06 | 66,80 |
| R101_21 | 1003,32 | 8,10 | 939,40 | 1,21 | 928,14 | 0,00 | 1093,40 | 17,81 |
| R201_21 | 757,96 | 0,00 | 780,84 | 3,02 | 794,88 | 4,87 | 804,25 | 6,11 |
| RC101_21 | 1187,59 | 1,39 | 1171,30 | 0,00 | 1210,60 | 3,36 | 1416,77 | 20,96 |
| RC201_21 | 742,19 | 1,18 | 763,14 | 4,04 | 733,54 | 0,00 | 1117,54 | 52,35 |
| **Ortalama** | 873,0 | **2,96** | 862,5 | **1,85** | 861,7 | **1,59** | 1106,0 | **33,08** |

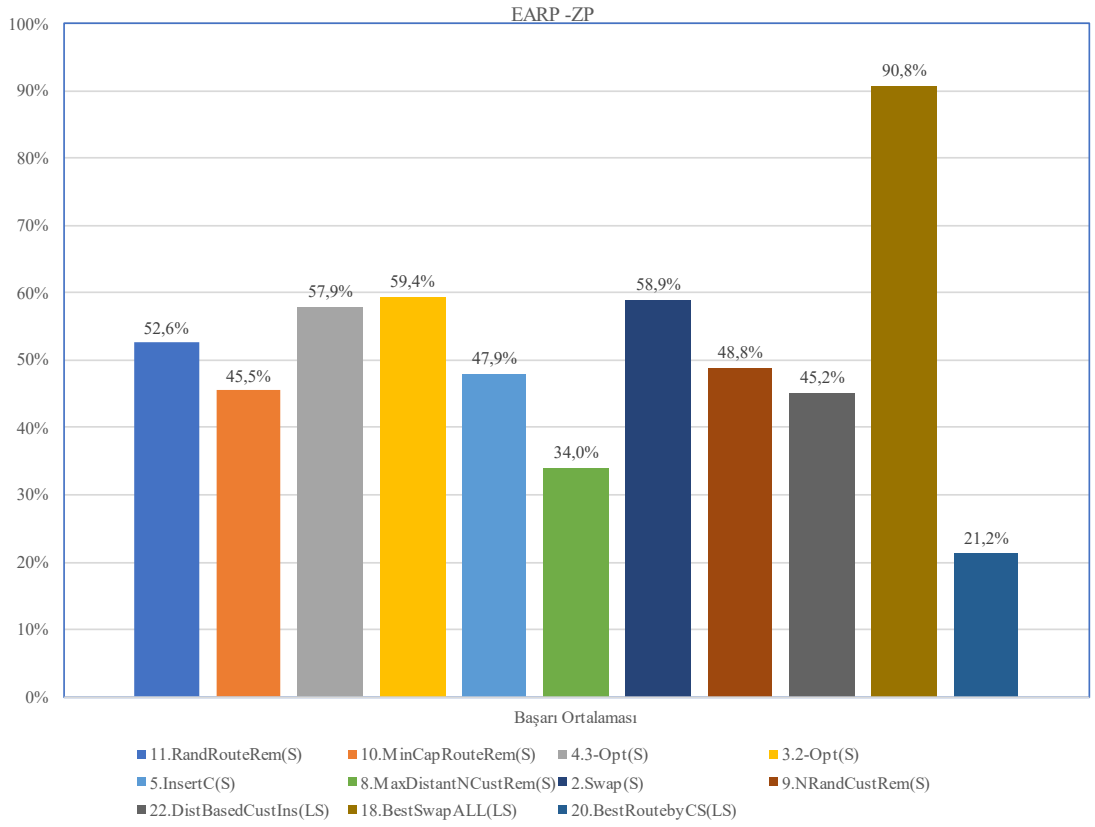
EARP-ZP kapsamında DKA algoritmasında kullanılan operatörlerin çözüme ne kadar katkı sunduklarını analiz edebilmek için operatör performans testleri yapılmıştır. 6 veri seti üzerinde 600 saniye zaman sınırı ve 8 tekrar yapılarak DKA varyantlarından boru KDA'nın kullanıldığı İ-DKA (V2) 28 operatör dahil edilerek çalıştırılmıştır. Şekil 4.8'de sunulan performans puanlarına göre en az başarı puanına sahip 12 operatör çıkarılarak 16 operatör ile aynı parametrelerle yeniden çalıştırılmış ve Şekil 4.9'daki performans puanlarına ulaşılmıştır. 16 operatörden en düşük başarı oranına sahip 5 operatör daha çıkarılarak 11 operatör ile yeniden çalıştırılmış ve Şekil 4.10'da gösterilen sonuçlara ulaşılmıştır.




**Şekil 4.8:** EARP-ZP kapsamında 28 operatöre ait başarı oranları




**Şekil 4.9:** EARP-ZP kapsamında 16 operatöre ait başarı oranları




**Şekil 4.10:** EARP-ZP kapsamında 11 operatöre ait başarı oranları

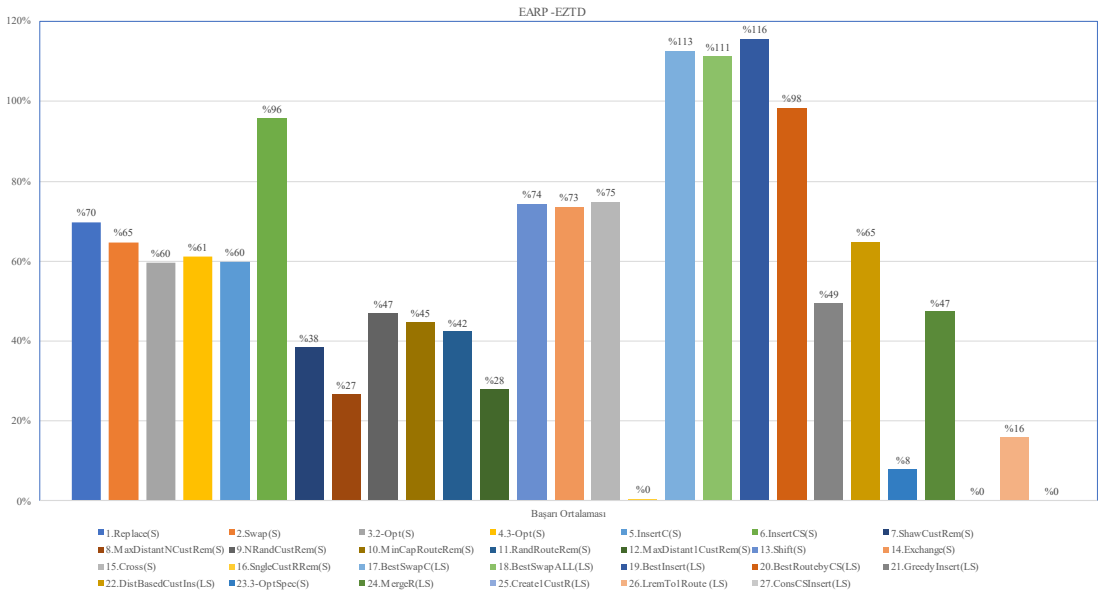
Her bir operatör grubu ile yapılan deneylere ait uygunluk değerleri Tablo 4.4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere 11 operatörden en düşük başarı puanına sahip 3 operatörün daha çıkarılması ile elde edilen 8 operatörlü

deneyin sonuçları süregelen iyileşme sürecinin bittiğini ve 11 operatörden daha kötü çözümlere ulaşıldığını göstermektedir.

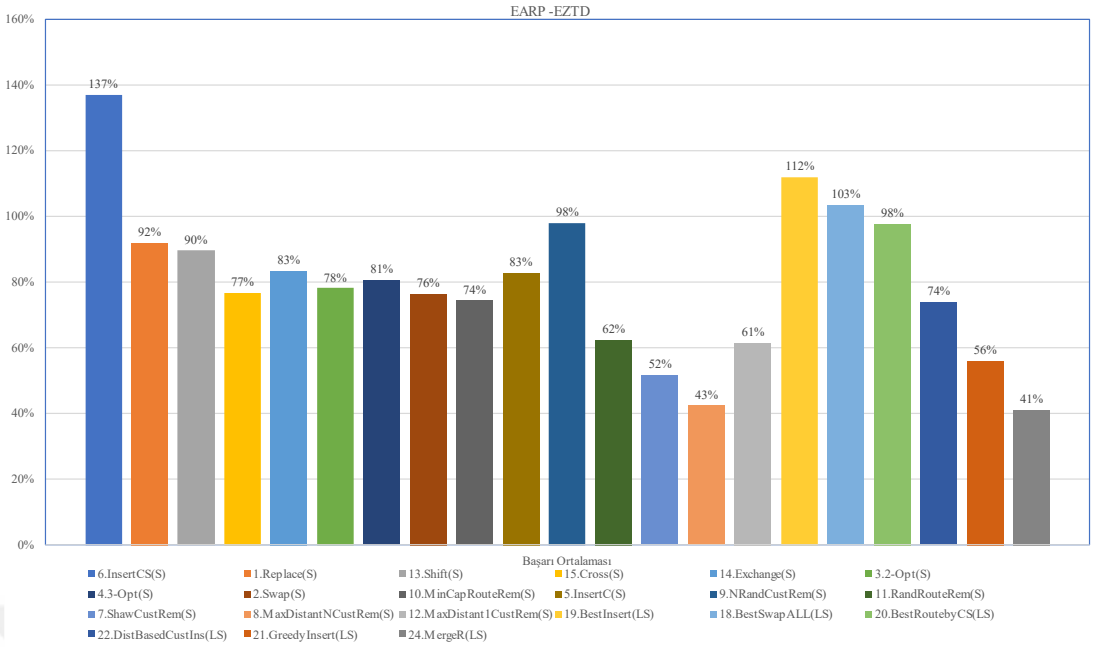
**Tablo 4.4:** EARP-ZP kapsamında operatör gruplarının performans karşılaştırması

| İndirgenmiş DKA-Boru KDA (V2) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Operatör Seti** | **28 Operatör** | | **16 Operatör** | | **11 Operatör** | | **8 Operatör** | |
| **Veri Seti** | **f** | **%** | **f** | **%** | **f** | **%** | **f** | **%** |
| C101_21 | 1293,85 | 18,50 | 1097,69 | 0,53 | 1091,85 | 0,00 | 1139,50 | 4,36 |
| C201_21 | 1051,98 | 22,34 | 859,86 | 0,00 | 882,67 | 2,65 | 871,27 | 1,33 |
| R101_21 | 2095,85 | 6,24 | 2053,07 | 4,07 | 1994,64 | 1,11 | 1972,75 | 0,00 |
| R201_21 | 1311,24 | 10,49 | 1204,51 | 1,49 | 1186,79 | 0,00 | 1219,10 | 2,72 |
| RC101_21 | 2307,20 | 11,78 | 2064,05 | 0,00 | 2107,41 | 2,10 | 2086,39 | 1,08 |
| RC201_21 | 1495,01 | 9,04 | 1409,73 | 2,82 | 1381,38 | 0,75 | 1371,06 | 0,00 |
| **Ortalama** | 1592,5 | **13,07** | 1448,2 | **1,49** | 1440,8 | **1,10** | 1443,3 | **1,58** |

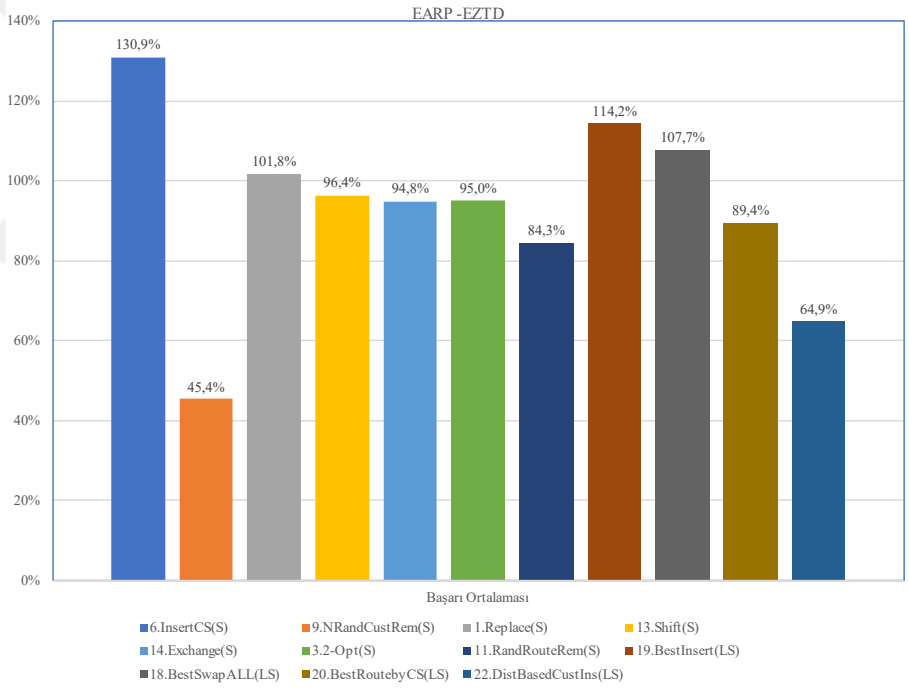
EARP-EZTD kapsamında DKA algoritmasında kullanılan operatörlerin çözüme ne kadar katkı sunduklarını analiz edebilmek için operatör performans testleri yapılmıştır. 6 veri seti üzerinde 600 saniye zaman sınırı ve 8 tekrar yapılarak DKA varyantlarından boru KDA'nın kullanıldığı İ-DKA (V2) 27 operatör dahil edilerek çalıştırılmıştır. Şekil 4.11'de sunulan performans puanlarına göre en az başarı puanına sahip 6 operatör çıkarılarak 21 operatör ile aynı parametrelerle yeniden çalıştırılmış ve Şekil 4.12'deki performans puanlarına ulaşılmıştır. 21 operatörden en düşük başarı oranına sahip 10 operatör daha çıkarılarak 11 operatör ile yeniden çalıştırılmış ve Şekil 4.7'de gösterilen sonuçlara ulaşılmıştır.




**Şekil 4.11:** EARP-EZTD kapsamında 27 operatöre ait başarı oranları




**Şekil 4.12:** EARP-EZTD kapsamında 21 operatöre ait başarı oranları



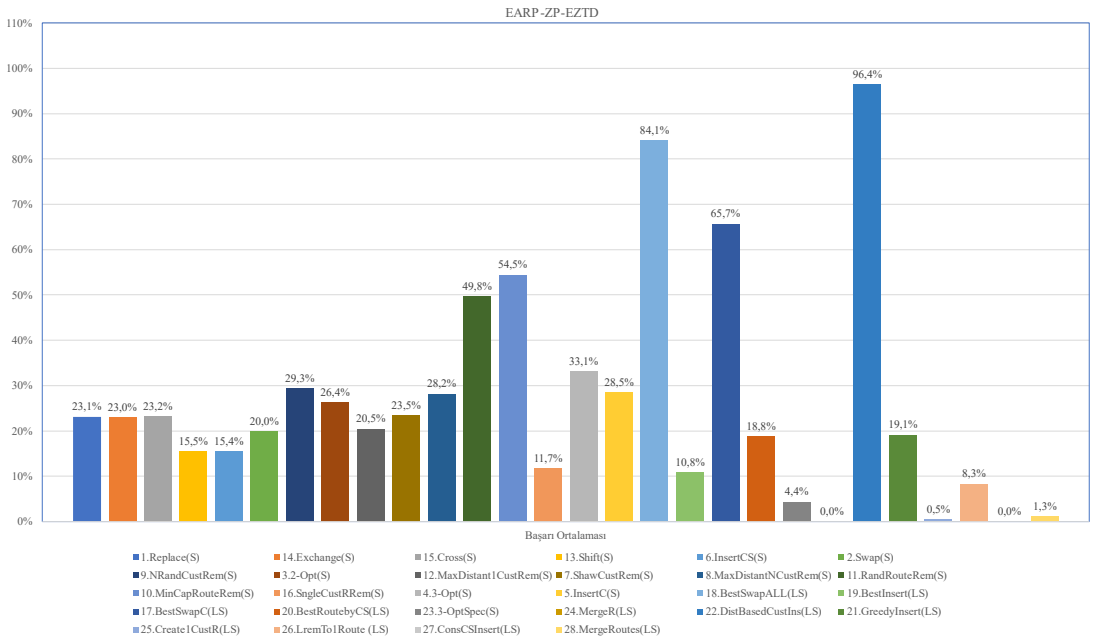

**Şekil 4.13:** EARP-EZTD kapsamında 11 operatöre ait başarı oranları

Her bir operatör grubu ile yapılan deneylere ait uygunluk değerleri Tablo 4.5'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere 11 operatörden en düşük başarı puanına sahip 3 operatörün daha çıkarılması ile elde edilen 8 operatörlü deneyin sonuçları süregelen iyileşme sürecinin bittiğini ve 11 operatörden daha kötü çözümlere ulaşıldığını göstermektedir.

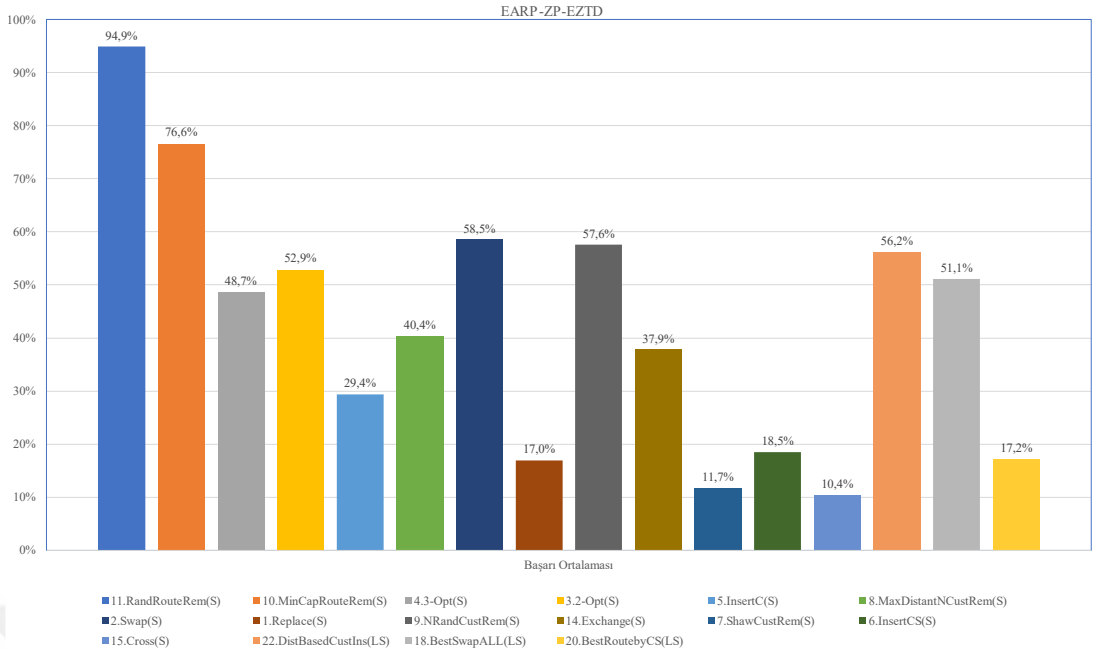
**Tablo 4.5:** EARP-EZTD kapsamında operatör gruplarının performans karşılaştırması

| İndirgenmiş DKA-Boru KDA (V2) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Operatör Seti** | **27 Operatör** | | **21 Operatör** | | **11 Operatör** | | **8 Operatör** | |
| **Veri Seti** | **f** | **%** | **f** | **%** | **f** | **%** | **f** | **%** |
| C101_21 | 832,96 | 12,05 | 755,01 | 1,56 | 743,41 | 0,00 | 1160,78 | 56,14 |
| C201_21 | 643,48 | 8,50 | 650,50 | 9,69 | 593,05 | 0,00 | 1002,06 | 68,97 |
| R101_21 | 894,66 | 4,61 | 927,59 | 8,46 | 855,23 | 0,00 | 1073,35 | 25,50 |
| R201_21 | 736,95 | 1,64 | 728,22 | 0,43 | 725,07 | 0,00 | 921,83 | 27,14 |
| RC101_21 | 986,16 | 10,09 | 895,76 | 0,00 | 902,97 | 0,80 | 1409,63 | 57,37 |
| RC201_21 | 759,22 | 1,46 | 752,26 | 0,53 | 748,30 | 0,00 | 1117,54 | 49,34 |
| **Ortalama** | 808,9 | **6,39** | 784,9 | **3,45** | 761,3 | **0,13** | 1114,2 | **47,41** |

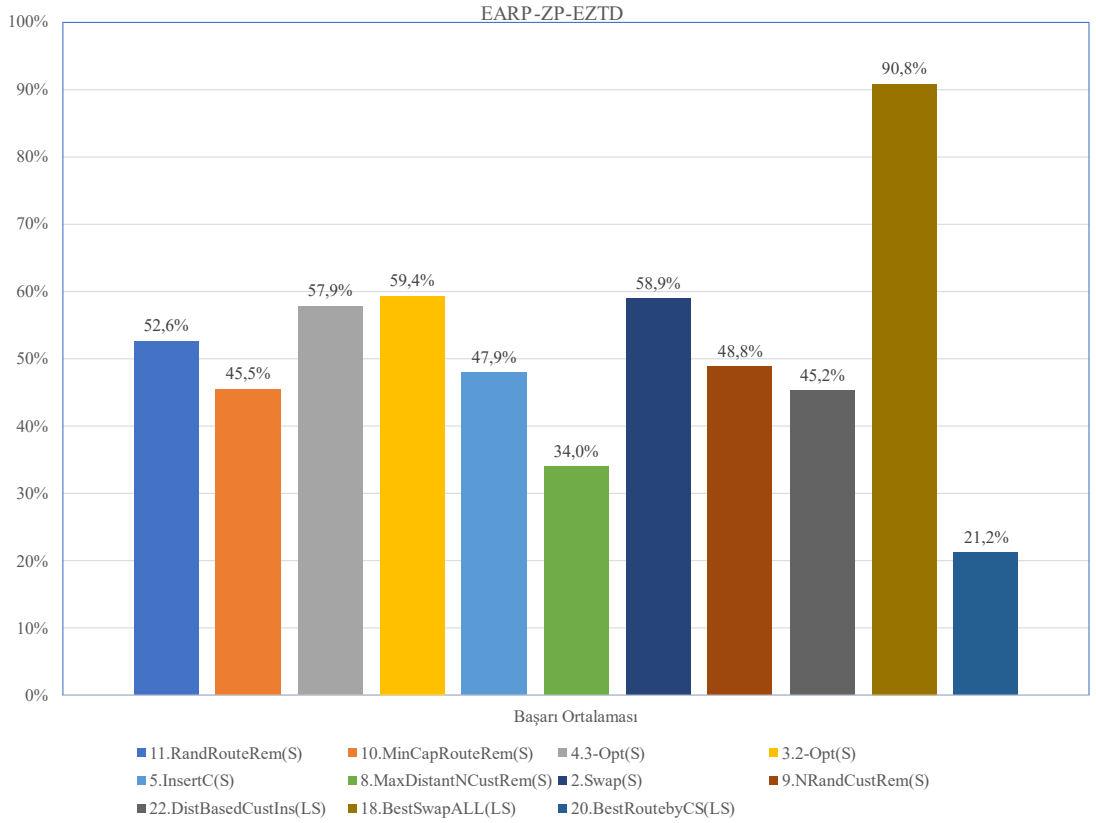
EARP-ZP-EZTD kapsamında DKA algoritmasında kullanılan operatörlerin çözüme ne kadar katkı sunduklarını analiz edebilmek için operatör performans testleri yapılmıştır. 6 veri seti üzerinde 600 saniye zaman sınırı ve 8 tekrar yapılarak DKA varyantlarından boru KDA'nın kullanıldığı İ-DKA (V2) 28 operatör dahil edilerek çalıştırılmıştır. Şekil 4.14'te sunulan performans puanlarına göre en az başarı puanına sahip 12 operatör çıkarılarak 16 operatör ile aynı parametrelerle yeniden çalıştırılmış ve Şekil 4.15'teki performans puanlarına ulaşılmıştır. 16 operatörden en düşük başarı oranına sahip 5 operatör daha çıkarılarak 11 operatör ile yeniden çalıştırılmış ve Şekil 4.16'da gösterilen sonuçlara ulaşılmıştır.




**Şekil 4.14:** EARP-ZP-EZTD kapsamında 28 operatöre ait başarı oranları




**Şekil 4.15:** EARP-ZP-EZTD kapsamında 16 operatöre ait başarı oranları




**Şekil 4.16:** EARP-ZP-EZTD kapsamında 11 operatöre ait başarı oranları

Her bir operatör grubu ile yapılan deneylere ait uygunluk değerleri Tablo 4.6'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere 11 operatörden en düşük başarı puanına sahip 3 operatörün daha çıkarılması ile elde

edilen 8 operatörlü deneyin sonuçları süregelen iyileşme sürecinin bittiğini ve 11 operatörden daha kötü çözümlere ulaşıldığını göstermektedir.

**Tablo 4.6:** EARP-ZP-EZTD kapsamında operatör gruplarının performans karşılaştırması

| | **İndirgenmiş DKA-Boru KDA (V2)** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Operatör Seti** | **28 Operatör** | | **16 Operatör** | | **11 Operatör** | | **8 Operatör** | |
| **Veri Seti** | **f** | **%** | **f** | **%** | **f** | **%** | **f** | **%** |
| C101_21 | 1309,59 | 20,83 | 1096,02 | 1,12 | 1083,85 | 0,00 | 1112,42 | 2,64 |
| C201_21 | 1051,98 | 22,34 | 859,86 | 0,00 | 885,51 | 2,98 | 871,27 | 1,33 |
| R101_21 | 2074,10 | 2,71 | 2053,17 | 1,67 | 2041,13 | 1,07 | 2019,43 | 0,00 |
| R201_21 | 1328,49 | 11,94 | 1204,51 | 1,49 | 1186,79 | 0,00 | 1219,10 | 2,72 |
| RC101_21 | 2259,62 | 9,36 | 2101,11 | 1,69 | 2066,22 | 0,00 | 2122,86 | 2,74 |
| RC201_21 | 1495,01 | 9,04 | 1409,73 | 2,82 | 1381,38 | 0,75 | 1371,06 | 0,00 |
| **Ortalama** | 1586,5 | **12,70** | 1454,1 | **1,47** | 1440,8 | **0,80** | 1452,7 | **1,57** |

# 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde önerilen DKA yaklaşımının performansını doğrulamak için EARP veri setleri kullanılarak hesaplamalı deneylere ait sonuçlar paylaşılmıştır. Kullanılan veri setleri, Schneider ve diğ. (2014) tarafından oluşturulan 36 küçük ve 56 büyük örnekten oluşur. Büyük örnekler, 100 müşterinin ve 21 şarj istasyonunun kümelendiği (C), rastgele dağıtıldığı (R) ve hem kümelendiği hem de rastgele dağıtıldığı (RC) üç ana veri seti grubunu içerir. Her veri seti grubunun, zaman pencerelerinin aralığı, araç yükü ve batarya kapasitelerine göre farklılık gösteren 1 ve 2 ile başlayan iki alt grubu bulunmaktadır. Küçük örnekler, her biri büyük örneklerden rastgele seçilen 5, 10 ve 15 müşteriyi içeren 12'şerden üç alt grubu bulunmaktadır.

Öncelikle EARP, EARP-ZP, EARP-EZTD ve EARP-ZP-EZTD olmak üzere 4 problem kapsamında geliştirilen matematiksel modeller; 5, 10 ve 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu veri setleri kullanılarak ILOG CPLEX ile çözülmüştür. Önerilen DKA çözüm yöntemi, MATLAB R2020b programında MATLAB programlama dili kullanılarak kodlanmıştır.

Küçük boyutlu veri setleri üzerinden, Bölüm 3.2'de doğruluğu test edilip ispatlanan kesin çözüm sonuçları ile önerilen DKA türlerine ait çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. 100 müşteriden oluşan büyük boyutlu veri setlerine ait kesin çözüm sonuçları olmadığı için her bir DKA türüne ait çözüm sonuçları, kendi arasında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Hem ILOG CPLEX hem de MATLAB ortamında yapılan deneylerin tümü Apple M1 Max işlemci, 32GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılarak yapılmıştır. Her bir problem, DKA türü ve veri seti için 10 tekrar yapılmıştır. CPLEX için 7200 (sn), DKA için ise veri setindeki müşteri sayısına göre değişen zaman sınırları koyulmuştur.

## 5.1 Matematiksel Modellere ait CPLEX Sonuçları

Küçük boyutlu veri setlerinin ILOG CPLEX ile çözümünden elde edilen sonuçlar, tez çalışmasında ele alınan 4 problem için karşılaştırmalı olarak, 5, 10 ve 15 müşteri grubu için sırasıyla Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te sunulmuştur. Tablolarda her bir problem için ilgili problem kapsamında veri setlerine ait toplam kat edilen mesafeyi gösteren uygunluk değerleri (f), kullanılan EA sayıları (m), optimal çözüme olan uzaklık (%) ve saniye olarak gösterilen çözüm süreleri (t) bulunmaktadır. En son satırda ise her bir değere ait ortalamalar hesaplanarak verilmiştir.

**Tablo 5.1:** 5 Müşterili veri setlerinin tüm problemler için kesin çözüm sonuçları

| | **EARP** | | | | **EARP-ZP** | | | | **EARP-EZTD** | | | | **EARP-ZP-EZTD** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Veri Seti | f | m | % | t | f | m | % | t | f | m | % | t | f | m | % | t |
| C101C5 | 208,90 | 1 | %0,0 | 2,47 | 247,15 | 3 | %0,0 | 2,44 | 208,90 | 1 | %0,0 | 1,35 | 247,15 | 3 | %0,0 | 2,45 |
| C103C5 | 154,50 | 1 | %0,0 | 2,01 | 165,67 | 2 | %0,0 | 2,01 | 154,50 | 1 | %0,0 | 1,20 | 165,67 | 2 | %0,0 | 1,85 |
| C206C5 | 201,55 | 1 | %0,0 | 2,73 | 236,58 | 2 | %0,0 | 2,85 | 201,55 | 1 | %0,0 | 1,92 | 236,58 | 2 | %0,0 | 3,37 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 1,98 | 158,48 | 1 | %0,0 | 2,17 | 158,48 | 1 | %0,0 | 1,34 | 158,48 | 1 | %0,0 | 2,29 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,28 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,07 | 136,69 | 2 | %0,0 | 1,75 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,44 |
| R105C5 | 139,48 | 1 | %0,0 | 2,30 | 156,08 | 2 | %0,0 | 1,98 | 139,48 | 1 | %0,0 | 1,23 | 156,08 | 2 | %0,0 | 2,04 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 1,78 | 128,78 | 1 | %0,0 | 2,33 | 128,78 | 1 | %0,0 | 1,29 | 128,78 | 1 | %0,0 | 2,34 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 3,00 | 179,06 | 1 | %0,0 | 2,14 | 179,06 | 1 | %0,0 | 1,37 | 179,06 | 1 | %0,0 | 2,53 |
| RC105C5 | 208,43 | 1 | %0,0 | 2,31 | 238,05 | 3 | %0,0 | 3,61 | 208,43 | 1 | %0,0 | 1,89 | 238,05 | 3 | %0,0 | 3,36 |
| RC108C5 | 211,53 | 1 | %0,0 | 1,94 | 253,93 | 2 | %0,0 | 2,68 | 211,53 | 1 | %0,0 | 1,36 | 253,93 | 2 | %0,0 | 4,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 3,37 | 176,39 | 1 | %0,0 | 2,43 | 176,39 | 1 | %0,0 | 2,54 | 176,39 | 1 | %0,0 | 3,51 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 3,28 | 167,98 | 1 | %0,0 | 2,24 | 167,98 | 1 | %0,0 | 2,29 | 167,98 | 1 | %0,0 | 3,00 |
| ORT | 172,65 | 1,1 | %0,0 | 2,45 | 187,07 | 1,8 | %0,0 | 2,41 | 172,65 | 1,1 | %0,0 | 1,63 | 187,07 | 1,8 | %0,0 | 2,77 |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **%:** CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye).

**Tablo 5.2:** 10 Müşterili veri setlerinin tüm problemler için kesin çözüm sonuçları

| | **EARP** | | | | **EARP-ZP** | | | | **EARP-EZTD** | | | | **EARP-ZP-EZTD** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Veri Seti | f | m | % | t | f | m | % | t | f | m | % | t | f | m | % | t |
| C101C10 | 260,01 | 1 | %0,0 | 34,70 | 402,25 | 4 | %21,2 | 7200 | 260,01 | 1 | %0,0 | 4,85 | 402,25 | 4 | %3,4 | 7200 |
| C104C10 | 239,13 | 1 | %0,0 | 8,51 | 273,93 | 2 | %0,0 | 307,74 | 239,13 | 1 | %0,0 | 3,39 | 273,93 | 2 | %0,0 | 123,42 |
| C202C10 | 214,96 | 1 | %0,0 | 20,82 | 243,20 | 2 | %0,0 | 10,28 | 214,96 | 1 | %0,0 | 4,12 | 243,20 | 2 | %0,0 | 30,95 |
| C205C10 | 224,78 | 1 | %0,0 | 102,89 | 228,28 | 2 | %0,0 | 29,97 | 224,78 | 1 | %0,0 | 4,45 | 228,28 | 2 | %0,0 | 82,70 |
| R102C10 | 220,97 | 1 | %0,0 | 90,70 | 249,19 | 3 | %0,0 | 78,68 | 220,97 | 1 | %0,0 | 19,01 | 249,19 | 3 | %0,0 | 49,65 |
| R103C10 | 160,41 | 2 | %0,0 | 62,67 | 202,85 | 3 | %0,0 | 1075,67 | 160,41 | 1 | %0,0 | 10,35 | 202,85 | 3 | %22,0 | 7200 |
| R201C10 | 183,11 | 1 | %0,0 | 51,31 | 228,36 | 2 | %0,0 | 1254 | 183,11 | 2 | %0,0 | 2,36 | 228,36 | 2 | %0,0 | 301,01 |
| R203C10 | 214,90 | 1 | %0,0 | 67,31 | 218,21 | 1 | %0,0 | 12,22 | 214,90 | 1 | %0,0 | 5,43 | 218,21 | 1 | %0,0 | 72,54 |
| RC102C10 | 346,70 | 2 | %0,0 | 4,82 | 423,51 | 4 | %0,0 | 7,53 | 346,70 | 2 | %0,0 | 4,03 | 436,05 | 5 | %16,1 | 7200 |
| RC108C10 | 317,96 | 1 | %0,0 | 2,68 | 345,93 | 3 | %0,0 | 72,95 | 317,96 | 1 | %0,0 | 6,00 | 345,93 | 3 | %0,0 | 108,40 |
| RC201C10 | 246,99 | 1 | %0,0 | 5,70 | 316,53 | 3 | %3,2 | 7200 | 246,99 | 1 | %0,0 | 5,26 | 316,53 | 3 | %2,5 | 7200 |
| RC205C10 | 306,82 | 2 | %0,0 | 3,89 | 325,98 | 2 | %0,0 | 10,14 | 306,82 | 2 | %0,0 | 4,14 | 325,98 | 2 | %0,0 | 88,24 |
| ORT | 244,73 | 1,3 | %0,0 | 38,00 | 288,19 | 2,6 | %2,0 | 1438,27 | 244,73 | 1,1 | %0,0 | 6,12 | 289,23 | 2,7 | %3,7 | 2471,41 |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **%:** CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye).

**Tablo 5.3:** 15 Müşterili veri setlerinin tüm problemler için kesin çözüm sonuçları

| | EARP | | | | EARP-ZP | | | | EARP-EZTD | | | | EARP-ZP-EZTD | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Veri Seti | f | m | % | t | f | m | % | t | f | m | % | t | f | m | % | t |
| C103C15 | 279,57 | 2 | %0,0 | 21,07 | 375,17 | 4 | %23,0 | 7200 | 255,68 | 2 | %0,0 | 30,81 | 375,17 | 4 | %16,9 | 7200 |
| C106C15 | 223,84 | 2 | %0,0 | 34,45 | 275,13 | 3 | %0,0 | 57,60 | 223,84 | 1 | %0,0 | 142,65 | 275,13 | 3 | %0,0 | 6,42 |
| C202C15 | 314,62 | 1 | %0,0 | 26,86 | 376,79 | 3 | %0,0 | 1136 | 314,62 | 1 | %0,0 | 373,20 | 376,79 | 3 | %0,0 | 2695 |
| C208C15 | 262,50 | 1 | %0,0 | 2,14 | 300,55 | 2 | %0,0 | 291,03 | 262,50 | 2 | %0,0 | 244,40 | 300,55 | 2 | %0,0 | 43,00 |
| R102C15 | 258,59 | 1 | %0,0 | 203,24 | 413,93 | 5 | %13,4 | 7200 | 258,59 | 1 | %0,0 | 681,12 | - | - | - | - |
| R105C15 | 241,64 | 2 | %0,0 | 119,88 | 336,15 | 4 | %0,0 | 101,58 | 231,96 | 1 | %0,0 | 119,88 | 336,15 | 4 | %0,0 | 211,42 |
| R202C15 | 275,04 | 1 | %0,0 | 106,10 | 358,00 | 2 | %0,0 | 2309 | 275,04 | 1 | %0,0 | 64,31 | 358,00 | 2 | %0,0 | 1546 |
| R209C15 | 239,70 | 1 | %0,0 | 3,96 | 307,68 | 3 | %0,0 | 146,95 | 239,70 | 1 | %0,0 | 49,60 | 315,78 | 3 | %18,1 | 7200 |
| RC103C15 | 299,22 | 2 | %0,0 | 538,12 | 394,65 | 4 | %11,8 | 7200 | 291,07 | 1 | %0,0 | 52,73 | 398,92 | 5 | %18,4 | 7200 |
| RC108C15 | 330,01 | 2 | %0,0 | 145,09 | 370,25 | 3 | %0,0 | 4854 | 330,01 | 2 | %0,0 | 1197 | 378,36 | 3 | %0,0 | 4637 |
| RC202C15 | 295,60 | 1 | %0,0 | 7,32 | 394,39 | 2 | %0,0 | 234,71 | 295,60 | 1 | %0,0 | 87,00 | 394,39 | 2 | %0,0 | 679,55 |
| RC204C15 | 285,13 | 1 | %0,0 | 150,25 | 310,57 | 2 | %0,0 | 6708 | 285,13 | 1 | %0,0 | 29,20 | 310,58 | 2 | %0,0 | 192,67 |
| ORT | 275,45 | 1,4 | %0,0 | 113,21 | 351,11 | 3,1 | %4,0 | 3120,00 | 271,98 | 1,3 | %0,0 | 256,01 | 347,26 | 3,0 | %4,8 | 2873,83 |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **%:** CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye).

Tablo 5.1'de bulunan 5 müşterili veri setlerinin tümünde ve tüm problem çeşitlerinde optimal çözümlere ulaşılmıştır. 10 ve 15 müşteriden oluşan veri setlerinde ise EARP ve EARP-EZTD problemleri kapsamındaki tüm çözümler optimal iken, zaman penceresi kısıtının bulunduğu diğer iki probleme ait çözümlerin bazılarında 7200 saniye içinde optimal sonuca ulaşılamamıştır. Tablo 5.3'te bulunan R102C15 numaralı veri setinin EARP-ZP-EZTD kapsamında 7200 saniye sonunda aralıklı (gap) da olsa uygun bir çözüm bulunamamıştır.

## 5.2 Küçük Boyutlu Veri Setleri Kapsamında Sezgisel Algoritma ile CPLEX Sonuçlarının Karşılaştırması

Bir önceki bölümde EARP, EARP-ZP, EARP-EZTD ve EARP-ZP-EZTD'nin CPLEX ile çözülerek elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu bölümde ise aynı veri setleri ve problemler için DKA türevleri kullanılarak elde edilen çözüm sonuçları CPLEX sonuçları ile karşılaştırılarak sunulmuştur.

5, 10 ve 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu veri setleri için her bir model için ilgili alt başlık altında deneysel sonuçlar verilmiştir. Tabloların ilk sütununda ilgili veri setlerinin adları verilirken, ikinci sütunda CPLEX çözümüne ait toplam mesafe (f), üçüncü sütunda CPLEX çözümünde kullanılan EA sayısı (m), dördüncü sütunda CPLEX ile bulunan en iyi sonuç ve en iyi alt sınır arasındaki fark (Gap%), beşinci sütunda CPLEX'e ait çözüm süresi verilirken, devam eden her dört sütunda ilgili DKA

türevine ait çözüm sonuçları verilmiştir. DKA sonuçlarındaki mesafe (f) ve EA sayısı (m) 10 tekrarda elde edilen en iyi (en kısa mesafe) çözüme aitken, çözüm süresi (t) 10 tekrara ait sürelerin ortalamasıdır. En altta bulunan satırda ise ilgili sütundaki tüm sonuçların ortalamaları sunulmuştur.

### 5.2.1 Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, EARP'nin çözümü için geliştirilen DKA türevleri ile CPLEX'ten elde edilen çözüm sonuçları karşılaştırılacaktır. Bu kıyaslamanın amacı, DKA türevlerinin EARP'yi çözmekteki etkinliğini ve performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve CPLEX ile elde edilen sonuçlara göre ne kadar başarılı olduklarını anlamaktır.

Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarının kullanılmasıyla tasarlanan 12 DKA versiyonuna ait tüm sonuçlar tek tabloya sığmadığı için iki tablo olarak sunulmuştur. 5 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.4'te; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.5'te verilmiştir. 10 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.6'da; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.7'de verilmiştir. 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.8'de; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.9'da verilmiştir.

**Tablo 5.4:** EARP 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C5 | 208,90 | 1 | %0,0 | 2,47 | 208,90 | 1 | 0,09 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,71 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,72 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,75 | 0,00 |
| C103C5 | 154,50 | 1 | %0,0 | 2,01 | 154,50 | 1 | 0,06 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,05 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,07 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,54 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,41 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,44 | 0,00 |
| C206C5 | 201,55 | 1 | %0,0 | 2,73 | 201,55 | 1 | 0,06 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,13 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,05 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,08 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,09 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,09 | 0,00 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 1,98 | 158,48 | 1 | 0,25 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,34 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,30 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,17 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,27 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,24 | 0,00 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,28 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| R105C5 | 139,48 | 1 | %0,0 | 2,30 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 1,78 | 128,78 | 1 | 0,36 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,70 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,15 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,20 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,21 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,15 | 0,00 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 3,00 | 179,06 | 1 | 0,12 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,00 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,27 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,00 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,00 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,00 | 0,00 |
| RC105C5 | 208,43 | 1 | %0,0 | 2,31 | 208,43 | 1 | 0,11 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,11 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,19 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,15 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,12 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,23 | 0,00 |
| RC108C5 | 211,53 | 1 | %0,0 | 1,94 | 211,53 | 1 | 0,12 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,07 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,12 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,12 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,13 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,21 | 0,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 3,37 | 176,39 | 1 | 0,02 | 0,00 | 179,16 | 1 | 0,25 | 1,57 | 176,39 | 1 | 0,02 | 0,00 | 179,16 | 1 | 4,17 | 1,57 | 179,16 | 1 | 0,32 | 1,57 | 179,16 | 1 | 0,39 | 1,57 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 3,28 | 167,98 | 1 | 0,52 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,12 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,04 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,10 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,37 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,31 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **2,45** | | | **0,14** | **0,00** | | | **0,15** | **0,13** | | | **0,11** | **0,00** | | | **0,52** | **0,13** | | | **0,22** | **0,13** | | | **0,23** | **0,13** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%:** DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.5:** EARP 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C5 | 208,90 | 1 | %0,0 | 2,47 | 208,90 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,08 | 0,00 | 208,90 | 1 | 1,09 | 0,00 | 208,90 | 1 | 1,08 | 0,00 | 208,90 | 1 | 1,07 | 0,00 |
| C103C5 | 154,50 | 1 | %0,0 | 2,01 | 154,50 | 1 | 0,38 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,41 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,36 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,76 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,37 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,39 | 0,00 |
| C206C5 | 201,55 | 1 | %0,0 | 2,73 | 201,55 | 1 | 0,04 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,05 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,05 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,50 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,36 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,56 | 0,00 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 1,98 | 158,48 | 1 | 0,11 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,13 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,17 | 0,00 | 158,48 | 1 | 1,15 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,67 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,65 | 0,00 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,28 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| R105C5 | 139,48 | 1 | %0,0 | 2,30 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 1,78 | 128,78 | 1 | 0,62 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,35 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,19 | 0,00 | 128,78 | 1 | 2,95 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,44 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,41 | 0,00 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 3,00 | 179,06 | 1 | 0,03 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,14 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,13 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,36 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,35 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,19 | 0,00 |
| RC105C5 | 208,43 | 1 | %0,0 | 2,31 | 208,43 | 1 | 0,10 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,41 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,31 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,34 | 0,00 |
| RC108C5 | 211,53 | 1 | %0,0 | 1,94 | 211,53 | 1 | 0,10 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,08 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,06 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,67 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,48 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,46 | 0,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 3,37 | 179,16 | 1 | 0,06 | 1,57 | 179,16 | 1 | 0,28 | 1,57 | 179,16 | 1 | 0,35 | 1,57 | 176,39 | 1 | 0,71 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,53 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,48 | 0,00 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 3,28 | 167,98 | 1 | 0,06 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,05 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,05 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,75 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,57 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,52 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **2,45** | | | **0,13** | **0,13** | | | **0,14** | **0,13** | | | **0,13** | **0,13** | | | **0,78** | **0,00** | | | **0,43** | **0,00** | | | **0,42** | **0,00** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.6:** EARP 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C10 | 260,01 | 1 | %0,0 | 34,70 | 260,01 | 1 | 7,28 | 0,00 | 260,01 | 1 | 22,36 | 0,00 | 260,01 | 1 | 7,11 | 0,00 | 265,75 | 1 | 1,36 | 2,21 | 260,01 | 1 | 23,43 | 0,00 | 260,01 | 1 | 15,12 | 0,00 |
| C104C10 | 239,13 | 1 | %0,0 | 8,51 | 239,13 | 1 | 3,57 | 0,00 | 239,13 | 1 | 2,22 | 0,00 | 239,13 | 1 | 6,80 | 0,00 | 239,13 | 1 | 2,73 | 0,00 | 239,13 | 1 | 3,09 | 0,00 | 239,13 | 1 | 4,88 | 0,00 |
| C202C10 | 214,96 | 1 | %0,0 | 20,82 | 214,96 | 1 | 9,29 | 0,00 | 214,96 | 1 | 10,28 | 0,00 | 214,96 | 1 | 8,84 | 0,00 | 235,40 | 1 | 0,50 | 9,51 | 214,96 | 1 | 21,46 | 0,00 | 214,96 | 1 | 12,37 | 0,00 |
| C205C10 | 224,78 | 1 | %0,0 | 102,89 | 224,78 | 1 | 2,64 | 0,00 | 224,78 | 1 | 1,15 | 0,00 | 224,78 | 1 | 3,18 | 0,00 | 224,78 | 1 | 2,80 | 0,00 | 224,78 | 1 | 3,10 | 0,00 | 224,78 | 1 | 4,29 | 0,00 |
| R102C10 | 220,97 | 1 | %0,0 | 90,70 | 220,97 | 2 | 1,45 | 0,00 | 234,63 | 1 | 0,31 | 6,18 | 220,97 | 1 | 0,75 | 0,00 | 234,63 | 1 | 0,19 | 6,18 | 234,63 | 1 | 0,18 | 6,18 | 234,63 | 1 | 0,36 | 6,18 |
| R103C10 | 160,41 | 2 | %0,0 | 62,67 | 164,58 | 1 | 9,39 | 2,60 | 160,41 | 1 | 11,76 | 0,00 | 160,41 | 1 | 9,28 | 0,00 | 167,49 | 1 | 0,83 | 4,41 | 164,58 | 1 | 10,34 | 2,60 | 160,41 | 1 | 14,53 | 0,00 |
| R201C10 | 183,11 | 1 | %0,0 | 51,31 | 197,54 | 1 | 2,02 | 7,88 | 183,11 | 1 | 6,34 | 0,00 | 183,11 | 1 | 3,28 | 0,00 | 197,90 | 1 | 0,63 | 8,08 | 197,54 | 1 | 1,01 | 7,88 | 197,54 | 1 | 1,35 | 7,88 |
| R203C10 | 214,90 | 1 | %0,0 | 67,31 | 214,90 | 1 | 3,07 | 0,00 | 214,90 | 1 | 3,94 | 0,00 | 214,90 | 1 | 10,02 | 0,00 | 232,68 | 1 | 0,66 | 8,28 | 214,90 | 1 | 4,96 | 0,00 | 214,90 | 1 | 1,01 | 0,00 |
| RC102C10 | 346,70 | 2 | %0,0 | 4,82 | 346,70 | 1 | 3,26 | 0,00 | 346,70 | 1 | 5,18 | 0,00 | 346,70 | 1 | 1,38 | 0,00 | 346,70 | 1 | 12,18 | 0,00 | 346,70 | 1 | 4,89 | 0,00 | 346,70 | 1 | 5,79 | 0,00 |
| RC108C10 | 317,96 | 1 | %0,0 | 2,68 | 317,96 | 1 | 12,11 | 0,00 | 317,96 | 1 | 2,55 | 0,00 | 329,93 | 1 | 2,58 | 3,76 | 329,93 | 1 | 1,35 | 3,76 | 329,93 | 1 | 3,35 | 3,76 | 317,96 | 1 | 19,02 | 0,00 |
| RC201C10 | 246,99 | 1 | %0,0 | 5,70 | 246,99 | 1 | 4,34 | 0,00 | 246,99 | 1 | 0,71 | 0,00 | 246,99 | 1 | 9,30 | 0,00 | 246,99 | 1 | 1,02 | 0,00 | 246,99 | 1 | 1,90 | 0,00 | 246,99 | 1 | 1,45 | 0,00 |
| RC205C10 | 306,82 | 2 | %0,0 | 3,89 | 306,82 | 1 | 1,19 | 0,00 | 306,82 | 1 | 0,38 | 0,00 | 306,82 | 1 | 0,77 | 0,00 | 306,82 | 1 | 0,26 | 0,00 | 306,82 | 1 | 2,93 | 0,00 | 306,82 | 1 | 0,96 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **38,00** | | | **4,97** | **0,87** | | | **5,60** | **0,52** | | | **5,27** | **0,31** | | | **2,04** | **3,54** | | | **6,72** | **1,70** | | | **6,76** | **1,17** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.7:** EARP 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C10 | 260,01 | 1 | %0,0 | 34,70 | 260,01 | 1 | 9,63 | 0,00 | 260,01 | 1 | 20,44 | 0,00 | 260,01 | 1 | 17,14 | 0,00 | 265,75 | 1 | 4,59 | 2,21 | 265,75 | 1 | 3,73 | 2,21 | 260,01 | 1 | 14,75 | 0,00 |
| C104C10 | 239,13 | 1 | %0,0 | 8,51 | 239,13 | 1 | 2,47 | 0,00 | 239,13 | 1 | 2,35 | 0,00 | 239,13 | 1 | 9,59 | 0,00 | 239,13 | 1 | 10,22 | 0,00 | 242,79 | 1 | 13,34 | 1,53 | 239,13 | 1 | 15,16 | 0,00 |
| C202C10 | 214,96 | 1 | %0,0 | 20,82 | 214,96 | 1 | 9,39 | 0,00 | 214,96 | 1 | 1,84 | 0,00 | 214,96 | 1 | 4,61 | 0,00 | 214,96 | 1 | 4,63 | 0,00 | 214,96 | 1 | 14,57 | 0,00 | 230,29 | 1 | 20,71 | 7,13 |
| C205C10 | 224,78 | 1 | %0,0 | 102,89 | 224,78 | 1 | 0,67 | 0,00 | 224,78 | 1 | 0,93 | 0,00 | 224,78 | 1 | 0,68 | 0,00 | 224,78 | 1 | 3,51 | 0,00 | 224,78 | 1 | 2,92 | 0,00 | 224,78 | 1 | 2,74 | 0,00 |
| R102C10 | 220,97 | 1 | %0,0 | 90,70 | 234,63 | 1 | 0,38 | 6,18 | 234,63 | 1 | 0,24 | 6,18 | 234,63 | 1 | 0,34 | 6,18 | 234,63 | 1 | 1,86 | 6,18 | 220,97 | 1 | 9,04 | 0,00 | 234,63 | 1 | 1,74 | 6,18 |
| R103C10 | 160,41 | 2 | %0,0 | 62,67 | 160,41 | 1 | 18,49 | 0,00 | 160,41 | 1 | 15,92 | 0,00 | 164,58 | 1 | 7,80 | 2,60 | 160,41 | 1 | 10,25 | 0,00 | 160,41 | 1 | 11,73 | 0,00 | 160,41 | 1 | 2,34 | 0,00 |
| R201C10 | 183,11 | 1 | %0,0 | 51,31 | 183,11 | 1 | 2,76 | 0,00 | 188,86 | 1 | 28,54 | 3,14 | 183,11 | 1 | 2,90 | 0,00 | 192,21 | 1 | 7,32 | 4,97 | 183,11 | 1 | 28,50 | 0,00 | 188,86 | 1 | 18,81 | 3,14 |
| R203C10 | 214,90 | 1 | %0,0 | 67,31 | 214,90 | 1 | 8,51 | 0,00 | 214,90 | 1 | 1,84 | 0,00 | 214,90 | 1 | 4,44 | 0,00 | 214,90 | 1 | 4,20 | 0,00 | 215,42 | 1 | 10,72 | 0,24 | 214,90 | 1 | 8,38 | 0,00 |
| RC102C10 | 346,70 | 2 | %0,0 | 4,82 | 354,31 | 1 | 0,91 | 2,20 | 346,70 | 1 | 2,41 | 0,00 | 346,70 | 1 | 3,11 | 0,00 | 346,70 | 1 | 12,18 | 0,00 | 346,70 | 1 | 5,19 | 0,00 | 346,70 | 1 | 16,83 | 0,00 |
| RC108C10 | 317,96 | 1 | %0,0 | 2,68 | 317,96 | 1 | 0,42 | 0,00 | 329,93 | 1 | 1,47 | 3,76 | 317,96 | 1 | 20,64 | 0,00 | 317,96 | 1 | 5,19 | 0,00 | 317,96 | 1 | 1,30 | 0,00 | 317,96 | 1 | 2,57 | 0,00 |
| RC201C10 | 246,99 | 1 | %0,0 | 5,70 | 246,99 | 1 | 14,33 | 0,00 | 247,26 | 1 | 0,75 | 0,11 | 246,99 | 1 | 0,69 | 0,00 | 246,99 | 1 | 7,19 | 0,00 | 246,99 | 1 | 3,97 | 0,00 | 246,99 | 1 | 4,89 | 0,00 |
| RC205C10 | 306,82 | 2 | %0,0 | 3,89 | 306,82 | 1 | 0,55 | 0,00 | 306,82 | 1 | 0,47 | 0,00 | 306,82 | 1 | 0,41 | 0,00 | 306,82 | 1 | 1,32 | 0,00 | 306,82 | 1 | 1,05 | 0,00 | 306,82 | 1 | 1,07 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **38,00** | | | **5,71** | **0,70** | | | **6,43** | **1,10** | | | **6,03** | **0,73** | | | **6,04** | **1,11** | | | **8,84** | **0,33** | | | **9,17** | **1,37** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.8:** EARP 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C103C15 | 279,57 | 2 | %0,0 | 21,07 | 280,19 | 2 | 28,07 | 0,22 | 280,19 | 2 | 23,63 | 0,22 | 279,57 | 2 | 19,59 | 0,00 | 280,19 | 2 | 80,37 | 0,22 | 290,61 | 2 | 1,61 | 3,95 | 280,19 | 2 | 38,45 | 0,22 |
| C106C15 | 223,84 | 2 | %0,0 | 34,45 | 240,98 | 1 | 22,12 | 7,66 | 223,84 | 1 | 7,21 | 0,00 | 223,84 | 1 | 3,07 | 0,00 | 226,81 | 1 | 63,46 | 1,33 | 223,84 | 1 | 90,45 | 0,00 | 245,73 | 1 | 88,96 | 9,78 |
| C202C15 | 314,62 | 1 | %0,0 | 26,86 | 314,62 | 1 | 28,70 | 0,00 | 314,62 | 1 | 25,91 | 0,00 | 330,87 | 1 | 32,95 | 5,17 | 351,63 | 1 | 20,25 | 11,76 | 317,96 | 1 | 28,88 | 1,06 | 314,62 | 1 | 75,38 | 0,00 |
| C208C15 | 262,50 | 1 | %0,0 | 2,14 | 262,50 | 1 | 4,97 | 0,00 | 262,50 | 1 | 5,17 | 0,00 | 262,50 | 1 | 3,27 | 0,00 | 262,50 | 1 | 29,50 | 0,00 | 262,50 | 1 | 4,54 | 0,00 | 262,50 | 1 | 2,88 | 0,00 |
| R102C15 | 258,59 | 1 | %0,0 | 203,24 | 259,79 | 1 | 56,54 | 0,46 | 258,59 | 1 | 55,15 | 0,00 | 258,59 | 1 | 22,35 | 0,00 | 258,59 | 1 | 32,57 | 0,00 | 259,79 | 1 | 17,62 | 0,46 | 258,59 | 1 | 52,95 | 0,00 |
| R105C15 | 241,64 | 2 | %0,0 | 119,88 | 243,24 | 2 | 80,58 | 0,66 | 251,78 | 2 | 10,71 | 4,20 | 251,78 | 2 | 38,79 | 4,20 | 245,56 | 2 | 69,93 | 1,62 | 241,64 | 2 | 30,29 | 0,00 | 241,64 | 2 | 57,55 | 0,00 |
| R202C15 | 275,04 | 1 | %0,0 | 106,10 | 275,04 | 1 | 16,22 | 0,00 | 275,04 | 1 | 35,94 | 0,00 | 275,04 | 1 | 12,47 | 0,00 | 276,53 | 1 | 58,96 | 0,54 | 313,08 | 1 | 24,13 | 13,83 | 275,04 | 1 | 69,47 | 0,00 |
| R209C15 | 239,70 | 1 | %0,0 | 3,96 | 239,70 | 1 | 7,82 | 0,00 | 239,70 | 1 | 37,74 | 0,00 | 239,70 | 1 | 17,77 | 0,00 | 239,70 | 1 | 56,10 | 0,00 | 239,70 | 1 | 49,71 | 0,00 | 239,70 | 1 | 14,77 | 0,00 |
| RC103C15 | 299,22 | 2 | %0,0 | 538,12 | 299,22 | 2 | 75,41 | 0,00 | 299,22 | 2 | 15,81 | 0,00 | 299,22 | 2 | 7,10 | 0,00 | 318,39 | 2 | 28,17 | 6,41 | 299,22 | 2 | 79,27 | 0,00 | 318,39 | 2 | 20,82 | 6,41 |
| RC108C15 | 330,01 | 2 | %0,0 | 145,09 | 330,01 | 2 | 38,06 | 0,00 | 385,20 | 2 | 2,18 | 16,72 | 330,01 | 2 | 9,53 | 0,00 | 385,20 | 2 | 0,92 | 16,72 | 385,20 | 2 | 1,68 | 16,72 | 385,20 | 2 | 1,67 | 16,72 |
| RC202C15 | 295,60 | 1 | %0,0 | 7,32 | 315,22 | 1 | 21,80 | 6,64 | 295,67 | 1 | 61,07 | 0,03 | 295,60 | 1 | 55,64 | 0,00 | 315,22 | 1 | 24,93 | 6,64 | 315,22 | 1 | 44,61 | 6,64 | 295,67 | 1 | 17,22 | 0,03 |
| RC204C15 | 285,13 | 1 | %0,0 | 150,25 | 285,13 | 1 | 11,67 | 0,00 | 285,13 | 1 | 6,37 | 0,00 | 285,13 | 1 | 6,25 | 0,00 | 285,13 | 1 | 37,35 | 0,00 | 288,83 | 1 | 17,63 | 1,30 | 285,13 | 1 | 15,45 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **113,21** | | | **32,66** | **1,30** | | | **23,91** | **1,76** | | | **19,07** | **0,78** | | | **41,88** | **3,77** | | | **32,54** | **3,66** | | | **37,96** | **2,76** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.9:** EARP 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C103C15 | 279,57 | 2 | %0,0 | 21,07 | 280,19 | 2 | 19,93 | 0,22 | 280,19 | 2 | 36,92 | 0,22 | 280,19 | 2 | 4,39 | 0,22 | 280,19 | 2 | 20,79 | 0,22 | 280,19 | 2 | 29,29 | 0,22 | 280,19 | 2 | 6,69 | 0,22 |
| C106C15 | 223,84 | 2 | %0,0 | 34,45 | 223,84 | 1 | 6,52 | 0,00 | 223,84 | 1 | 13,68 | 0,00 | 223,84 | 1 | 71,20 | 0,00 | 223,84 | 1 | 74,26 | 0,00 | 223,84 | 1 | 42,02 | 0,00 | 223,84 | 1 | 25,71 | 0,00 |
| C202C15 | 314,62 | 1 | %0,0 | 26,86 | 314,62 | 1 | 19,38 | 0,00 | 326,61 | 1 | 58,88 | 3,81 | 326,57 | 1 | 51,36 | 3,80 | 325,12 | 1 | 86,07 | 3,34 | 343,67 | 1 | 7,18 | 9,23 | 330,97 | 1 | 76,21 | 5,20 |
| C208C15 | 262,50 | 1 | %0,0 | 2,14 | 262,50 | 1 | 7,07 | 0,00 | 262,50 | 1 | 7,32 | 0,00 | 262,50 | 1 | 4,58 | 0,00 | 262,50 | 1 | 6,57 | 0,00 | 262,50 | 1 | 5,06 | 0,00 | 262,50 | 2 | 3,28 | 0,00 |
| R102C15 | 258,59 | 1 | %0,0 | 203,24 | 258,59 | 1 | 68,51 | 0,00 | 258,59 | 1 | 46,26 | 0,00 | 258,59 | 1 | 15,80 | 0,00 | 259,79 | 1 | 10,15 | 0,46 | 259,79 | 1 | 10,07 | 0,46 | 259,79 | 1 | 11,53 | 0,46 |
| R105C15 | 241,64 | 2 | %0,0 | 119,88 | 251,78 | 2 | 9,50 | 4,20 | 248,63 | 2 | 36,73 | 2,89 | 243,24 | 2 | 24,69 | 0,66 | 251,14 | 2 | 25,81 | 3,93 | 251,70 | 2 | 20,16 | 4,16 | 244,71 | 2 | 68,94 | 1,27 |
| R202C15 | 275,04 | 1 | %0,0 | 106,10 | 275,04 | 1 | 13,12 | 0,00 | 275,04 | 1 | 48,65 | 0,00 | 275,04 | 1 | 26,55 | 0,00 | 289,51 | 1 | 81,61 | 5,26 | 306,78 | 1 | 34,22 | 11,54 | 289,51 | 1 | 41,82 | 5,26 |
| R209C15 | 239,70 | 1 | %0,0 | 3,96 | 239,70 | 1 | 48,32 | 0,00 | 240,44 | 1 | 15,68 | 0,31 | 239,70 | 1 | 26,06 | 0,00 | 252,10 | 1 | 41,24 | 5,17 | 251,36 | 1 | 32,51 | 4,86 | 239,70 | 1 | 3,70 | 0,00 |
| RC103C15 | 299,22 | 2 | %0,0 | 538,12 | 299,22 | 2 | 60,80 | 0,00 | 332,39 | 2 | 0,95 | 11,09 | 299,22 | 2 | 21,42 | 0,00 | 332,39 | 2 | 31,05 | 11,09 | 323,42 | 2 | 51,05 | 8,09 | 320,62 | 2 | 66,39 | 7,15 |
| RC108C15 | 330,01 | 2 | %0,0 | 145,09 | 330,01 | 2 | 7,82 | 0,00 | 330,01 | 2 | 18,86 | 0,00 | 345,08 | 2 | 24,19 | 4,57 | 365,94 | 2 | 29,20 | 10,89 | 356,79 | 2 | 68,51 | 8,12 | 332,40 | 2 | 71,57 | 0,72 |
| RC202C15 | 295,60 | 1 | %0,0 | 7,32 | 315,22 | 1 | 67,76 | 6,64 | 315,22 | 1 | 76,01 | 6,64 | 303,81 | 1 | 53,67 | 2,78 | 323,35 | 1 | 37,51 | 9,39 | 330,27 | 1 | 74,64 | 11,73 | 319,32 | 1 | 38,56 | 8,03 |
| RC204C15 | 285,13 | 1 | %0,0 | 150,25 | 286,56 | 1 | 21,21 | 0,50 | 285,13 | 1 | 25,62 | 0,00 | 285,37 | 1 | 16,32 | 0,08 | 285,13 | 1 | 79,82 | 0,00 | 286,56 | 1 | 35,07 | 0,50 | 285,13 | 1 | 51,29 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **113,21** | | | **29,16** | **0,96** | | | **32,13** | **2,08** | | | **28,35** | **1,01** | | | **43,67** | **4,15** | | | **34,15** | **4,91** | | | **38,81** | **2,36** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

### 5.2.2 Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, EARP-ZP'nin çözümü için geliştirilen DKA türevleri ile CPLEX'ten elde edilen çözüm sonuçları karşılaştırılacaktır. Bu kıyaslamanın amacı, DKA türevlerinin EARP-ZP'yi çözmekteki etkinliğini ve performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve CPLEX ile elde edilen sonuçlara göre ne kadar başarılı olduklarını anlamaktır.

Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarının kullanılmasıyla tasarlanan 12 DKA versiyonuna ait tüm sonuçlar tek tabloya sığmadığı için iki tablo olarak sunulmuştur. 5 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.10'da; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.11'de verilmiştir. 10 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.12'de; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.13'te verilmiştir. 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.14'te; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.15'te verilmiştir.

**Tablo 5.10:** EARP-ZP 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP CPLEX | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C5 | 247,15 | 3 | %0,0 | 2,44 | 247,15 | 3 | 0,02 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,02 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,02 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,04 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,02 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,02 | 0,00 |
| C103C5 | 165,67 | 2 | %0,0 | 2,01 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,02 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 |
| C206C5 | 236,58 | 2 | %0,0 | 2,85 | 236,58 | 2 | 1,47 | 0,00 | 241,49 | 2 | 0,09 | 2,08 | 241,49 | 2 | 0,08 | 2,08 | 241,49 | 2 | 2,14 | 2,08 | 241,49 | 2 | 2,18 | 2,08 | 241,49 | 2 | 1,91 | 2,08 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 2,17 | 158,48 | 1 | 0,19 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,17 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,18 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,17 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,19 | 0,00 | 158,48 | 1 | 1,00 | 0,00 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,07 | 136,69 | 2 | 0,11 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,10 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,10 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,16 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,10 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,07 | 0,00 |
| R105C5 | 156,08 | 2 | %0,0 | 1,98 | 156,08 | 2 | 0,01 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,02 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,02 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,02 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,02 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,02 | 0,00 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 2,33 | 128,78 | 1 | 0,41 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,60 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,71 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,93 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,42 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,44 | 0,00 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 2,14 | 179,06 | 1 | 0,29 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,29 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,27 | 0,00 | 179,06 | 1 | 1,16 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,70 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,59 | 0,00 |
| RC105C5 | 238,05 | 3 | %0,0 | 3,61 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 |
| RC108C5 | 253,93 | 2 | %0,0 | 2,68 | 253,93 | 2 | 2,59 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,23 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,30 | 0,00 | 253,93 | 2 | 1,43 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,54 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,71 | 0,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 2,43 | 176,39 | 1 | 0,70 | 0,00 | 179,16 | 1 | 0,28 | 1,57 | 176,39 | 1 | 1,39 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,45 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,32 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,18 | 0,00 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 2,24 | 167,98 | 1 | 0,27 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,18 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,29 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,28 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,28 | 0,00 | 167,98 | 1 | 3,27 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **2,41** | | | **0,51** | **0,00** | | | **0,17** | **0,30** | | | **0,28** | **0,17** | | | **0,57** | **0,17** | | | **0,40** | **0,17** | | | **0,69** | **0,17** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.11:** EARP-ZP 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP CPLEX | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C5 | 247,15 | 3 | %0,0 | 2,44 | 247,15 | 3 | 0,08 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,17 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,04 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,02 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,02 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,02 | 0,00 |
| C103C5 | 165,67 | 2 | %0,0 | 2,01 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,01 | 0,00 |
| C206C5 | 236,58 | 2 | %0,0 | 2,85 | 241,49 | 2 | 0,11 | 2,08 | 241,49 | 2 | 0,10 | 2,08 | 241,49 | 2 | 0,10 | 2,08 | 241,49 | 2 | 2,03 | 2,08 | 241,49 | 2 | 1,86 | 2,08 | 241,49 | 2 | 2,35 | 2,08 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 2,17 | 158,48 | 1 | 0,22 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,22 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,25 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,18 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,18 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,24 | 0,00 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,07 | 136,69 | 2 | 0,03 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,03 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,03 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,20 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,18 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,13 | 0,00 |
| R105C5 | 156,08 | 2 | %0,0 | 1,98 | 156,08 | 2 | 0,01 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,01 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,02 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,01 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,01 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,01 | 0,00 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 2,33 | 128,78 | 1 | 0,38 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,33 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,38 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,46 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,50 | 0,00 | 128,78 | 1 | 1,23 | 0,00 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 2,14 | 179,06 | 1 | 0,15 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,32 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,12 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,61 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,55 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,47 | 0,00 |
| RC105C5 | 238,05 | 3 | %0,0 | 3,61 | 238,05 | 3 | 0,02 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,02 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,02 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 |
| RC108C5 | 253,93 | 2 | %0,0 | 2,68 | 253,93 | 2 | 1,10 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,84 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,34 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,65 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,66 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,31 | 0,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 2,43 | 176,39 | 1 | 0,20 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,12 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,13 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,26 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,21 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,42 | 0,00 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 2,24 | 167,98 | 1 | 0,31 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,36 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,98 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,31 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,31 | 0,00 | 167,98 | 1 | 2,22 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **2,41** | | | **0,22** | **0,17** | | | **0,21** | **0,17** | | | **0,20** | **0,17** | | | **0,40** | **0,17** | | | **0,38** | **0,17** | | | **0,62** | **0,17** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.12:** EARP-ZP 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | **EARP-ZP** | | | | **İndirgenmiş DKA** | | | | | | | | | | | | **Basit DKA** | | | | **Genel DKA** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **CPLEX** | | | | **V1 Sıralı** | | | | **V2 Boru** | | | | **V3 Döngü** | | | | **V4 Sıralı** | | | | **V5 Boru** | | | | **V6 Döngüsel** | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C10 | 402,25 | 4 | %21,2 | 7200,00 | 406,12 | 4 | 16,04 | 0,96 | 405,19 | 4 | 20,20 | 0,73 | 405,19 | 4 | 17,79 | 0,73 | 402,25 | 4 | 21,32 | 0,00 | 401,57 | 4 | 21,25 | -0,17 | 401,57 | 4 | 17,27 | -0,17 |
| C104C10 | 273,93 | 2 | %0,0 | 307,74 | 279,93 | 2 | 10,34 | 2,19 | 279,93 | 2 | 8,13 | 2,19 | 273,93 | 2 | 1,63 | 0,00 | 273,93 | 2 | 8,02 | 0,00 | 273,93 | 2 | 2,08 | 0,00 | 273,93 | 2 | 2,39 | 0,00 |
| C202C10 | 243,20 | 2 | %0,0 | 10,28 | 243,20 | 2 | 0,93 | 0,00 | 243,20 | 2 | 0,66 | 0,00 | 243,20 | 2 | 0,72 | 0,00 | 243,20 | 2 | 5,76 | 0,00 | 243,20 | 2 | 2,72 | 0,00 | 243,20 | 2 | 1,39 | 0,00 |
| C205C10 | 228,28 | 2 | %0,0 | 29,97 | 228,28 | 2 | 1,43 | 0,00 | 228,28 | 2 | 2,50 | 0,00 | 228,28 | 2 | 1,44 | 0,00 | 228,28 | 2 | 4,67 | 0,00 | 228,28 | 2 | 2,26 | 0,00 | 228,28 | 2 | 2,40 | 0,00 |
| R102C10 | 249,19 | 3 | %0,0 | 78,68 | 249,19 | 3 | 14,01 | 0,00 | 249,19 | 3 | 6,15 | 0,00 | 249,19 | 3 | 8,30 | 0,00 | 249,19 | 3 | 20,19 | 0,00 | 249,19 | 3 | 3,78 | 0,00 | 249,19 | 3 | 13,69 | 0,00 |
| R103C10 | 202,85 | 3 | %0,0 | 1075,67 | 202,85 | 3 | 9,34 | 0,00 | 202,85 | 3 | 6,44 | 0,00 | 202,85 | 3 | 11,03 | 0,00 | 202,85 | 3 | 24,29 | 0,00 | 202,85 | 3 | 4,25 | 0,00 | 202,85 | 3 | 4,96 | 0,00 |
| R201C10 | 228,36 | 2 | %0,0 | 1254,00 | 228,36 | 2 | 0,67 | 0,00 | 228,36 | 2 | 0,24 | 0,00 | 228,36 | 2 | 0,61 | 0,00 | 228,36 | 2 | 2,18 | 0,00 | 228,36 | 2 | 1,97 | 0,00 | 228,36 | 2 | 2,05 | 0,00 |
| R203C10 | 218,21 | 1 | %0,0 | 12,22 | 218,21 | 1 | 1,10 | 0,00 | 218,21 | 1 | 1,15 | 0,00 | 218,21 | 1 | 30,13 | 0,00 | 218,21 | 1 | 12,36 | 0,00 | 218,21 | 1 | 6,77 | 0,00 | 218,21 | 1 | 54,77 | 0,00 |
| RC102C10 | 423,51 | 4 | %0,0 | 7,53 | 423,51 | 4 | 1,88 | 0,00 | 423,51 | 4 | 0,86 | 0,00 | 423,51 | 4 | 0,70 | 0,00 | 423,51 | 4 | 2,42 | 0,00 | 423,51 | 4 | 0,80 | 0,00 | 423,51 | 4 | 0,72 | 0,00 |
| RC108C10 | 345,93 | 3 | %0,0 | 72,95 | 345,93 | 3 | 0,46 | 0,00 | 345,93 | 3 | 1,09 | 0,00 | 345,93 | 3 | 0,80 | 0,00 | 345,93 | 3 | 2,64 | 0,00 | 345,93 | 3 | 0,90 | 0,00 | 345,93 | 3 | 0,88 | 0,00 |
| RC201C10 | 316,53 | 3 | %3,2 | 7200,00 | 310,06 | 3 | 1,23 | -2,05 | 310,06 | 3 | 1,29 | -2,05 | 310,06 | 3 | 2,38 | -2,05 | 310,06 | 3 | 11,44 | -2,05 | 310,06 | 3 | 0,36 | -2,05 | 310,06 | 3 | 1,17 | -2,05 |
| RC205C10 | 325,98 | 2 | %0,0 | 10,14 | 325,98 | 2 | 0,84 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,98 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,65 | 0,00 | 325,98 | 2 | 1,39 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,78 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,68 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%2,0** | **1438,27** | | | **4,86** | **0,09** | | | **4,14** | **0,07** | | | **6,35** | **-0,11** | | | **9,72** | **-0,17** | | | **3,99** | **-0,18** | | | **8,53** | **-0,18** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.13:** EARP-ZP 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | **EARP-ZP** | | | | **Rassal DKA** | | | | | | | | | | | | **Kümelenmiş DKA** | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **CPLEX** | | | | **V7 Sıralı** | | | | **V8 Boru** | | | | **V9 Döngüsel** | | | | **V10 Sıralı** | | | | **V11 Boru** | | | | **V12 Döngüsel** | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C10 | 402,25 | 4 | %21,2 | 7200,00 | 401,57 | 4 | 27,88 | -0,17 | 401,57 | 4 | 20,97 | -0,17 | 402,25 | 4 | 21,94 | 0,00 | 406,12 | 4 | 11,90 | 0,96 | 406,12 | 4 | 5,74 | 0,96 | 401,57 | 4 | 20,92 | -0,17 |
| C104C10 | 273,93 | 2 | %0,0 | 307,74 | 279,93 | 2 | 7,14 | 2,19 | 279,93 | 2 | 5,67 | 2,19 | 279,93 | 2 | 11,45 | 2,19 | 273,93 | 2 | 2,84 | 0,00 | 273,93 | 2 | 2,83 | 0,00 | 273,93 | 2 | 2,65 | 0,00 |
| C202C10 | 243,20 | 2 | %0,0 | 10,28 | 243,20 | 2 | 0,64 | 0,00 | 243,20 | 2 | 0,64 | 0,00 | 243,20 | 2 | 0,40 | 0,00 | 243,20 | 2 | 1,67 | 0,00 | 243,20 | 2 | 1,66 | 0,00 | 243,20 | 2 | 2,80 | 0,00 |
| C205C10 | 228,28 | 2 | %0,0 | 29,97 | 228,28 | 2 | 1,05 | 0,00 | 228,28 | 2 | 0,80 | 0,00 | 228,28 | 2 | 0,56 | 0,00 | 228,28 | 2 | 1,64 | 0,00 | 228,28 | 2 | 1,67 | 0,00 | 228,28 | 2 | 3,63 | 0,00 |
| R102C10 | 249,19 | 3 | %0,0 | 78,68 | 249,19 | 3 | 6,79 | 0,00 | 249,19 | 3 | 8,85 | 0,00 | 249,19 | 3 | 9,26 | 0,00 | 249,19 | 3 | 1,56 | 0,00 | 249,19 | 3 | 1,50 | 0,00 | 249,19 | 3 | 7,32 | 0,00 |
| R103C10 | 202,85 | 3 | %0,0 | 1075,67 | 202,85 | 3 | 10,03 | 0,00 | 202,85 | 3 | 9,48 | 0,00 | 202,85 | 3 | 8,21 | 0,00 | 207,87 | 3 | 0,94 | 2,47 | 202,85 | 3 | 23,85 | 0,00 | 202,85 | 3 | 1,67 | 0,00 |
| R201C10 | 228,36 | 2 | %0,0 | 1254,00 | 228,36 | 2 | 0,62 | 0,00 | 228,36 | 2 | 0,60 | 0,00 | 228,36 | 2 | 0,83 | 0,00 | 228,36 | 2 | 1,22 | 0,00 | 228,36 | 2 | 1,21 | 0,00 | 228,36 | 2 | 1,15 | 0,00 |
| R203C10 | 218,21 | 1 | %0,0 | 12,22 | 224,41 | 1 | 59,81 | 2,84 | 218,21 | 1 | 58,75 | 0,00 | 218,21 | 1 | 49,68 | 0,00 | 224,96 | 1 | 56,65 | 3,09 | 226,92 | 1 | 51,19 | 3,99 | 224,96 | 1 | 41,85 | 3,09 |
| RC102C10 | 423,51 | 4 | %0,0 | 7,53 | 423,51 | 4 | 1,01 | 0,00 | 423,51 | 4 | 1,16 | 0,00 | 423,51 | 4 | 0,59 | 0,00 | 423,51 | 4 | 1,52 | 0,00 | 423,51 | 4 | 1,75 | 0,00 | 423,51 | 4 | 1,60 | 0,00 |
| RC108C10 | 345,93 | 3 | %0,0 | 72,95 | 345,93 | 3 | 0,49 | 0,00 | 345,93 | 3 | 0,49 | 0,00 | 345,93 | 3 | 0,65 | 0,00 | 345,93 | 3 | 2,28 | 0,00 | 345,93 | 3 | 2,55 | 0,00 | 345,93 | 3 | 2,11 | 0,00 |
| RC201C10 | 316,53 | 3 | %3,2 | 7200,00 | 310,06 | 3 | 1,05 | -2,05 | 310,06 | 3 | 7,36 | -2,05 | 325,89 | 3 | 3,69 | 2,96 | 310,06 | 3 | 0,68 | -2,05 | 310,06 | 3 | 0,69 | -2,05 | 310,06 | 3 | 2,09 | -2,05 |
| RC205C10 | 325,98 | 2 | %0,0 | 10,14 | 325,98 | 2 | 0,64 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,60 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,69 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,79 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,77 | 0,00 | 325,98 | 2 | 1,41 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%2,0** | **1438,27** | | | **9,76** | **0,23** | | | **9,61** | **0,00** | | | **9,00** | **0,43** | | | **6,97** | **0,37** | | | **7,95** | **0,24** | | | **7,43** | **0,07** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.14:** EARP-ZP 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C103C15 | 375,17 | 4 | %23,0 | 7200,00 | 371,70 | 4 | 3,48 | -0,92 | 371,70 | 4 | 14,56 | -0,92 | 374,47 | 4 | 3,56 | -0,19 | 374,47 | 4 | 12,77 | -0,19 | 371,70 | 4 | 21,63 | -0,92 | 374,12 | 4 | 14,35 | -0,28 |
| C106C15 | 275,13 | 3 | %0,0 | 57,60 | 275,13 | 3 | 20,44 | 0,00 | 275,13 | 3 | 9,71 | 0,00 | 275,13 | 3 | 31,53 | 0,00 | 275,13 | 3 | 88,60 | 0,00 | 275,13 | 3 | 26,25 | 0,00 | 275,13 | 3 | 20,71 | 0,00 |
| C202C15 | 376,79 | 3 | %0,0 | 1136,15 | 396,55 | 3 | 51,71 | 5,24 | 376,79 | 3 | 77,03 | 0,00 | 376,79 | 3 | 16,04 | 0,00 | 401,01 | 4 | 0,14 | 6,43 | 385,41 | 3 | 71,53 | 2,29 | 376,79 | 3 | 55,39 | 0,00 |
| C208C15 | 300,55 | 2 | %0,0 | 291,03 | 305,80 | 2 | 31,01 | 1,75 | 300,55 | 2 | 22,24 | 0,00 | 300,55 | 2 | 56,34 | 0,00 | 304,83 | 2 | 32,45 | 1,42 | 304,83 | 2 | 17,96 | 1,42 | 300,55 | 2 | 23,49 | 0,00 |
| R102C15 | 413,93 | 5 | %13,4 | 7200,00 | 428,25 | 5 | 14,28 | 3,46 | 428,25 | 5 | 23,62 | 3,46 | 428,25 | 5 | 20,19 | 3,46 | 428,25 | 5 | 82,76 | 3,46 | 428,25 | 5 | 8,42 | 3,46 | 428,25 | 5 | 13,76 | 3,46 |
| R105C15 | 336,15 | 4 | %0,0 | 101,58 | 338,89 | 4 | 30,97 | 0,82 | 338,89 | 4 | 28,70 | 0,82 | 347,88 | 4 | 13,22 | 3,49 | 347,88 | 4 | 12,84 | 3,49 | 347,88 | 4 | 26,02 | 3,49 | 347,88 | 4 | 18,65 | 3,49 |
| R202C15 | 358,00 | 2 | %0,0 | 2309,63 | 361,14 | 3 | 4,77 | 0,88 | 361,14 | 3 | 8,73 | 0,88 | 361,14 | 3 | 8,28 | 0,88 | 361,14 | 3 | 21,72 | 0,88 | 361,14 | 3 | 9,13 | 0,88 | 361,14 | 3 | 6,75 | 0,88 |
| R209C15 | 307,68 | 3 | %0,0 | 146,95 | 293,94 | 2 | 31,72 | -4,47 | 293,94 | 2 | 41,36 | -4,47 | 301,10 | 2 | 1,78 | -2,14 | 301,10 | 2 | 79,49 | -2,14 | 293,20 | 2 | 82,15 | -4,71 | 296,03 | 2 | 34,11 | -3,79 |
| RC103C15 | 394,65 | 4 | %11,8 | 7200,00 | 420,77 | 5 | 2,46 | 6,62 | 397,67 | 4 | 11,76 | 0,77 | 397,67 | 4 | 4,34 | 0,77 | 420,77 | 5 | 10,49 | 6,62 | 397,67 | 4 | 7,33 | 0,77 | 420,77 | 5 | 1,67 | 6,62 |
| RC108C15 | 370,25 | 3 | %0,0 | 4854,12 | 378,36 | 3 | 19,08 | 2,19 | 370,25 | 3 | 54,03 | 0,00 | 378,36 | 3 | 15,64 | 2,19 | 378,36 | 3 | 10,60 | 2,19 | 378,36 | 3 | 52,87 | 2,19 | 378,36 | 3 | 6,63 | 2,19 |
| RC202C15 | 394,39 | 2 | %0,0 | 234,71 | 394,39 | 2 | 17,33 | 0,00 | 394,39 | 2 | 24,13 | 0,00 | 394,39 | 2 | 31,99 | 0,00 | 394,39 | 2 | 63,16 | 0,00 | 394,39 | 2 | 13,98 | 0,00 | 394,39 | 2 | 8,31 | 0,00 |
| RC204C15 | 310,57 | 2 | %0,0 | 6708,26 | 310,81 | 2 | 18,91 | 0,08 | 310,81 | 2 | 27,66 | 0,08 | 310,58 | 2 | 62,06 | 0,00 | 310,81 | 2 | 56,97 | 0,08 | 310,81 | 2 | 12,94 | 0,08 | 310,90 | 2 | 101,24 | 0,11 |
| **Ortalama** | | | **%4,0** | **3120,00** | | | **20,51** | **1,30** | | | **28,63** | **0,05** | | | **22,08** | **0,70** | | | **39,33** | **1,85** | | | **29,18** | **0,74** | | | **25,42** | **1,06** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.15:** EARP-ZP 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C103C15 | 375,17 | 4 | %23,0 | 7200,00 | 371,70 | 4 | 7,47 | -0,92 | 371,70 | 4 | 54,91 | -0,92 | 371,70 | 4 | 75,07 | -0,92 | 371,70 | 4 | 36,43 | -0,92 | 371,70 | 4 | 36,22 | -0,92 | 371,70 | 4 | 8,21 | -0,92 |
| C106C15 | 275,13 | 3 | %0,0 | 57,60 | 275,13 | 3 | 16,56 | 0,00 | 275,13 | 3 | 45,92 | 0,00 | 275,13 | 3 | 14,13 | 0,00 | 321,78 | 4 | 14,97 | 16,96 | 301,35 | 4 | 35,80 | 9,53 | 275,13 | 3 | 46,88 | 0,00 |
| C202C15 | 376,79 | 3 | %0,0 | 1136,15 | 385,41 | 3 | 71,34 | 2,29 | 376,79 | 3 | 91,80 | 0,00 | 380,94 | 3 | 94,32 | 1,10 | 376,79 | 3 | 15,06 | 0,00 | 376,79 | 3 | 15,63 | 0,00 | 385,41 | 3 | 13,37 | 2,29 |
| C208C15 | 300,55 | 2 | %0,0 | 291,03 | 300,55 | 2 | 14,75 | 0,00 | 304,83 | 2 | 61,97 | 1,42 | 300,55 | 2 | 4,07 | 0,00 | 304,83 | 2 | 141,64 | 1,42 | 304,83 | 2 | 142,51 | 1,42 | 304,83 | 2 | 67,25 | 1,42 |
| R102C15 | 413,93 | 5 | %13,4 | 7200,00 | 428,25 | 5 | 31,43 | 3,46 | 428,25 | 5 | 14,56 | 3,46 | 428,25 | 5 | 38,85 | 3,46 | 428,25 | 5 | 37,81 | 3,46 | 428,25 | 5 | 32,31 | 3,46 | 428,25 | 5 | 17,30 | 3,46 |
| R105C15 | 336,15 | 4 | %0,0 | 101,58 | 338,89 | 4 | 56,94 | 0,82 | 336,15 | 4 | 41,59 | 0,00 | 338,89 | 4 | 57,88 | 0,82 | 339,88 | 4 | 67,92 | 1,11 | 339,88 | 4 | 62,17 | 1,11 | 336,15 | 4 | 53,80 | 0,00 |
| R202C15 | 358,00 | 2 | %0,0 | 2309,63 | 358,00 | 2 | 47,42 | 0,00 | 361,14 | 3 | 4,69 | 0,88 | 361,14 | 3 | 2,51 | 0,88 | 361,14 | 3 | 61,46 | 0,88 | 361,14 | 3 | 31,88 | 0,88 | 361,17 | 3 | 32,66 | 0,88 |
| R209C15 | 307,68 | 3 | %0,0 | 146,95 | 296,03 | 2 | 3,79 | -3,79 | 296,03 | 2 | 66,50 | -3,79 | 301,30 | 2 | 1,77 | -2,07 | 293,94 | 2 | 9,10 | -4,47 | 293,20 | 2 | 36,46 | -4,71 | 293,94 | 2 | 35,33 | -4,47 |
| RC103C15 | 394,65 | 4 | %11,8 | 7200,00 | 420,77 | 5 | 2,04 | 6,62 | 420,77 | 5 | 4,59 | 6,62 | 397,67 | 4 | 8,24 | 0,77 | 398,93 | 4 | 71,82 | 1,08 | 398,92 | 4 | 87,78 | 1,08 | 397,67 | 4 | 20,16 | 0,77 |
| RC108C15 | 370,25 | 3 | %0,0 | 4854,12 | 378,36 | 3 | 12,72 | 2,19 | 378,36 | 3 | 8,02 | 2,19 | 378,36 | 3 | 21,67 | 2,19 | 378,36 | 3 | 18,71 | 2,19 | 378,36 | 3 | 18,76 | 2,19 | 378,36 | 3 | 13,22 | 2,19 |
| RC202C15 | 394,39 | 2 | %0,0 | 234,71 | 394,39 | 2 | 26,12 | 0,00 | 394,39 | 2 | 6,32 | 0,00 | 394,39 | 2 | 42,69 | 0,00 | 399,05 | 2 | 72,28 | 1,18 | 402,13 | 2 | 6,43 | 1,96 | 394,39 | 2 | 36,28 | 0,00 |
| RC204C15 | 310,57 | 2 | %0,0 | 6708,26 | 310,81 | 2 | 16,28 | 0,08 | 310,81 | 2 | 18,75 | 0,08 | 310,58 | 2 | 61,07 | 0,00 | 315,46 | 2 | 77,42 | 1,57 | 314,51 | 2 | 67,12 | 1,27 | 314,51 | 2 | 77,46 | 1,27 |
| **Ortalama** | | | **%4,0** | **3120,00** | | | **25,57** | **0,89** | | | **34,97** | **0,83** | | | **35,19** | **0,52** | | | **52,05** | **2,04** | | | **47,76** | **1,44** | | | **35,16** | **0,57** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

### 5.2.3 Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, EARP-EZTD'nin çözümü için geliştirilen DKA türevleri ile CPLEX'ten elde edilen çözüm sonuçları karşılaştırılacaktır. Bu kıyaslamanın amacı, DKA türevlerinin EARP-EZTD'yi çözmedeki etkinliğini ve performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve CPLEX ile elde edilen sonuçlara göre ne kadar başarılı olduklarını anlamaktır.

Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarının kullanılmasıyla tasarlanan 12 DKA versiyonuna ait tüm sonuçlar tek tabloya sığmadığı için iki tablo olarak sunulmuştur. 5 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.16'da; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.17'de verilmiştir. 10 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.18'de; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.19'da verilmiştir. 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.20'de; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.21'de verilmiştir.

**Tablo 5.16:** EARP-EZTD 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-EZTD CPLEX | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C5 | 208,90 | 1 | %0,0 | 1,35 | 208,90 | 1 | 0,09 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,71 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,72 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,75 | 0,00 |
| C103C5 | 154,50 | 1 | %0,0 | 1,20 | 154,50 | 1 | 0,06 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,05 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,07 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,54 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,41 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,44 | 0,00 |
| C206C5 | 201,55 | 1 | %0,0 | 1,92 | 201,55 | 1 | 0,06 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,13 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,05 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,08 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,09 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,09 | 0,00 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 1,34 | 158,48 | 1 | 0,25 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,34 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,30 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,17 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,27 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,24 | 0,00 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 1,75 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| R105C5 | 139,48 | 1 | %0,0 | 1,23 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 1,29 | 128,78 | 1 | 0,36 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,70 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,15 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,20 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,21 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,15 | 0,00 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 1,37 | 179,06 | 1 | 0,12 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,00 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,27 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,00 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,00 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,00 | 0,00 |
| RC105C5 | 208,43 | 1 | %0,0 | 1,89 | 208,43 | 1 | 0,11 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,11 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,19 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,15 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,12 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,23 | 0,00 |
| RC108C5 | 211,53 | 1 | %0,0 | 1,36 | 211,53 | 1 | 0,12 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,07 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,12 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,12 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,13 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,21 | 0,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 2,54 | 176,39 | 1 | 0,02 | 0,00 | 179,16 | 1 | 0,25 | 1,57 | 176,39 | 1 | 0,02 | 0,00 | 179,16 | 1 | 4,17 | 1,57 | 179,16 | 1 | 0,32 | 1,57 | 179,16 | 1 | 0,39 | 1,57 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 2,29 | 167,98 | 1 | 0,52 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,12 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,04 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,10 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,37 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,31 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **1,63** | | | **0,14** | **0,00** | | | **0,15** | **0,13** | | | **0,11** | **0,00** | | | **0,52** | **0,13** | | | **0,22** | **0,13** | | | **0,23** | **0,13** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.17:** EARP-EZTD 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-EZTD CPLEX | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C5 | 208,90 | 1 | %0,0 | 1,35 | 208,90 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,90 | 1 | 0,08 | 0,00 | 208,90 | 1 | 1,09 | 0,00 | 208,90 | 1 | 1,08 | 0,00 | 208,90 | 1 | 1,07 | 0,00 |
| C103C5 | 154,50 | 1 | %0,0 | 1,20 | 154,50 | 1 | 0,38 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,41 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,36 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,76 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,37 | 0,00 | 154,50 | 1 | 0,39 | 0,00 |
| C206C5 | 201,55 | 1 | %0,0 | 1,92 | 201,55 | 1 | 0,04 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,05 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,05 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,50 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,36 | 0,00 | 201,55 | 1 | 0,56 | 0,00 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 1,34 | 158,48 | 1 | 0,11 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,13 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,17 | 0,00 | 158,48 | 1 | 1,15 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,67 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,65 | 0,00 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 1,75 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| R105C5 | 139,48 | 1 | %0,0 | 1,23 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 | 139,48 | 1 | 0,00 | 0,00 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 1,29 | 128,78 | 1 | 0,62 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,35 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,19 | 0,00 | 128,78 | 1 | 2,95 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,44 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,41 | 0,00 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 1,37 | 179,06 | 1 | 0,03 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,14 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,13 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,36 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,35 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,19 | 0,00 |
| RC105C5 | 208,43 | 1 | %0,0 | 1,89 | 208,43 | 1 | 0,10 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,07 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,41 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,31 | 0,00 | 208,43 | 1 | 0,34 | 0,00 |
| RC108C5 | 211,53 | 1 | %0,0 | 1,36 | 211,53 | 1 | 0,10 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,08 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,06 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,67 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,48 | 0,00 | 211,53 | 1 | 0,46 | 0,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 2,54 | 179,16 | 1 | 0,06 | 1,57 | 179,16 | 1 | 0,28 | 1,57 | 179,16 | 1 | 0,35 | 1,57 | 176,39 | 1 | 0,71 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,53 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,48 | 0,00 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 2,29 | 167,98 | 1 | 0,06 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,05 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,05 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,75 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,57 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,52 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **1,63** | | | **0,13** | **0,13** | | | **0,14** | **0,13** | | | **0,13** | **0,13** | | | **0,78** | **0,00** | | | **0,43** | **0,00** | | | **0,42** | **0,00** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.18:** EARP-EZTD 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-EZTD CPLEX | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C10 | 260,01 | 1 | %0,0 | 4,85 | 260,01 | 1 | 11,28 | 0,00 | 260,01 | 1 | 1,55 | 0,00 | 260,01 | 1 | 6,80 | 0,00 | 260,01 | 1 | 27,34 | 0,00 | 265,75 | 1 | 0,97 | 2,21 | 260,01 | 1 | 7,60 | 0,00 |
| C104C10 | 239,13 | 1 | %0,0 | 3,39 | 239,13 | 1 | 10,40 | 0,00 | 239,13 | 1 | 8,66 | 0,00 | 239,13 | 1 | 8,58 | 0,00 | 239,13 | 1 | 12,14 | 0,00 | 239,13 | 1 | 8,97 | 0,00 | 239,13 | 1 | 28,93 | 0,00 |
| C202C10 | 214,96 | 1 | %0,0 | 4,12 | 214,96 | 1 | 19,29 | 0,00 | 214,96 | 1 | 13,50 | 0,00 | 214,96 | 1 | 19,55 | 0,00 | 235,40 | 1 | 1,15 | 9,51 | 235,40 | 1 | 8,40 | 9,51 | 214,96 | 1 | 8,58 | 0,00 |
| C205C10 | 224,78 | 1 | %0,0 | 4,45 | 224,78 | 1 | 5,22 | 0,00 | 224,78 | 1 | 5,04 | 0,00 | 224,78 | 1 | 1,17 | 0,00 | 224,78 | 1 | 4,74 | 0,00 | 224,78 | 1 | 7,85 | 0,00 | 224,78 | 1 | 4,02 | 0,00 |
| R102C10 | 220,97 | 1 | %0,0 | 19,01 | 220,97 | 1 | 1,97 | 0,00 | 220,97 | 1 | 1,92 | 0,00 | 220,97 | 1 | 1,51 | 0,00 | 220,97 | 1 | 5,66 | 0,00 | 220,97 | 1 | 3,11 | 0,00 | 220,97 | 1 | 14,69 | 0,00 |
| R103C10 | 160,41 | 1 | %0,0 | 10,35 | 160,41 | 1 | 18,54 | 0,00 | 160,41 | 1 | 6,68 | 0,00 | 160,41 | 1 | 14,34 | 0,00 | 164,58 | 1 | 2,74 | 2,60 | 160,41 | 1 | 17,17 | 0,00 | 160,41 | 1 | 6,25 | 0,00 |
| R201C10 | 183,11 | 1 | %0,0 | 2,36 | 197,54 | 1 | 1,67 | 7,88 | 183,11 | 1 | 1,03 | 0,00 | 197,54 | 1 | 2,41 | 7,88 | 197,54 | 1 | 17,87 | 7,88 | 183,11 | 1 | 23,21 | 0,00 | 183,11 | 1 | 23,49 | 0,00 |
| R203C10 | 214,90 | 1 | %0,0 | 5,43 | 214,90 | 1 | 6,25 | 0,00 | 214,90 | 1 | 3,62 | 0,00 | 214,90 | 1 | 3,89 | 0,00 | 214,90 | 1 | 23,27 | 0,00 | 232,68 | 1 | 3,29 | 8,27 | 214,90 | 1 | 21,78 | 0,00 |
| RC102C10 | 346,70 | 1 | %0,0 | 4,03 | 346,70 | 1 | 11,82 | 0,00 | 346,70 | 1 | 15,27 | 0,00 | 346,70 | 1 | 3,53 | 0,00 | 346,70 | 1 | 27,36 | 0,00 | 346,70 | 1 | 11,96 | 0,00 | 346,70 | 1 | 37,50 | 0,00 |
| RC108C10 | 317,96 | 2 | %0,0 | 6,00 | 317,96 | 1 | 5,87 | 0,00 | 317,96 | 1 | 3,75 | 0,00 | 317,96 | 1 | 29,29 | 0,00 | 329,93 | 1 | 1,60 | 3,76 | 317,96 | 1 | 2,12 | 0,00 | 317,96 | 1 | 14,47 | 0,00 |
| RC201C10 | 246,99 | 1 | %0,0 | 5,26 | 246,99 | 1 | 3,77 | 0,00 | 246,99 | 1 | 2,10 | 0,00 | 246,99 | 1 | 3,28 | 0,00 | 247,26 | 1 | 1,49 | 0,11 | 246,99 | 1 | 2,59 | 0,00 | 246,99 | 1 | 6,13 | 0,00 |
| RC205C10 | 306,82 | 1 | %0,0 | 4,14 | 306,82 | 1 | 2,38 | 0,00 | 306,82 | 1 | 2,07 | 0,00 | 306,82 | 1 | 1,74 | 0,00 | 306,82 | 1 | 2,57 | 0,00 | 306,82 | 1 | 5,93 | 0,00 | 306,82 | 1 | 0,81 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **6,12** | | | **8,21** | **0,66** | | | **5,43** | **0,00** | | | **8,01** | **0,66** | | | **10,66** | **1,99** | | | **7,96** | **1,67** | | | **14,52** | **0,00** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.19:** EARP-EZTD 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-EZTD CPLEX | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C10 | 260,01 | 1 | %0,0 | 4,85 | 260,01 | 1 | 21,17 | 0,00 | 260,01 | 1 | 8,09 | 0,00 | 265,75 | 1 | 1,59 | 2,21 | 260,01 | 1 | 29,74 | 0,00 | 265,75 | 1 | 6,05 | 2,21 | 260,01 | 1 | 32,60 | 0,00 |
| C104C10 | 239,13 | 1 | %0,0 | 3,39 | 239,13 | 1 | 5,95 | 0,00 | 239,13 | 1 | 5,61 | 0,00 | 239,13 | 1 | 18,11 | 0,00 | 239,13 | 1 | 7,98 | 0,00 | 239,13 | 1 | 9,13 | 0,00 | 239,13 | 1 | 9,75 | 0,00 |
| C202C10 | 214,96 | 1 | %0,0 | 4,12 | 214,96 | 1 | 3,12 | 0,00 | 214,96 | 1 | 4,37 | 0,00 | 214,96 | 1 | 11,62 | 0,00 | 214,96 | 1 | 10,74 | 0,00 | 214,96 | 1 | 33,37 | 0,00 | 214,96 | 1 | 21,54 | 0,00 |
| C205C10 | 224,78 | 1 | %0,0 | 4,45 | 224,78 | 1 | 3,88 | 0,00 | 224,78 | 1 | 4,10 | 0,00 | 224,78 | 1 | 3,40 | 0,00 | 224,78 | 1 | 2,86 | 0,00 | 224,78 | 1 | 6,93 | 0,00 | 224,78 | 1 | 2,04 | 0,00 |
| R102C10 | 220,97 | 1 | %0,0 | 19,01 | 220,97 | 1 | 2,52 | 0,00 | 220,97 | 1 | 13,45 | 0,00 | 220,97 | 1 | 2,08 | 0,00 | 220,97 | 1 | 4,31 | 0,00 | 220,97 | 1 | 12,54 | 0,00 | 220,97 | 1 | 8,99 | 0,00 |
| R103C10 | 160,41 | 1 | %0,0 | 10,35 | 164,58 | 1 | 10,08 | 2,60 | 164,58 | 1 | 10,69 | 2,60 | 164,58 | 1 | 15,29 | 2,60 | 160,41 | 1 | 11,13 | 0,00 | 160,41 | 1 | 9,01 | 0,00 | 160,41 | 1 | 5,28 | 0,00 |
| R201C10 | 183,11 | 1 | %0,0 | 2,36 | 183,42 | 1 | 2,10 | 0,17 | 183,42 | 1 | 37,63 | 0,17 | 183,42 | 1 | 6,15 | 0,17 | 188,86 | 1 | 18,04 | 3,14 | 183,42 | 1 | 33,57 | 0,17 | 183,42 | 1 | 10,22 | 0,17 |
| R203C10 | 214,90 | 1 | %0,0 | 5,43 | 214,90 | 1 | 5,04 | 0,00 | 214,90 | 1 | 4,15 | 0,00 | 214,90 | 1 | 0,97 | 0,00 | 214,90 | 1 | 8,68 | 0,00 | 214,90 | 1 | 14,48 | 0,00 | 214,90 | 1 | 19,31 | 0,00 |
| RC102C10 | 346,70 | 1 | %0,0 | 4,03 | 346,70 | 1 | 7,96 | 0,00 | 346,70 | 1 | 3,57 | 0,00 | 346,70 | 1 | 5,05 | 0,00 | 346,70 | 1 | 17,55 | 0,00 | 346,70 | 1 | 5,79 | 0,00 | 346,70 | 1 | 3,24 | 0,00 |
| RC108C10 | 317,96 | 2 | %0,0 | 6,00 | 317,96 | 1 | 0,91 | 0,00 | 317,96 | 1 | 2,00 | 0,00 | 317,96 | 1 | 4,05 | 0,00 | 317,96 | 1 | 11,70 | 0,00 | 317,96 | 1 | 2,72 | 0,00 | 317,96 | 1 | 5,12 | 0,00 |
| RC201C10 | 246,99 | 1 | %0,0 | 5,26 | 246,99 | 1 | 4,03 | 0,00 | 246,99 | 1 | 4,49 | 0,00 | 246,99 | 1 | 1,28 | 0,00 | 246,99 | 1 | 15,85 | 0,00 | 246,99 | 1 | 8,60 | 0,00 | 246,99 | 1 | 8,94 | 0,00 |
| RC205C10 | 306,82 | 1 | %0,0 | 4,14 | 306,82 | 1 | 3,92 | 0,00 | 306,82 | 1 | 2,42 | 0,00 | 306,82 | 1 | 3,05 | 0,00 | 306,82 | 1 | 4,09 | 0,00 | 306,82 | 1 | 9,49 | 0,00 | 306,82 | 1 | 7,15 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **6,12** | | | **5,89** | **0,23** | | | **8,38** | **0,23** | | | **6,05** | **0,41** | | | **11,89** | **0,26** | | | **12,64** | **0,20** | | | **11,18** | **0,01** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.20:** EARP-EZTD 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-EZTD CPLEX | | | | İndirgenmiş DKA V1 Sıralı | | | | İndirgenmiş DKA V2 Boru | | | | İndirgenmiş DKA V3 Döngü | | | | Basit DKA V4 Sıralı | | | | Genel DKA V5 Boru | | | | Genel DKA V6 Döngüsel | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C103C15 | 255,68 | 2 | %0,0 | 30,81 | 255,68 | 1 | 23,81 | 0,00 | 255,68 | 1 | 18,19 | 0,00 | 255,68 | 1 | 14,86 | 0,00 | 256,70 | 1 | 89,07 | 0,40 | 255,68 | 1 | 28,20 | 0,00 | 255,68 | 1 | 28,60 | 0,00 |
| C106C15 | 223,84 | 1 | %0,0 | 142,65 | 223,84 | 1 | 17,70 | 0,00 | 223,84 | 1 | 7,82 | 0,00 | 223,84 | 1 | 3,53 | 0,00 | 223,84 | 1 | 30,79 | 0,00 | 223,84 | 1 | 11,05 | 0,00 | 223,84 | 1 | 10,70 | 0,00 |
| C202C15 | 314,62 | 1 | %0,0 | 373,20 | 314,62 | 1 | 30,18 | 0,00 | 317,96 | 1 | 39,18 | 1,06 | 314,62 | 1 | 22,74 | 0,00 | 317,96 | 1 | 60,36 | 1,06 | 317,96 | 1 | 66,45 | 1,06 | 314,62 | 1 | 74,28 | 0,00 |
| C208C15 | 262,50 | 2 | %0,0 | 244,40 | 262,50 | 1 | 2,90 | 0,00 | 262,50 | 1 | 5,25 | 0,00 | 262,50 | 1 | 4,96 | 0,00 | 262,50 | 1 | 7,57 | 0,00 | 262,50 | 1 | 5,05 | 0,00 | 262,50 | 1 | 3,41 | 0,00 |
| R102C15 | 258,59 | 1 | %0,0 | 681,12 | 258,59 | 1 | 30,68 | 0,00 | 258,59 | 1 | 19,33 | 0,00 | 258,59 | 1 | 25,82 | 0,00 | 276,00 | 1 | 66,58 | 6,73 | 258,59 | 1 | 66,34 | 0,00 | 258,59 | 1 | 16,26 | 0,00 |
| R105C15 | 231,96 | 1 | %0,0 | 119,88 | 231,96 | 1 | 35,26 | 0,00 | 231,96 | 1 | 20,74 | 0,00 | 231,96 | 1 | 13,48 | 0,00 | 231,96 | 1 | 21,86 | 0,00 | 231,96 | 1 | 19,88 | 0,00 | 231,96 | 1 | 57,55 | 0,00 |
| R202C15 | 275,04 | 1 | %0,0 | 64,31 | 275,04 | 1 | 18,33 | 0,00 | 275,04 | 1 | 20,78 | 0,00 | 275,04 | 1 | 15,01 | 0,00 | 275,04 | 1 | 40,44 | 0,00 | 275,04 | 1 | 48,49 | 0,00 | 276,42 | 1 | 50,24 | 0,50 |
| R209C15 | 239,70 | 1 | %0,0 | 49,60 | 239,70 | 1 | 12,94 | 0,00 | 239,70 | 1 | 8,33 | 0,00 | 239,70 | 1 | 5,57 | 0,00 | 266,22 | 1 | 43,51 | 11,06 | 239,70 | 1 | 21,51 | 0,00 | 239,70 | 1 | 43,99 | 0,00 |
| RC103C15 | 291,07 | 1 | %0,0 | 52,73 | 291,07 | 1 | 19,59 | 0,00 | 291,07 | 1 | 18,64 | 0,00 | 291,07 | 1 | 23,82 | 0,00 | 291,07 | 1 | 83,05 | 0,00 | 321,40 | 2 | 2,83 | 10,42 | 291,07 | 1 | 31,60 | 0,00 |
| RC108C15 | 330,01 | 2 | %0,0 | 1197,23 | 330,01 | 1 | 23,09 | 0,00 | 330,01 | 1 | 8,11 | 0,00 | 330,01 | 1 | 7,56 | 0,00 | 330,01 | 1 | 32,97 | 0,00 | 330,01 | 1 | 23,08 | 0,00 | 330,01 | 1 | 45,48 | 0,00 |
| RC202C15 | 295,60 | 1 | %0,0 | 87,00 | 295,60 | 1 | 30,43 | 0,00 | 295,67 | 1 | 36,68 | 0,02 | 295,60 | 1 | 56,46 | 0,00 | 361,38 | 1 | 9,02 | 22,25 | 295,60 | 1 | 51,58 | 0,00 | 315,22 | 1 | 85,09 | 6,64 |
| RC204C15 | 285,13 | 1 | %0,0 | 29,20 | 285,13 | 1 | 12,34 | 0,00 | 285,13 | 1 | 29,72 | 0,00 | 285,13 | 1 | 6,48 | 0,00 | 288,83 | 1 | 24,47 | 1,30 | 288,83 | 1 | 76,89 | 1,30 | 285,13 | 1 | 39,19 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **256,01** | | | **21,44** | **0,00** | | | **19,40** | **0,09** | | | **16,69** | **0,00** | | | **42,47** | **3,57** | | | **35,11** | **1,06** | | | **40,53** | **0,59** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.21:** EARP-EZTD 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-EZTD CPLEX | | | | Rassal DKA V7 Sıralı | | | | Rassal DKA V8 Boru | | | | Rassal DKA V9 Döngüsel | | | | Kümelenmiş DKA V10 Sıralı | | | | Kümelenmiş DKA V11 Boru | | | | Kümelenmiş DKA V12 Döngüsel | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C103C15 | 255,68 | 2 | %0,0 | 30,81 | 255,68 | 1 | 6,29 | 0,00 | 255,68 | 1 | 18,91 | 0,00 | 255,68 | 1 | 11,58 | 0,00 | 259,75 | 1 | 14,82 | 1,59 | 262,63 | 1 | 80,07 | 2,72 | 259,75 | 1 | 7,12 | 1,59 |
| C106C15 | 223,84 | 1 | %0,0 | 142,65 | 223,84 | 1 | 38,68 | 0,00 | 223,84 | 1 | 11,70 | 0,00 | 223,84 | 1 | 24,93 | 0,00 | 223,84 | 1 | 12,93 | 0,00 | 223,84 | 1 | 71,45 | 0,00 | 223,84 | 1 | 10,48 | 0,00 |
| C202C15 | 314,62 | 1 | %0,0 | 373,20 | 314,62 | 1 | 23,48 | 0,00 | 325,78 | 1 | 45,13 | 3,55 | 314,62 | 1 | 13,02 | 0,00 | 330,93 | 1 | 31,84 | 5,18 | 330,44 | 1 | 39,12 | 5,03 | 323,80 | 1 | 41,09 | 2,92 |
| C208C15 | 262,50 | 2 | %0,0 | 244,40 | 262,50 | 1 | 3,14 | 0,00 | 262,50 | 1 | 4,13 | 0,00 | 262,50 | 1 | 2,89 | 0,00 | 262,50 | 1 | 4,54 | 0,00 | 262,50 | 1 | 3,69 | 0,00 | 262,50 | 1 | 4,41 | 0,00 |
| R102C15 | 258,59 | 1 | %0,0 | 681,12 | 258,59 | 1 | 80,80 | 0,00 | 259,79 | 1 | 13,84 | 0,46 | 258,59 | 1 | 20,72 | 0,00 | 259,79 | 1 | 14,81 | 0,46 | 259,79 | 1 | 73,19 | 0,46 | 259,79 | 1 | 10,83 | 0,46 |
| R105C15 | 231,96 | 1 | %0,0 | 119,88 | 231,96 | 1 | 14,22 | 0,00 | 231,96 | 1 | 30,73 | 0,00 | 231,96 | 1 | 35,11 | 0,00 | 234,46 | 1 | 66,08 | 1,08 | 244,55 | 1 | 11,00 | 5,43 | 234,84 | 1 | 27,65 | 1,24 |
| R202C15 | 275,04 | 1 | %0,0 | 64,31 | 275,04 | 1 | 46,48 | 0,00 | 275,04 | 1 | 46,60 | 0,00 | 275,04 | 1 | 31,96 | 0,00 | 287,99 | 1 | 11,30 | 4,71 | 289,51 | 1 | 44,58 | 5,26 | 295,18 | 1 | 53,03 | 7,32 |
| R209C15 | 239,70 | 1 | %0,0 | 49,60 | 239,70 | 1 | 49,94 | 0,00 | 239,70 | 1 | 11,68 | 0,00 | 239,70 | 1 | 19,97 | 0,00 | 252,69 | 1 | 12,28 | 5,42 | 251,96 | 1 | 89,52 | 5,11 | 246,95 | 1 | 76,81 | 3,02 |
| RC103C15 | 291,07 | 1 | %0,0 | 52,73 | 291,07 | 1 | 76,57 | 0,00 | 291,07 | 1 | 13,18 | 0,00 | 291,07 | 1 | 29,76 | 0,00 | 300,89 | 1 | 12,64 | 3,37 | 295,56 | 1 | 70,06 | 1,54 | 291,07 | 1 | 10,80 | 0,00 |
| RC108C15 | 330,01 | 2 | %0,0 | 1197,23 | 330,01 | 1 | 10,02 | 0,00 | 330,01 | 1 | 7,23 | 0,00 | 330,01 | 1 | 17,99 | 0,00 | 332,40 | 1 | 13,45 | 0,72 | 332,40 | 1 | 22,47 | 0,72 | 332,40 | 1 | 6,73 | 0,72 |
| RC202C15 | 295,60 | 1 | %0,0 | 87,00 | 315,22 | 1 | 10,25 | 6,64 | 315,22 | 1 | 3,92 | 6,64 | 300,26 | 1 | 68,15 | 1,58 | 317,85 | 1 | 32,03 | 7,53 | 315,22 | 1 | 22,63 | 6,64 | 317,91 | 1 | 16,76 | 7,55 |
| RC204C15 | 285,13 | 1 | %0,0 | 29,20 | 285,13 | 1 | 35,51 | 0,00 | 285,13 | 1 | 31,08 | 0,00 | 285,13 | 1 | 50,56 | 0,00 | 285,37 | 1 | 61,98 | 0,08 | 289,96 | 1 | 88,36 | 1,69 | 291,93 | 1 | 82,26 | 2,38 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **256,01** | | | **32,95** | **0,55** | | | **19,84** | **0,89** | | | **27,22** | **0,13** | | | **24,06** | **2,51** | | | **51,35** | **2,88** | | | **29,00** | **2,27** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

### 5.2.4 Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, EARP-ZP-EZTD'nin çözümü için geliştirilen DKA türevleri ile CPLEX'ten elde edilen çözüm sonuçları karşılaştırılacaktır. Bu kıyaslamanın amacı, DKA türevlerinin EARP-ZP-EZTD'yi çözmedeki etkinliğini ve performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve CPLEX ile elde edilen sonuçlara göre ne kadar başarılı olduklarını anlamaktır.

Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarının kullanılmasıyla tasarlanan 12 DKA versiyonuna ait tüm sonuçlar tek tabloya sığmadığı için iki tablo olarak sunulmuştur. 5 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.22'de; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.23'te verilmiştir. 10 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.24'te; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.25'te verilmiştir. 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu 12 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonlarına ait sonuçlar Tablo 5.26'da; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.27'de verilmiştir.

**Tablo 5.22:** EARP-ZP-EZTD 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP-EZTD CPLEX | | | | İndirgenmiş DKA V1 Sıralı | | | | İndirgenmiş DKA V2 Boru | | | | İndirgenmiş DKA V3 Döngü | | | | Basit DKA V4 Sıralı | | | | Genel DKA V5 Boru | | | | Genel DKA V6 Döngüsel | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C5 | 247,15 | 3 | %0,0 | 2,45 | 247,15 | 3 | 0,25 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,15 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,16 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,12 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,15 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,14 | 0,00 |
| C103C5 | 165,67 | 2 | %0,0 | 1,85 | 165,67 | 2 | 0,03 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,03 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,03 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,03 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,02 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,04 | 0,00 |
| C206C5 | 236,58 | 2 | %0,0 | 3,37 | 236,58 | 2 | 1,45 | 0,00 | 241,49 | 2 | 0,08 | 2,08 | 241,49 | 2 | 0,11 | 2,08 | 241,49 | 2 | 4,57 | 2,08 | 241,49 | 2 | 4,40 | 2,08 | 241,49 | 2 | 4,34 | 2,08 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 2,29 | 158,48 | 1 | 0,61 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,39 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,53 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,40 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,39 | 0,00 | 158,48 | 1 | 2,56 | 0,00 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,44 | 136,69 | 2 | 0,16 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,17 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,19 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,86 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,30 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,36 | 0,00 |
| R105C5 | 156,08 | 2 | %0,0 | 2,04 | 156,08 | 2 | 0,02 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,05 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,05 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,05 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,05 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,05 | 0,00 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 2,34 | 128,78 | 1 | 1,43 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,66 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,71 | 0,00 | 144,67 | 1 | 1,27 | 12,34 | 128,78 | 1 | 1,93 | 0,00 | 128,78 | 1 | 1,90 | 0,00 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 2,53 | 179,06 | 1 | 0,65 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,80 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,35 | 0,00 | 195,63 | 1 | 0,07 | 9,26 | 179,06 | 1 | 5,07 | 0,00 | 194,19 | 1 | 4,48 | 8,45 |
| RC105C5 | 238,05 | 3 | %0,0 | 3,36 | 238,05 | 3 | 0,02 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,01 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,04 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,02 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,02 | 0,00 |
| RC108C5 | 253,93 | 2 | %0,0 | 4,00 | 253,93 | 2 | 0,42 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,79 | 0,00 | 253,93 | 2 | 0,28 | 0,00 | 316,51 | 3 | 0,44 | 24,64 | 253,93 | 2 | 1,27 | 0,00 | 253,93 | 2 | 1,48 | 0,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 3,51 | 176,39 | 1 | 1,29 | 0,00 | 179,16 | 1 | 0,41 | 1,57 | 176,39 | 1 | 2,72 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,61 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,49 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,32 | 0,00 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 3,00 | 167,98 | 1 | 0,79 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,91 | 0,00 | 167,98 | 1 | 2,56 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,61 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,58 | 0,00 | 173,58 | 1 | 2,15 | 3,33 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **2,77** | | | **0,59** | **0,00** | | | **0,37** | **0,30** | | | **0,64** | **0,17** | | | **0,76** | **4,03** | | | **1,22** | **0,17** | | | **1,49** | **1,15** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.23:** EARP-ZP-EZTD 5 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP-EZTD CPLEX | | | | Rassal DKA V7 Sıralı | | | | Rassal DKA V8 Boru | | | | Rassal DKA V9 Döngüsel | | | | Kümelenmiş DKA V10 Sıralı | | | | Kümelenmiş DKA V11 Boru | | | | Kümelenmiş DKA V12 Döngüsel | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C5 | 247,15 | 3 | %0,0 | 2,45 | 247,15 | 3 | 0,46 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,46 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,61 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,17 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,15 | 0,00 | 247,15 | 3 | 0,22 | 0,00 |
| C103C5 | 165,67 | 2 | %0,0 | 1,85 | 165,67 | 2 | 0,03 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,04 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,04 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,05 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,04 | 0,00 | 165,67 | 2 | 0,05 | 0,00 |
| C206C5 | 236,58 | 2 | %0,0 | 3,37 | 241,49 | 2 | 0,08 | 2,08 | 241,49 | 2 | 0,11 | 2,08 | 241,49 | 2 | 0,08 | 2,08 | 241,49 | 2 | 4,98 | 2,08 | 241,49 | 2 | 4,46 | 2,08 | 246,39 | 2 | 5,04 | 4,15 |
| C208C5 | 158,48 | 1 | %0,0 | 2,29 | 158,48 | 1 | 0,53 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,37 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,29 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,45 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,41 | 0,00 | 158,48 | 1 | 0,66 | 0,00 |
| R104C5 | 136,69 | 2 | %0,0 | 2,44 | 136,69 | 2 | 0,09 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,10 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,06 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,48 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,52 | 0,00 | 136,69 | 2 | 0,68 | 0,00 |
| R105C5 | 156,08 | 2 | %0,0 | 2,04 | 156,08 | 2 | 0,05 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,07 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,07 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,07 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,07 | 0,00 | 156,08 | 2 | 0,04 | 0,00 |
| R202C5 | 128,78 | 1 | %0,0 | 2,34 | 128,78 | 1 | 0,56 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,70 | 0,00 | 128,78 | 1 | 0,81 | 0,00 | 128,78 | 1 | 2,11 | 0,00 | 128,78 | 1 | 2,44 | 0,00 | 128,78 | 1 | 2,10 | 0,00 |
| R203C5 | 179,06 | 1 | %0,0 | 2,53 | 179,06 | 1 | 0,83 | 0,00 | 179,06 | 1 | 4,35 | 0,00 | 179,06 | 1 | 0,84 | 0,00 | 194,19 | 1 | 4,84 | 8,45 | 179,06 | 1 | 4,34 | 0,00 | 179,06 | 1 | 7,03 | 0,00 |
| RC105C5 | 238,05 | 3 | %0,0 | 3,36 | 238,05 | 3 | 0,04 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,04 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,03 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,02 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,02 | 0,00 | 238,05 | 3 | 0,03 | 0,00 |
| RC108C5 | 253,93 | 2 | %0,0 | 4,00 | 316,51 | 3 | 0,09 | 24,64 | 316,51 | 3 | 0,15 | 24,64 | 253,93 | 2 | 3,46 | 0,00 | 253,93 | 2 | 3,81 | 0,00 | 253,93 | 2 | 3,34 | 0,00 | 253,93 | 2 | 2,88 | 0,00 |
| RC204C5 | 176,39 | 1 | %0,0 | 3,51 | 176,39 | 1 | 0,48 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,32 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,27 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,60 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,47 | 0,00 | 176,39 | 1 | 0,72 | 0,00 |
| RC208C5 | 167,98 | 1 | %0,0 | 3,00 | 167,98 | 1 | 0,26 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,30 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,21 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,73 | 0,00 | 167,98 | 1 | 0,67 | 0,00 | 167,98 | 1 | 3,40 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%0,0** | **2,77** | | | **0,29** | **2,23** | | | **0,58** | **2,23** | | | **0,56** | **0,17** | | | **1,53** | **0,88** | | | **1,41** | **0,17** | | | **1,90** | **0,35** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.24:** EARP-ZP-EZTD 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP-EZTD | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C10 | 402,25 | 4 | %3,4 | 7200,00 | 406,12 | 4 | 15,32 | 0,96 | 401,57 | 4 | 15,84 | -0,17 | 406,12 | 4 | 7,56 | 0,96 | 408,48 | 3 | 17,09 | 1,55 | 408,48 | 3 | 15,05 | 1,55 | 406,12 | 4 | 7,82 | 0,96 |
| C104C10 | 273,93 | 2 | %0,0 | 123,42 | 288,80 | 2 | 2,80 | 5,43 | 273,93 | 2 | 13,12 | 0,00 | 279,93 | 2 | 9,52 | 2,19 | 273,93 | 2 | 13,49 | 0,00 | 288,80 | 2 | 6,94 | 5,43 | 273,93 | 2 | 6,52 | 0,00 |
| C202C10 | 243,20 | 2 | %0,0 | 30,95 | 243,20 | 2 | 0,69 | 0,00 | 243,20 | 2 | 0,63 | 0,00 | 243,20 | 2 | 0,11 | 0,00 | 243,20 | 2 | 3,59 | 0,00 | 243,20 | 2 | 3,90 | 0,00 | 243,20 | 2 | 3,26 | 0,00 |
| C205C10 | 228,28 | 2 | %0,0 | 82,70 | 228,28 | 2 | 3,77 | 0,00 | 228,28 | 2 | 2,96 | 0,00 | 228,28 | 2 | 1,92 | 0,00 | 228,28 | 2 | 14,66 | 0,00 | 228,28 | 2 | 3,10 | 0,00 | 228,28 | 2 | 6,39 | 0,00 |
| R102C10 | 249,19 | 3 | %0,0 | 49,65 | 249,19 | 3 | 11,27 | 0,00 | 249,19 | 3 | 6,11 | 0,00 | 249,19 | 3 | 6,24 | 0,00 | 262,92 | 4 | 7,02 | 5,51 | 249,19 | 3 | 3,88 | 0,00 | 249,19 | 3 | 3,67 | 0,00 |
| R103C10 | 202,85 | 3 | %22,0 | 7200,00 | 206,30 | 3 | 15,15 | 1,70 | 206,51 | 3 | 16,35 | 1,80 | 207,87 | 3 | 1,02 | 2,47 | 207,87 | 3 | 5,64 | 2,47 | 206,51 | 3 | 2,88 | 1,80 | 202,85 | 3 | 4,06 | 0,00 |
| R201C10 | 228,36 | 2 | %0,0 | 301,01 | 228,36 | 2 | 0,95 | 0,00 | 228,36 | 2 | 0,47 | 0,00 | 228,36 | 2 | 1,07 | 0,00 | 228,36 | 2 | 4,75 | 0,00 | 228,36 | 2 | 2,43 | 0,00 | 228,36 | 2 | 2,12 | 0,00 |
| R203C10 | 218,21 | 1 | %0,0 | 72,54 | 232,68 | 2 | 2,95 | 6,63 | 222,64 | 1 | 54,91 | 2,03 | 218,21 | 1 | 10,62 | 0,00 | 234,13 | 1 | 1,76 | 7,29 | 232,68 | 1 | 3,90 | 6,63 | 234,13 | 1 | 1,40 | 7,29 |
| RC102C10 | 436,05 | 5 | %16,1 | 7200,00 | 423,51 | 4 | 2,26 | -2,88 | 423,51 | 4 | 0,98 | -2,88 | 423,51 | 4 | 1,03 | -2,88 | 423,51 | 4 | 10,16 | -2,88 | 423,51 | 4 | 2,17 | -2,88 | 423,51 | 4 | 2,01 | -2,88 |
| RC108C10 | 345,93 | 3 | %0,0 | 108,40 | 345,93 | 3 | 1,74 | 0,00 | 345,93 | 3 | 1,33 | 0,00 | 345,93 | 3 | 1,52 | 0,00 | 345,93 | 3 | 5,49 | 0,00 | 345,93 | 3 | 5,75 | 0,00 | 345,93 | 3 | 2,54 | 0,00 |
| RC201C10 | 316,53 | 3 | %2,5 | 7200,00 | 310,06 | 3 | 2,48 | -2,05 | 310,06 | 3 | 2,81 | -2,05 | 310,06 | 3 | 1,84 | -2,05 | 325,89 | 3 | 19,01 | 2,96 | 310,06 | 3 | 2,67 | -2,05 | 310,06 | 3 | 0,88 | -2,05 |
| RC205C10 | 325,98 | 2 | %0,0 | 88,24 | 325,98 | 2 | 1,22 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,82 | 0,00 | 325,98 | 2 | 1,11 | 0,00 | 325,98 | 2 | 7,25 | 0,00 | 325,98 | 2 | 1,80 | 0,00 | 325,98 | 2 | 1,58 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%3,7** | **2471,41** | | | **5,05** | **0,82** | | | **9,69** | **-0,11** | | | **3,63** | **0,06** | | | **9,16** | **1,41** | | | **4,54** | **0,87** | | | **3,52** | **0,28** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.25:** EARP-ZP-EZTD 10 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP-EZTD | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101C10 | 402,25 | 4 | %3,4 | 7200,00 | 408,48 | 3 | 4,02 | 1,55 | 405,50 | 3 | 11,07 | 0,81 | 405,50 | 3 | 11,41 | 0,81 | 402,25 | 4 | 18,09 | 0,00 | 408,48 | 3 | 6,86 | 1,55 | 408,48 | 3 | 5,62 | 1,55 |
| C104C10 | 273,93 | 2 | %0,0 | 123,42 | 279,93 | 2 | 16,01 | 2,19 | 288,80 | 2 | 5,24 | 5,43 | 288,80 | 2 | 2,63 | 5,43 | 273,93 | 2 | 19,14 | 0,00 | 273,93 | 2 | 5,15 | 0,00 | 279,93 | 2 | 18,03 | 2,19 |
| C202C10 | 243,20 | 2 | %0,0 | 30,95 | 243,20 | 2 | 1,90 | 0,00 | 243,20 | 2 | 2,15 | 0,00 | 243,20 | 2 | 1,41 | 0,00 | 243,20 | 2 | 3,46 | 0,00 | 243,20 | 2 | 3,62 | 0,00 | 243,20 | 2 | 3,57 | 0,00 |
| C205C10 | 228,28 | 2 | %0,0 | 82,70 | 228,28 | 2 | 1,87 | 0,00 | 228,28 | 2 | 2,37 | 0,00 | 228,28 | 2 | 1,41 | 0,00 | 228,28 | 2 | 6,01 | 0,00 | 228,28 | 2 | 6,11 | 0,00 | 228,28 | 2 | 6,15 | 0,00 |
| R102C10 | 249,19 | 3 | %0,0 | 49,65 | 249,19 | 3 | 6,90 | 0,00 | 249,19 | 3 | 15,64 | 0,00 | 259,03 | 3 | 7,10 | 3,95 | 249,19 | 3 | 2,90 | 0,00 | 249,19 | 3 | 2,85 | 0,00 | 259,03 | 3 | 3,53 | 3,95 |
| R103C10 | 202,85 | 3 | %22,0 | 7200,00 | 206,51 | 3 | 13,72 | 1,80 | 207,10 | 3 | 14,99 | 2,09 | 206,51 | 3 | 16,74 | 1,80 | 207,87 | 3 | 1,24 | 2,47 | 207,87 | 3 | 1,23 | 2,47 | 202,85 | 3 | 7,22 | 0,00 |
| R201C10 | 228,36 | 2 | %0,0 | 301,01 | 228,36 | 2 | 0,42 | 0,00 | 228,36 | 2 | 0,42 | 0,00 | 228,36 | 2 | 0,42 | 0,00 | 228,36 | 2 | 2,23 | 0,00 | 228,36 | 2 | 2,23 | 0,00 | 228,36 | 2 | 2,56 | 0,00 |
| R203C10 | 218,21 | 1 | %0,0 | 72,54 | 232,68 | 1 | 1,04 | 6,63 | 232,68 | 1 | 2,38 | 6,63 | 232,68 | 1 | 2,67 | 6,63 | 232,68 | 1 | 4,53 | 6,63 | 232,68 | 1 | 5,56 | 6,63 | 232,68 | 1 | 4,77 | 6,63 |
| RC102C10 | 436,05 | 5 | %16,1 | 7200,00 | 423,51 | 4 | 3,82 | -2,88 | 423,51 | 4 | 2,74 | -2,88 | 423,51 | 4 | 3,07 | -2,88 | 423,51 | 4 | 3,18 | -2,88 | 423,51 | 4 | 3,54 | -2,88 | 423,51 | 4 | 3,17 | -2,88 |
| RC108C10 | 345,93 | 3 | %0,0 | 108,40 | 345,93 | 3 | 1,15 | 0,00 | 345,93 | 3 | 0,94 | 0,00 | 345,93 | 3 | 1,44 | 0,00 | 345,93 | 3 | 5,09 | 0,00 | 345,93 | 3 | 5,09 | 0,00 | 345,93 | 3 | 5,33 | 0,00 |
| RC201C10 | 316,53 | 3 | %2,5 | 7200,00 | 310,06 | 3 | 4,84 | -2,05 | 310,06 | 3 | 4,14 | -2,05 | 310,06 | 3 | 3,03 | -2,05 | 310,06 | 3 | 9,41 | -2,05 | 310,06 | 3 | 9,87 | -2,05 | 310,06 | 3 | 6,25 | -2,05 |
| RC205C10 | 325,98 | 2 | %0,0 | 88,24 | 325,98 | 2 | 1,76 | 0,00 | 325,98 | 2 | 1,34 | 0,00 | 325,98 | 2 | 0,49 | 0,00 | 325,98 | 2 | 1,72 | 0,00 | 325,98 | 2 | 1,74 | 0,00 | 325,98 | 2 | 3,22 | 0,00 |
| **Ortalama** | | | **%3,7** | **2471,41** | | | **4,79** | **0,60** | | | **5,29** | **0,84** | | | **4,32** | **1,14** | | | **6,42** | **0,35** | | | **4,49** | **0,48** | | | **5,79** | **0,78** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.26:** EARP-ZP-EZTD 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V1-V6 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP-EZTD | | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngü | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C103C15 | 375,17 | 4 | %16,9 | 7200,00 | 374,47 | 4 | 7,71 | -0,19 | 371,70 | 4 | 11,11 | -0,92 | 374,47 | 4 | 14,94 | -0,19 | 375,90 | 4 | 91,94 | 0,19 | 374,12 | 4 | 12,66 | -0,28 | 371,70 | 4 | 5,06 | -0,92 |
| C106C15 | 275,13 | 3 | %0,0 | 6,42 | 313,14 | 3 | 44,51 | 13,81 | 275,13 | 3 | 99,31 | 0,00 | 298,19 | 3 | 16,70 | 8,38 | 275,13 | 3 | 73,49 | 0,00 | 303,67 | 4 | 87,17 | 10,37 | 275,13 | 3 | 99,54 | 0,00 |
| C202C15 | 376,79 | 3 | %0,0 | 2695,00 | 396,55 | 3 | 3,53 | 5,24 | 401,01 | 4 | 0,30 | 6,43 | 394,59 | 3 | 91,01 | 4,72 | 401,01 | 4 | 0,33 | 6,43 | 376,79 | 3 | 70,98 | 0,00 | 376,79 | 3 | 25,22 | 0,00 |
| C208C15 | 300,55 | 2 | %0,0 | 43,00 | 317,21 | 2 | 51,74 | 5,54 | 300,55 | 2 | 49,44 | 0,00 | 305,80 | 2 | 64,93 | 1,75 | 300,55 | 2 | 84,83 | 0,00 | 305,80 | 2 | 44,23 | 1,75 | 301,00 | 2 | 98,18 | 0,15 |
| R102C15 | - | - | - | - | 428,25 | 5 | 17,95 | 0,0% | 428,25 | 5 | 36,34 | 0,0% | 428,25 | 5 | 33,07 | 0,0% | 439,22 | 6 | 68,61 | 2,6% | 428,25 | 5 | 10,54 | 0,0% | 428,25 | 5 | 31,85 | 0,0% |
| R105C15 | 336,15 | 4 | %0,0 | 211,42 | 347,88 | 4 | 7,94 | 3,49 | 347,88 | 4 | 10,98 | 3,49 | 347,88 | 4 | 8,24 | 3,49 | 358,35 | 5 | 0,22 | 6,60 | 336,15 | 4 | 113,76 | 0,00 | 347,88 | 4 | 8,02 | 3,49 |
| R202C15 | 358,00 | 2 | %0,0 | 1546,92 | 361,14 | 3 | 9,92 | 0,88 | 361,14 | 3 | 19,72 | 0,88 | 361,14 | 3 | 19,05 | 0,88 | 361,14 | 3 | 51,84 | 0,88 | 361,14 | 3 | 22,56 | 0,88 | 361,14 | 3 | 14,97 | 0,88 |
| R209C15 | 315,78 | 3 | %18,1 | 7200,00 | 301,10 | 2 | 112,46 | -4,65 | 293,20 | 2 | 73,82 | -7,15 | 301,30 | 2 | 3,42 | -4,59 | 301,30 | 2 | 41,95 | -4,59 | 293,94 | 2 | 114,06 | -6,92 | 301,30 | 2 | 13,03 | -4,59 |
| RC103C15 | 398,92 | 5 | %18,4 | 7200,00 | 420,77 | 5 | 5,48 | 5,48 | 397,67 | 4 | 24,19 | -0,31 | 397,67 | 4 | 8,68 | -0,31 | 420,77 | 5 | 24,23 | 5,48 | 397,67 | 4 | 17,43 | -0,31 | 420,77 | 5 | 3,45 | 5,48 |
| RC108C15 | 378,36 | 3 | %0,0 | 4637,10 | 378,36 | 3 | 55,16 | 0,00 | 378,36 | 3 | 52,56 | 0,00 | 378,36 | 3 | 33,59 | 0,00 | 378,36 | 3 | 97,20 | 0,00 | 378,36 | 3 | 39,01 | 0,00 | 378,36 | 3 | 28,67 | 0,00 |
| RC202C15 | 394,39 | 2 | %0,0 | 679,55 | 397,20 | 3 | 32,31 | 0,71 | 394,39 | 2 | 19,08 | 0,00 | 394,39 | 2 | 62,53 | 0,00 | 394,39 | 2 | 54,93 | 0,00 | 394,39 | 2 | 22,33 | 0,00 | 394,39 | 2 | 83,53 | 0,00 |
| RC204C15 | 310,58 | 2 | %0,0 | 192,67 | 312,32 | 2 | 8,34 | 0,56 | 310,58 | 2 | 105,49 | 0,00 | 310,90 | 2 | 29,66 | 0,10 | 312,24 | 2 | 69,25 | 0,53 | 315,46 | 2 | 27,76 | 1,57 | 310,81 | 2 | 146,68 | 0,07 |
| **Ortalama** | | | **%4,8** | **2873,83** | | | **29,75** | **2,57** | | | **41,86** | **0,20** | | | **32,15** | **1,19** | | | **54,90** | **1,30** | | | **48,54** | **0,59** | | | **46,52** | **0,38** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

**Tablo 5.27:** EARP-ZP-EZTD 15 Müşterili veri setlerinin kesin çözümü ile V7-V12 DKA çözümlerinin karşılaştırması

| | EARP-ZP-EZTD | | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CPLEX | | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| Veri Seti | f | m | Gap % | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C103C15 | 375,17 | 4 | %16,9 | 7200,00 | 371,70 | 4 | 52,39 | -0,92 | 374,47 | 4 | 53,99 | -0,19 | 371,70 | 4 | 64,89 | -0,92 | 371,70 | 4 | 83,40 | -0,92 | 371,70 | 4 | 84,53 | -0,92 | 371,70 | 4 | 82,12 | -0,92 |
| C106C15 | 275,13 | 3 | %0,0 | 6,42 | 275,13 | 3 | 89,51 | 0,00 | 275,13 | 3 | 74,81 | 0,00 | 275,13 | 3 | 82,13 | 0,00 | 289,72 | 3 | 116,05 | 5,30 | 298,19 | 3 | 12,33 | 8,38 | 275,13 | 3 | 87,32 | 0,00 |
| C202C15 | 376,79 | 3 | %0,0 | 2695,00 | 376,79 | 3 | 102,60 | 0,00 | 385,41 | 3 | 43,76 | 2,29 | 396,55 | 3 | 46,94 | 5,24 | 394,59 | 3 | 57,27 | 4,72 | 401,01 | 4 | 0,28 | 6,43 | 393,79 | 3 | 44,03 | 4,51 |
| C208C15 | 300,55 | 2 | %0,0 | 43,00 | 300,55 | 2 | 33,82 | 0,00 | 305,80 | 2 | 331,64 | 1,75 | 300,55 | 2 | 21,57 | 0,00 | 300,55 | 2 | 35,20 | 0,00 | 300,55 | 2 | 35,51 | 0,00 | 300,55 | 2 | 69,06 | 0,00 |
| R102C15 | - | - | - | - | 428,25 | 5 | 53,77 | 0,0% | 428,25 | 5 | 23,28 | 0,0% | 428,25 | 5 | 94,88 | 0,0% | 428,25 | 5 | 64,63 | 0,0% | 428,25 | 5 | 72,43 | 0,0% | 428,25 | 5 | 39,92 | 0,0% |
| R105C15 | 336,15 | 4 | %0,0 | 211,42 | 347,88 | 4 | 11,48 | 3,49 | 338,89 | 4 | 108,63 | 0,82 | 336,15 | 4 | 50,13 | 0,00 | 347,88 | 4 | 18,10 | 3,49 | 347,88 | 4 | 18,81 | 3,49 | 338,65 | 4 | 87,11 | 0,74 |
| R202C15 | 358,00 | 2 | %0,0 | 1546,92 | 358,00 | 2 | 111,76 | 0,00 | 361,14 | 3 | 10,55 | 0,88 | 361,14 | 3 | 5,53 | 0,88 | 361,17 | 3 | 60,21 | 0,89 | 361,14 | 3 | 77,20 | 0,88 | 361,17 | 3 | 77,81 | 0,89 |
| R209C15 | 315,78 | 3 | %18,1 | 7200,00 | 293,20 | 2 | 115,24 | -7,15 | 301,30 | 2 | 37,49 | -4,59 | 301,30 | 2 | 60,05 | -4,59 | 293,94 | 2 | 20,12 | -6,92 | 293,94 | 2 | 20,92 | -6,92 | 296,03 | 2 | 15,14 | -6,25 |
| RC103C15 | 398,92 | 5 | %18,4 | 7200,00 | 420,77 | 5 | 3,62 | 5,48 | 420,77 | 5 | 9,05 | 5,48 | 397,67 | 4 | 18,52 | -0,31 | 420,77 | 5 | 4,03 | 5,48 | 420,77 | 5 | 3,34 | 5,48 | 397,67 | 4 | 47,58 | -0,31 |
| RC108C15 | 378,36 | 3 | %0,0 | 4637,10 | 378,36 | 3 | 29,18 | 0,00 | 378,36 | 3 | 21,88 | 0,00 | 378,36 | 3 | 58,57 | 0,00 | 378,36 | 3 | 53,05 | 0,00 | 378,36 | 3 | 21,17 | 0,00 | 378,36 | 3 | 15,31 | 0,00 |
| RC202C15 | 394,39 | 2 | %0,0 | 679,55 | 394,39 | 2 | 21,03 | 0,00 | 394,39 | 2 | 66,13 | 0,00 | 394,39 | 2 | 54,11 | 0,00 | 399,05 | 2 | 44,44 | 1,18 | 406,79 | 2 | 15,31 | 3,14 | 397,16 | 2 | 114,24 | 0,70 |
| RC204C15 | 310,58 | 2 | %0,0 | 192,67 | 315,46 | 2 | 29,06 | 1,57 | 310,58 | 2 | 109,77 | 0,00 | 311,14 | 2 | 161,44 | 0,18 | 319,40 | 2 | 96,73 | 2,84 | 315,46 | 2 | 28,44 | 1,57 | 319,40 | 2 | 25,38 | 2,84 |
| **Ortalama** | | | **%4,8** | **2873,83** | | | **54,46** | **0,21** | | | **74,25** | **0,54** | | | **59,90** | **0,04** | | | **54,44** | **1,34** | | | **32,52** | **1,79** | | | **58,75** | **0,18** |

**f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **Gap**: CPLEX sonucunun optimum değere olan uzaklığı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün CPLEX çözümü ile farkı.

## 5.3 Büyük Boyutu Veri Setleri Kapsamında Sezgisel Çözüm Yöntemine ait Deney Sonuçları

Bir önceki bölümde 5, 10 ve 15 müşteri içeren küçük boyutlu veri setleri kapsamında tez çalışmasında geliştirilen DKA varyantlarından oluşan çözüm yöntemlerine ait deneysel sonuçlar kesin çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ise, her bir problem kapsamında 100 müşteri 21 şarj istasyonu içeren büyük boyutlu veri setlerinin tümü üzerinde test edilmiştir. Her bir veri seti için DKA'nın durdurma kriteri olarak 900 saniyelik CPU zamanı kadar zaman sınırı koyularak 10 tekrar yapılmıştır. Sonuçlar EARP, EARP-ZP, EARP-EZTD ve EARP-ZP-EZTD için her bir problem kapsamındaki sonuçlar ilgili alt başlık altında ayrı ayrı tablolarda sunularak karşılaştırılmıştır. Tabloların ilk sütununda ilgili veri setlerinin adları verilirken; ikinci, üçüncü ve dördüncü sütunda sırasıyla tüm DKA varyantlarının içinde bulunan en iyi çözüme (BEÇ'e) ait toplam mesafe (f), kullanılan EA sayısı (m) ve saniye olarak çözüm süresi (t) verilmiştir. Devam eden her dört sütunda ilgili DKA varyantına ait toplam mesafe (f), kullanılan EA sayısı (m) ve saniye olarak çözüm süresi (t) ve BEÇ'e ait mesafe değeri ile arasındaki farkın yüzdesi (%) verilmiştir. Her tablonun en alt satırında da ilgili sütunlardaki değerlerin ortalamaları bulunmaktadır.

### 5.3.1 Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, EARP kapsamında 100 müşteriden oluşan veri setlerinin tez çalışmasında geliştirilen DKA türevleri ile çözümünden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslamanın amacı, 12 farklı algoritmadan oluşan DKA türevlerinin EARP'yi çözmedeki etkinliğini ve performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bölüm 5.2'de küçük boyutlu veri setlerinin CPLEX ile elde edilen kesin çözüm sonuçları mevcut olduğu için DKA varyantları CPLEX ile karşılaştırılmıştı. Bu bölümde ise, büyük boyutlu veri setleri CPLEX ile çözülemediği için, DKA varyantlarına ait sonuçlardan BEÇ referans alınarak, her bir algoritmaya ait sonuçlar BEÇ ile karşılaştırılmıştır.

Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarının kullanılmasıyla tasarlanan 12 DKA versiyonuna ait tüm sonuçlar tek tabloya sığmadığı için iki tablo olarak sunulmuştur. EARP kapsamında 100 müşteri ve 21 Şİ'den oluşan büyük boyutlu 34 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonları ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.28'de; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonları ile elde edilen sonuçlar ise Tablo 5.29'da verilmiştir.

**Tablo 5.28:** EARP 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları

| | EARP | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngüsel | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101_21 | 867,75 | 10 | 850 | 894,23 | 10 | 667 | 3,05 | 867,75 | 10 | 850 | 0,00 | 885,28 | 10 | 575 | 2,02 | 942,53 | 10 | 878 | 8,62 | 939,76 | 10 | 599 | 8,30 | 908,21 | 10 | 853 | 4,66 |
| C201_21 | 609,79 | 4 | 721 | 646,12 | 5 | 900 | 5,96 | 618,14 | 4 | 930 | 1,37 | 623,56 | 4 | 837 | 2,26 | 701,50 | 6 | 758 | 15,04 | 627,30 | 3 | 739 | 2,87 | 643,06 | 5 | 882 | 5,46 |
| C204_21 | 594,77 | 3 | 889 | 646,12 | 5 | 887 | 8,63 | 594,77 | 3 | 889 | 0,00 | 618,52 | 4 | 715 | 3,99 | 670,02 | 5 | 810 | 12,65 | 627,30 | 3 | 730 | 5,47 | 642,22 | 3 | 585 | 7,98 |
| C206_21 | 602,79 | 4 | 810 | 642,35 | 5 | 871 | 6,56 | 605,31 | 4 | 864 | 0,42 | 618,52 | 4 | 714 | 2,61 | 670,02 | 5 | 809 | 11,15 | 625,12 | 3 | 789 | 3,70 | 644,26 | 3 | 578 | 6,88 |
| C207_21 | 605,31 | 4 | 864 | 642,35 | 5 | 871 | 6,12 | 605,31 | 4 | 864 | 0,00 | 618,52 | 4 | 705 | 2,18 | 670,02 | 5 | 813 | 10,69 | 625,12 | 3 | 781 | 3,27 | 644,26 | 3 | 586 | 6,43 |
| R101_21 | 938,98 | 8 | 779 | 953,84 | 9 | 838 | 1,58 | 948,48 | 9 | 804 | 1,01 | 938,98 | 8 | 779 | 0,00 | 1032,77 | 11 | 895 | 9,99 | 962,89 | 8 | 696 | 2,55 | 956,84 | 8 | 527 | 1,90 |
| R104_21 | 935,19 | 9 | 755 | 946,33 | 9 | 884 | 1,19 | 935,19 | 9 | 755 | 0,00 | 949,19 | 8 | 614 | 1,50 | 1029,98 | 9 | 667 | 10,14 | 974,80 | 8 | 831 | 4,24 | 968,05 | 8 | 733 | 3,51 |
| R106_21 | 930,51 | 8 | 868 | 930,51 | 8 | 868 | 0,00 | 946,58 | 9 | 847 | 1,73 | 969,71 | 8 | 736 | 4,21 | 1024,86 | 8 | 859 | 10,14 | 960,06 | 8 | 805 | 3,18 | 947,78 | 8 | 728 | 1,86 |
| R107_21 | 938,28 | 9 | 652 | 972,91 | 9 | 856 | 3,69 | 956,48 | 9 | 842 | 1,94 | 938,28 | 9 | 652 | 0,00 | 1065,97 | 12 | 587 | 13,61 | 961,60 | 9 | 837 | 2,49 | 992,93 | 8 | 897 | 5,82 |
| R108_21 | 942,59 | 8 | 724 | 944,81 | 8 | 892 | 0,24 | 1057,25 | 8 | 787 | 12,16 | 959,31 | 8 | 904 | 1,77 | 1071,46 | 9 | 812 | 13,67 | 1086,54 | 9 | 857 | 15,27 | 1072,26 | 8 | 796 | 13,76 |
| R109_21 | 941,25 | 8 | 872 | 941,25 | 8 | 872 | 0,00 | 973,81 | 8 | 682 | 3,46 | 973,90 | 8 | 831 | 3,47 | 1045,68 | 11 | 757 | 11,09 | 969,50 | 10 | 775 | 3,00 | 952,11 | 8 | 874 | 1,15 |
| R110_21 | 935,19 | 9 | 776 | 987,37 | 9 | 788 | 5,58 | 935,19 | 9 | 776 | 0,00 | 953,30 | 9 | 802 | 1,94 | 1029,98 | 9 | 670 | 10,14 | 974,80 | 8 | 832 | 4,24 | 956,88 | 8 | 896 | 2,32 |
| R111_21 | 947,68 | 8 | 851 | 977,37 | 9 | 878 | 3,13 | 955,10 | 8 | 427 | 0,78 | 966,64 | 9 | 724 | 2,00 | 1016,06 | 10 | 816 | 7,22 | 947,68 | 8 | 851 | 0,00 | 1029,54 | 8 | 806 | 8,64 |
| R112_21 | 914,98 | 8 | 887 | 973,27 | 10 | 721 | 6,37 | 914,98 | 8 | 887 | 0,00 | 970,32 | 8 | 844 | 6,05 | 1027,52 | 11 | 751 | 12,30 | 969,50 | 10 | 774 | 5,96 | 1020,19 | 8 | 828 | 11,50 |
| R201_21 | 707,89 | 2 | 885 | 727,71 | 2 | 610 | 2,80 | 739,72 | 2 | 959 | 4,50 | 729,10 | 2 | 656 | 3,00 | 819,83 | 2 | 901 | 15,81 | 810,13 | 2 | 963 | 14,44 | 839,40 | 2 | 566 | 18,58 |
| R202_21 | 694,83 | 2 | 678 | 702,81 | 4 | 507 | 1,15 | 776,44 | 2 | 890 | 11,75 | 706,69 | 2 | 643 | 1,71 | 811,53 | 2 | 944 | 16,80 | 802,32 | 2 | 951 | 15,47 | 840,61 | 2 | 466 | 20,98 |
| R203_21 | 721,64 | 2 | 886 | 727,71 | 2 | 592 | 0,84 | 739,72 | 2 | 824 | 2,51 | 729,10 | 2 | 661 | 1,03 | 819,48 | 2 | 916 | 13,56 | 810,13 | 2 | 948 | 12,26 | 839,40 | 2 | 574 | 16,32 |
| R204_21 | 698,05 | 2 | 841 | 700,66 | 4 | 860 | 0,37 | 749,34 | 2 | 710 | 7,35 | 704,26 | 4 | 884 | 0,89 | 812,08 | 2 | 897 | 16,34 | 799,59 | 2 | 952 | 14,55 | 835,98 | 2 | 365 | 19,76 |
| R205_21 | 719,98 | 2 | 570 | 719,98 | 2 | 570 | 0,00 | 792,11 | 2 | 458 | 10,02 | 726,20 | 3 | 781 | 0,86 | 846,30 | 2 | 927 | 17,54 | 815,36 | 2 | 902 | 13,25 | 841,34 | 2 | 553 | 16,86 |
| R206_21 | 704,85 | 2 | 671 | 727,52 | 2 | 617 | 3,22 | 734,06 | 2 | 887 | 4,14 | 730,90 | 3 | 598 | 3,70 | 855,24 | 2 | 916 | 21,34 | 844,08 | 2 | 865 | 19,75 | 851,89 | 2 | 606 | 20,86 |
| R207_21 | 700,66 | 4 | 916 | 700,66 | 4 | 916 | 0,00 | 744,97 | 2 | 912 | 6,32 | 704,05 | 3 | 810 | 0,48 | 816,00 | 2 | 923 | 16,46 | 806,73 | 2 | 974 | 15,14 | 839,17 | 2 | 421 | 19,77 |
| R208_21 | 702,81 | 4 | 441 | 702,81 | 4 | 441 | 0,00 | 749,13 | 2 | 1023 | 6,59 | 708,14 | 3 | 841 | 0,76 | 809,91 | 2 | 932 | 15,24 | 811,81 | 2 | 968 | 15,51 | 840,41 | 2 | 523 | 19,58 |
| R209_21 | 711,38 | 2 | 639 | 727,52 | 2 | 623 | 2,27 | 734,06 | 2 | 886 | 3,19 | 726,46 | 4 | 883 | 2,12 | 855,24 | 2 | 907 | 20,22 | 844,08 | 2 | 852 | 18,65 | 851,89 | 2 | 684 | 19,75 |
| R210_21 | 727,71 | 2 | 617 | 727,71 | 2 | 617 | 0,00 | 739,72 | 2 | 797 | 1,65 | 729,10 | 2 | 646 | 0,19 | 819,48 | 2 | 903 | 12,61 | 810,13 | 2 | 959 | 11,33 | 839,40 | 2 | 573 | 15,35 |
| R211_21 | 700,66 | 4 | 795 | 700,66 | 4 | 795 | 0,00 | 742,89 | 2 | 988 | 6,03 | 702,66 | 2 | 789 | 0,29 | 816,00 | 2 | 930 | 16,46 | 806,73 | 2 | 976 | 15,14 | 836,81 | 2 | 425 | 19,43 |
| RC101_21 | 1098,01 | 9 | 739 | 1168,26 | 9 | 890 | 6,40 | 1185,83 | 10 | 789 | 8,00 | 1098,01 | 9 | 739 | 0,00 | 1190,08 | 10 | 876 | 8,39 | 1189,12 | 10 | 797 | 8,30 | 1201,77 | 10 | 906 | 9,45 |
| RC201_21 | 710,12 | 2 | 916 | 737,92 | 4 | 856 | 3,91 | 710,12 | 2 | 916 | 0,00 | 738,23 | 5 | 531 | 3,96 | 824,59 | 2 | 945 | 16,12 | 754,89 | 3 | 768 | 6,30 | 754,89 | 3 | 547 | 6,30 |
| RC202_21 | 712,49 | 4 | 783 | 721,71 | 3 | 782 | 1,29 | 714,23 | 3 | 819 | 0,24 | 712,49 | 4 | 783 | 0,00 | 995,11 | 3 | 633 | 39,67 | 983,45 | 3 | 958 | 38,03 | 1007,96 | 2 | 978 | 41,47 |
| RC203_21 | 737,92 | 4 | 887 | 737,92 | 4 | 887 | 0,00 | 740,88 | 4 | 920 | 0,40 | 738,23 | 5 | 524 | 0,04 | 814,38 | 2 | 889 | 10,36 | 771,83 | 4 | 919 | 4,60 | 760,57 | 3 | 922 | 3,07 |
| RC204_21 | 755,26 | 4 | 855 | 777,12 | 4 | 910 | 2,89 | 755,26 | 4 | 855 | 0,00 | 761,50 | 4 | 834 | 0,83 | 1016,63 | 3 | 446 | 34,61 | 980,08 | 3 | 969 | 29,77 | 1028,01 | 3 | 980 | 36,11 |
| RC205_21 | 745,19 | 4 | 814 | 772,21 | 5 | 844 | 3,63 | 747,91 | 3 | 966 | 0,37 | 745,19 | 4 | 814 | 0,00 | 816,40 | 2 | 935 | 9,56 | 765,20 | 3 | 918 | 2,69 | 1013,41 | 3 | 586 | 35,99 |
| RC206_21 | 712,49 | 4 | 888 | 737,71 | 2 | 494 | 3,54 | 719,08 | 4 | 531 | 0,92 | 712,49 | 4 | 888 | 0,00 | 978,46 | 3 | 983 | 37,33 | 988,45 | 3 | 736 | 38,73 | 1020,19 | 3 | 270 | 43,19 |
| RC207_21 | 712,72 | 2 | 909 | 735,99 | 4 | 902 | 3,26 | 712,72 | 2 | 909 | 0,00 | 730,41 | 4 | 759 | 2,48 | 823,96 | 2 | 920 | 15,61 | 757,95 | 3 | 776 | 6,35 | 757,95 | 3 | 549 | 6,35 |
| RC208_21 | 755,37 | 5 | 909 | 757,07 | 2 | 841 | 0,23 | 758,40 | 4 | 907 | 0,40 | 761,65 | 4 | 827 | 0,83 | 993,54 | 3 | 565 | 31,53 | 993,54 | 3 | 907 | 31,53 | 1016,14 | 2 | 641 | 34,52 |
| **Ortalama** | **777,5** | **4,9** | **792** | 797,4 | 5,2 | 775 | **2,59** | 800,0 | 4,7 | 828 | **2,86** | 790,6 | 5,1 | 745 | **1,68** | 898,0 | 5,1 | 828 | **15,94** | 864,6 | 4,6 | 852 | **11,66** | 888,1 | 4,4 | 668 | **14,87** |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

**Tablo 5.29:** EARP 100 Müşterili veri setlerinin V7-V12 DKA çözüm sonuçları

| | EARP | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101_21 | 867,75 | 10 | 850 | 921,31 | 10 | 875 | 6,17 | 932,12 | 10 | 808 | 7,42 | 915,88 | 10 | 855 | 5,55 | 983,54 | 10 | 401 | 13,34 | 958,83 | 10 | 650 | 10,50 | 931,36 | 10 | 279 | 7,33 |
| C201_21 | 609,79 | 4 | 721 | 648,31 | 5 | 730 | 6,32 | 629,38 | 3 | 893 | 3,21 | 630,72 | 3 | 902 | 3,43 | 662,29 | 5 | 626 | 8,61 | 609,79 | 4 | 721 | 0,00 | 653,03 | 5 | 477 | 7,09 |
| C204_21 | 594,77 | 3 | 889 | 644,82 | 3 | 865 | 8,42 | 633,21 | 3 | 812 | 6,46 | 627,32 | 3 | 545 | 5,47 | 619,87 | 4 | 591 | 4,22 | 619,07 | 4 | 635 | 4,09 | 611,92 | 4 | 624 | 2,88 |
| C206_21 | 602,79 | 4 | 810 | 602,79 | 4 | 810 | 0,00 | 610,41 | 3 | 931 | 1,26 | 627,68 | 5 | 799 | 4,13 | 664,70 | 5 | 824 | 10,27 | 661,91 | 5 | 741 | 9,81 | 623,71 | 4 | 459 | 3,47 |
| C207_21 | 605,31 | 4 | 864 | 648,64 | 5 | 843 | 7,16 | 659,48 | 5 | 850 | 8,95 | 611,48 | 3 | 901 | 1,02 | 628,79 | 4 | 783 | 3,88 | 621,91 | 4 | 909 | 2,74 | 654,83 | 3 | 585 | 8,18 |
| R101_21 | 938,98 | 8 | 779 | 984,45 | 10 | 899 | 4,84 | 967,79 | 8 | 859 | 3,07 | 976,11 | 8 | 888 | 3,95 | 1035,84 | 8 | 518 | 10,32 | 1048,79 | 11 | 725 | 11,69 | 1006,70 | 10 | 682 | 7,21 |
| R104_21 | 935,19 | 9 | 755 | 972,05 | 8 | 684 | 3,94 | 958,53 | 10 | 877 | 2,50 | 960,61 | 9 | 815 | 2,72 | 1006,07 | 9 | 522 | 7,58 | 1032,39 | 10 | 857 | 10,39 | 1020,97 | 10 | 904 | 9,17 |
| R106_21 | 930,51 | 8 | 868 | 973,91 | 8 | 432 | 4,66 | 935,24 | 8 | 872 | 0,51 | 958,38 | 8 | 531 | 3,00 | 1021,05 | 8 | 619 | 9,73 | 1022,58 | 8 | 821 | 9,89 | 1022,42 | 8 | 345 | 9,88 |
| R107_21 | 938,28 | 9 | 652 | 964,09 | 10 | 666 | 2,75 | 980,86 | 10 | 734 | 4,54 | 965,68 | 10 | 727 | 2,92 | 1042,99 | 11 | 446 | 11,16 | 991,09 | 9 | 464 | 5,63 | 1020,64 | 10 | 360 | 8,78 |
| R108_21 | 942,59 | 8 | 724 | 972,34 | 8 | 789 | 3,16 | 942,59 | 8 | 724 | 0,00 | 949,75 | 8 | 701 | 0,76 | 1017,55 | 8 | 744 | 7,95 | 1019,69 | 8 | 577 | 8,18 | 999,41 | 8 | 788 | 6,03 |
| R109_21 | 941,25 | 8 | 872 | 964,05 | 9 | 909 | 2,42 | 956,55 | 9 | 842 | 1,63 | 993,28 | 10 | 853 | 5,53 | 1025,84 | 8 | 562 | 8,99 | 1043,48 | 9 | 808 | 10,86 | 1040,75 | 9 | 338 | 10,57 |
| R110_21 | 935,19 | 9 | 776 | 958,13 | 9 | 834 | 2,45 | 948,52 | 9 | 905 | 1,43 | 946,58 | 9 | 713 | 1,22 | 1016,00 | 9 | 465 | 8,64 | 1035,54 | 10 | 612 | 10,73 | 1005,70 | 8 | 746 | 7,54 |
| R111_21 | 947,68 | 8 | 851 | 966,61 | 10 | 836 | 2,00 | 971,44 | 9 | 888 | 2,51 | 974,06 | 9 | 860 | 2,78 | 1023,04 | 8 | 636 | 7,95 | 1046,03 | 9 | 778 | 10,38 | 1047,51 | 8 | 840 | 10,53 |
| R112_21 | 914,98 | 8 | 887 | 959,50 | 8 | 894 | 4,87 | 970,22 | 9 | 791 | 6,04 | 969,85 | 9 | 901 | 6,00 | 1050,54 | 10 | 875 | 14,82 | 1068,56 | 9 | 899 | 16,79 | 1040,02 | 8 | 899 | 13,67 |
| R201_21 | 707,89 | 2 | 885 | 707,89 | 2 | 885 | 0,00 | 753,78 | 2 | 767 | 6,48 | 745,11 | 2 | 554 | 5,26 | 857,82 | 2 | 217 | 21,18 | 861,23 | 2 | 48 | 21,66 | 864,71 | 2 | 550 | 22,15 |
| R202_21 | 694,83 | 2 | 678 | 712,77 | 2 | 908 | 2,58 | 694,83 | 2 | 678 | 0,00 | 716,13 | 2 | 564 | 3,07 | 833,93 | 2 | 481 | 20,02 | 855,22 | 2 | 46 | 23,08 | 855,22 | 2 | 46 | 23,08 |
| R203_21 | 721,64 | 2 | 886 | 760,51 | 2 | 719 | 5,39 | 752,55 | 2 | 797 | 4,28 | 721,64 | 2 | 886 | 0,00 | 861,23 | 2 | 60 | 19,34 | 854,07 | 2 | 210 | 18,35 | 858,00 | 2 | 185 | 18,90 |
| R204_21 | 698,05 | 2 | 841 | 698,05 | 2 | 841 | 0,00 | 713,89 | 2 | 951 | 2,27 | 733,96 | 2 | 381 | 5,14 | 853,98 | 2 | 189 | 22,34 | 853,65 | 2 | 831 | 22,29 | 853,65 | 2 | 814 | 22,29 |
| R205_21 | 719,98 | 2 | 570 | 763,21 | 2 | 701 | 6,00 | 747,69 | 2 | 583 | 3,85 | 727,71 | 2 | 685 | 1,07 | 855,09 | 2 | 207 | 18,77 | 855,09 | 2 | 200 | 18,77 | 860,93 | 2 | 56 | 19,58 |
| R206_21 | 704,85 | 2 | 671 | 761,55 | 2 | 866 | 8,04 | 764,79 | 2 | 800 | 8,50 | 704,85 | 2 | 671 | 0,00 | 864,98 | 2 | 195 | 22,72 | 862,20 | 2 | 47 | 22,32 | 858,00 | 2 | 191 | 21,73 |
| R207_21 | 700,66 | 4 | 916 | 729,36 | 2 | 936 | 4,10 | 730,65 | 2 | 549 | 4,28 | 728,62 | 2 | 601 | 3,99 | 848,65 | 2 | 868 | 21,12 | 847,42 | 2 | 865 | 20,95 | 817,44 | 2 | 921 | 16,67 |
| R208_21 | 702,81 | 4 | 441 | 732,52 | 2 | 582 | 4,23 | 752,82 | 2 | 965 | 7,12 | 734,24 | 2 | 644 | 4,47 | 859,15 | 2 | 192 | 22,24 | 862,38 | 2 | 50 | 22,70 | 855,31 | 2 | 150 | 21,70 |
| R209_21 | 711,38 | 2 | 639 | 711,38 | 2 | 639 | 0,00 | 724,08 | 2 | 747 | 1,79 | 733,80 | 2 | 429 | 3,15 | 863,21 | 2 | 60 | 21,34 | 853,82 | 2 | 424 | 20,02 | 863,21 | 2 | 50 | 21,34 |
| R210_21 | 727,71 | 2 | 617 | 738,87 | 2 | 885 | 1,53 | 757,78 | 2 | 363 | 4,13 | 733,77 | 2 | 459 | 0,83 | 857,82 | 2 | 218 | 17,88 | 861,23 | 2 | 49 | 18,35 | 864,71 | 2 | 561 | 18,83 |
| R211_21 | 700,66 | 4 | 795 | 736,36 | 2 | 895 | 5,10 | 735,53 | 2 | 841 | 4,98 | 720,81 | 2 | 636 | 2,88 | 848,41 | 2 | 941 | 21,09 | 854,07 | 2 | 820 | 21,90 | 821,88 | 2 | 952 | 17,30 |
| RC101_21 | 1098,01 | 9 | 739 | 1191,29 | 10 | 874 | 8,50 | 1177,58 | 10 | 808 | 7,25 | 1137,48 | 10 | 756 | 3,59 | 1258,90 | 11 | 461 | 14,65 | 1260,91 | 11 | 828 | 14,84 | 1206,61 | 10 | 614 | 9,89 |
| RC201_21 | 710,12 | 2 | 916 | 760,90 | 4 | 891 | 7,15 | 775,78 | 5 | 900 | 9,25 | 734,80 | 4 | 593 | 3,48 | 750,73 | 2 | 513 | 5,72 | 762,81 | 5 | 859 | 7,42 | 754,09 | 2 | 713 | 6,19 |
| RC202_21 | 712,49 | 4 | 783 | 746,37 | 2 | 900 | 4,76 | 756,97 | 4 | 830 | 6,24 | 784,35 | 2 | 627 | 10,09 | 840,42 | 2 | 928 | 17,96 | 806,58 | 2 | 873 | 13,21 | 866,34 | 2 | 534 | 21,59 |
| RC203_21 | 737,92 | 4 | 887 | 787,38 | 5 | 924 | 6,70 | 773,20 | 5 | 912 | 4,78 | 744,63 | 4 | 903 | 0,91 | 752,31 | 5 | 597 | 1,95 | 752,84 | 5 | 845 | 2,02 | 743,24 | 4 | 764 | 0,72 |
| RC204_21 | 755,26 | 4 | 855 | 816,39 | 5 | 805 | 8,09 | 797,59 | 5 | 902 | 5,60 | 783,75 | 4 | 906 | 3,77 | 889,95 | 2 | 853 | 17,83 | 934,34 | 2 | 476 | 23,71 | 875,29 | 2 | 797 | 15,89 |
| RC205_21 | 745,19 | 4 | 814 | 818,66 | 4 | 895 | 9,86 | 759,59 | 5 | 732 | 1,93 | 775,80 | 5 | 874 | 4,11 | 782,11 | 5 | 663 | 4,95 | 774,88 | 6 | 334 | 3,98 | 774,32 | 4 | 657 | 3,91 |
| RC206_21 | 712,49 | 4 | 888 | 731,93 | 4 | 892 | 2,73 | 755,49 | 2 | 969 | 6,04 | 734,14 | 3 | 883 | 3,04 | 754,37 | 2 | 415 | 5,88 | 754,99 | 5 | 609 | 5,96 | 752,13 | 5 | 317 | 5,56 |
| RC207_21 | 712,72 | 2 | 909 | 773,08 | 4 | 825 | 8,47 | 762,15 | 5 | 787 | 6,94 | 777,99 | 5 | 901 | 9,16 | 743,73 | 5 | 622 | 4,35 | 743,32 | 5 | 872 | 4,29 | 751,10 | 4 | 925 | 5,39 |
| RC208_21 | 755,37 | 5 | 909 | 786,09 | 2 | 1002 | 4,07 | 791,79 | 5 | 522 | 4,82 | 755,37 | 5 | 909 | 0,00 | 1051,54 | 3 | 249 | 39,21 | 1051,54 | 3 | 240 | 39,21 | 1051,74 | 3 | 179 | 39,24 |
| **Ortalama** | **777,5** | **4,9** | **792** | 813,1 | 5,0 | 822 | **4,60** | 811,0 | 5,1 | 800 | **4,41** | 804,0 | 4,9 | 731 | **3,43** | 883,1 | 4,9 | 516 | **13,76** | 883,6 | 5,2 | 580 | **13,73** | 877,3 | 4,8 | 538 | **13,07** |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

### 5.3.2 Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, EARP-ZP kapsamında 100 müşteri ve 21 Şİ'den oluşan veri setlerinin tez çalışmasında geliştirilen DKA türevleri ile çözümünden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslamanın amacı, 12 farklı algoritmadan oluşan DKA türevlerinin EARP-ZP'yi çözmedeki etkinliğini ve performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bölüm 5.2'de küçük boyutlu veri setlerinin CPLEX ile elde edilen kesin çözüm sonuçları mevcut olduğu için DKA varyantları CPLEX ile karşılaştırılmıştı. Bu bölümde ise, büyük boyutlu veri setleri CPLEX ile çözülemediği için, DKA varyantlarına ait sonuçlardan BEÇ referans alınarak, her bir algoritmaya ait sonuçlar BEÇ ile karşılaştırılmıştır.

Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarının kullanılmasıyla tasarlanan 12 DKA versiyonuna ait tüm sonuçlar tek tabloya sığmadığı için iki tablo olarak sunulmuştur. EARP-ZP kapsamında 100 müşteri ve 21 Şİ'den oluşan büyük boyutlu 56 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonları ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.30'da; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonları ile elde edilen sonuçlar ise Tablo 5.31'de verilmiştir.

**Tablo 5.30:** EARP-ZP 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-ZP | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngüsel | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101_21 | 1259,23 | 15 | 814 | 1278,33 | 15 | 770 | 1,52 | 1305,70 | 16 | 380 | 3,69 | 1259,23 | 15 | 814 | 0,00 | 1386,78 | 18 | 714 | 10,13 | 1294,70 | 15 | 656 | 2,82 | 1268,44 | 14 | 807 | 0,73 |
| C102_21 | 1212,88 | 15 | 940 | 1389,55 | 15 | 814 | 14,57 | 1212,88 | 15 | 940 | 0,00 | 1322,83 | 16 | 704 | 9,07 | 1365,30 | 18 | 395 | 12,57 | 1229,52 | 15 | 999 | 1,37 | 1229,52 | 15 | 737 | 1,37 |
| C103_21 | 1234,54 | 14 | 1058 | 1320,11 | 15 | 903 | 6,93 | 1269,36 | 16 | 834 | 2,82 | 1312,31 | 13 | 1074 | 6,30 | 1450,53 | 16 | 654 | 17,50 | 1393,20 | 16 | 1017 | 12,85 | 1234,54 | 14 | 1058 | 0,00 |
| C104_21 | 1098,92 | 13 | 706 | 1142,52 | 14 | 900 | 3,97 | 1137,18 | 13 | 963 | 3,48 | 1098,92 | 13 | 706 | 0,00 | 1169,52 | 13 | 494 | 6,42 | 1137,36 | 13 | 609 | 3,50 | 1131,87 | 13 | 964 | 3,00 |
| C105_21 | 1256,70 | 14 | 677 | 1356,85 | 15 | 853 | 7,97 | 1325,24 | 16 | 372 | 5,45 | 1275,42 | 14 | 783 | 1,49 | 1519,49 | 20 | 625 | 20,91 | 1311,79 | 15 | 597 | 4,38 | 1311,79 | 15 | 517 | 4,38 |
| C106_21 | 1166,38 | 14 | 848 | 1166,38 | 14 | 848 | 0,00 | 1175,13 | 14 | 377 | 0,75 | 1207,75 | 14 | 802 | 3,55 | 1484,02 | 19 | 786 | 27,23 | 1326,13 | 17 | 591 | 13,70 | 1326,13 | 17 | 616 | 13,70 |
| C107_21 | 1182,57 | 13 | 545 | 1222,47 | 14 | 888 | 3,37 | 1203,03 | 13 | 698 | 1,73 | 1253,75 | 15 | 955 | 6,02 | 1396,93 | 13 | 866 | 18,13 | 1262,80 | 15 | 706 | 6,78 | 1378,35 | 13 | 480 | 16,56 |
| C108_21 | 1278,22 | 15 | 975 | 1355,09 | 16 | 921 | 6,01 | 1304,01 | 15 | 1036 | 2,02 | 1341,01 | 15 | 857 | 4,91 | 1383,32 | 14 | 910 | 8,22 | 1366,28 | 14 | 874 | 6,89 | 1366,28 | 14 | 774 | 6,89 |
| C109_21 | 1209,45 | 13 | 877 | 1217,43 | 14 | 1059 | 0,66 | 1215,39 | 12 | 959 | 0,49 | 1239,70 | 14 | 858 | 2,50 | 1321,26 | 17 | 943 | 9,24 | 1211,04 | 13 | 759 | 0,13 | 1209,45 | 13 | 877 | 0,00 |
| C201_21 | 946,37 | 8 | 835 | 1212,31 | 14 | 915 | 28,10 | 999,55 | 10 | 1240 | 5,62 | 1037,98 | 12 | 395 | 9,68 | 1365,52 | 18 | 523 | 44,29 | 984,32 | 9 | 766 | 4,01 | 946,37 | 8 | 835 | 0,00 |
| C202_21 | 1027,51 | 8 | 3470 | 1046,18 | 10 | 1961 | 1,82 | 1033,29 | 11 | 619 | 0,56 | 1134,44 | 15 | 1018 | 10,41 | 1458,52 | 20 | 4 | 41,95 | 1066,59 | 8 | 879 | 3,80 | 1066,59 | 8 | 872 | 3,80 |
| C203_21 | 860,42 | 9 | 3036 | 1119,44 | 13 | 1280 | 30,10 | 982,03 | 11 | 1576 | 14,13 | 860,42 | 9 | 3036 | 0,00 | 1281,47 | 16 | 394 | 48,94 | 1280,81 | 16 | 395 | 48,86 | 1062,91 | 12 | 861 | 23,53 |
| C204_21 | 777,91 | 7 | 3636 | 890,76 | 8 | 924 | 14,51 | 777,91 | 7 | 3636 | 0,00 | 828,26 | 8 | 713 | 6,47 | 997,77 | 12 | 903 | 28,26 | 842,42 | 7 | 835 | 8,29 | 842,68 | 7 | 940 | 8,33 |
| C205_21 | 895,28 | 9 | 1721 | 1050,62 | 10 | 2167 | 17,35 | 895,28 | 9 | 1721 | 0,00 | 986,63 | 9 | 1455 | 10,20 | 1177,02 | 15 | 872 | 31,47 | 940,68 | 10 | 846 | 5,07 | 904,09 | 8 | 2123 | 0,98 |
| C206_21 | 861,92 | 8 | 803 | 902,89 | 10 | 1290 | 4,75 | 923,22 | 9 | 1071 | 7,11 | 922,69 | 8 | 1678 | 7,05 | 1106,86 | 13 | 749 | 28,42 | 909,95 | 8 | 904 | 5,57 | 915,43 | 8 | 2062 | 6,21 |
| C207_21 | 880,00 | 8 | 2355 | 880,00 | 8 | 2355 | 0,00 | 891,63 | 8 | 2334 | 1,32 | 901,39 | 6 | 7090 | 2,43 | 1103,55 | 13 | 235 | 25,40 | 1094,48 | 12 | 929 | 24,37 | 1002,58 | 9 | 864 | 13,93 |
| C208_21 | 901,33 | 10 | 985 | 1094,29 | 14 | 772 | 21,41 | 901,33 | 10 | 985 | 0,00 | 979,20 | 8 | 874 | 8,64 | 1232,75 | 16 | 667 | 36,77 | 1079,33 | 8 | 936 | 19,75 | 1029,83 | 7 | 917 | 14,26 |
| R101_21 | 2057,38 | 26 | 890 | 2159,54 | 25 | 873 | 4,97 | 2142,47 | 27 | 778 | 4,14 | 2057,38 | 26 | 890 | 0,00 | 2345,13 | 27 | 804 | 13,99 | 2248,11 | 25 | 890 | 9,27 | 2209,29 | 26 | 902 | 7,38 |
| R102_21 | 1949,90 | 23 | 616 | 2049,32 | 23 | 916 | 5,10 | 1949,90 | 23 | 616 | 0,00 | 2026,61 | 23 | 791 | 3,93 | 2219,22 | 25 | 775 | 13,81 | 1978,26 | 22 | 924 | 1,45 | 1968,45 | 24 | 845 | 0,95 |
| R103_21 | 1872,63 | 21 | 916 | 1898,63 | 20 | 948 | 1,39 | 1872,63 | 21 | 916 | 0,00 | 1884,19 | 19 | 606 | 0,62 | 2295,97 | 22 | 917 | 22,61 | 2005,42 | 22 | 900 | 7,09 | 2019,85 | 22 | 922 | 7,86 |
| R104_21 | 1626,25 | 18 | 909 | 1788,84 | 18 | 952 | 10,00 | 1626,25 | 18 | 909 | 0,00 | 1627,49 | 16 | 824 | 0,08 | 2064,93 | 22 | 884 | 26,97 | 1852,55 | 18 | 745 | 13,92 | 1678,88 | 18 | 737 | 3,24 |
| R105_21 | 1925,03 | 20 | 782 | 1979,14 | 23 | 917 | 2,81 | 1974,58 | 21 | 899 | 2,57 | 1925,03 | 20 | 782 | 0,00 | 2213,29 | 22 | 812 | 14,97 | 2046,80 | 21 | 930 | 6,33 | 2041,18 | 21 | 770 | 6,03 |
| R106_21 | 1837,27 | 20 | 875 | 1948,73 | 21 | 652 | 6,07 | 1837,27 | 20 | 875 | 0,00 | 1870,46 | 19 | 743 | 1,81 | 2105,98 | 19 | 842 | 14,63 | 1999,32 | 20 | 923 | 8,82 | 1920,75 | 20 | 895 | 4,54 |
| R107_21 | 1408,28 | 16 | 651 | 1460,15 | 18 | 918 | 3,68 | 1439,39 | 17 | 617 | 2,21 | 1452,05 | 18 | 590 | 3,11 | 1470,63 | 18 | 912 | 4,43 | 1475,00 | 18 | 580 | 4,74 | 1408,28 | 16 | 651 | 0,00 |
| R108_21 | 1518,87 | 16 | 788 | 1737,90 | 18 | 918 | 14,42 | 1563,63 | 16 | 931 | 2,95 | 1552,92 | 15 | 819 | 2,24 | 1900,91 | 18 | 871 | 25,15 | 1638,57 | 15 | 898 | 7,88 | 1586,12 | 16 | 962 | 4,43 |
| R109_21 | 1506,31 | 17 | 890 | 1507,17 | 18 | 862 | 0,06 | 1523,34 | 18 | 702 | 1,13 | 1506,31 | 17 | 890 | 0,00 | 1572,51 | 17 | 745 | 4,39 | 1510,28 | 18 | 491 | 0,26 | 1510,28 | 18 | 537 | 0,26 |
| R110_21 | 1280,52 | 14 | 609 | 1318,36 | 16 | 696 | 2,96 | 1304,73 | 15 | 904 | 1,89 | 1307,27 | 15 | 833 | 2,09 | 1333,14 | 16 | 836 | 4,11 | 1333,14 | 16 | 617 | 4,11 | 1324,40 | 16 | 733 | 3,43 |
| R111_21 | 1351,60 | 15 | 708 | 1389,39 | 15 | 877 | 2,80 | 1351,60 | 15 | 708 | 0,00 | 1358,49 | 15 | 818 | 0,51 | 1465,94 | 20 | 691 | 8,46 | 1429,27 | 18 | 835 | 5,75 | 1368,80 | 16 | 597 | 1,27 |
| R112_21 | 1259,74 | 13 | 1020 | 1286,75 | 13 | 1112 | 2,14 | 1261,62 | 13 | 917 | 0,15 | 1287,77 | 13 | 624 | 2,23 | 1354,66 | 17 | 289 | 7,53 | 1277,52 | 13 | 956 | 1,41 | 1272,97 | 13 | 1009 | 1,05 |
| R201_21 | 1282,63 | 10 | 781 | 1303,99 | 11 | 1212 | 1,67 | 1297,02 | 10 | 242 | 1,12 | 1302,30 | 12 | 1180 | 1,53 | 1363,42 | 12 | 660 | 6,30 | 1282,63 | 10 | 781 | 0,00 | 1293,18 | 10 | 1185 | 0,82 |
| R202_21 | 1143,86 | 6 | 922 | 1187,08 | 12 | 831 | 3,78 | 1147,78 | 9 | 197 | 0,34 | 1158,35 | 7 | 2310 | 1,27 | 1199,82 | 9 | 742 | 4,89 | 1143,86 | 6 | 922 | 0,00 | 1151,27 | 6 | 6427 | 0,65 |
| R203_21 | 1009,47 | 8 | 3080 | 1032,05 | 9 | 2499 | 2,24 | 1009,47 | 8 | 3080 | 0,00 | 1019,32 | 7 | 627 | 0,98 | 1196,98 | 15 | 188 | 18,58 | 1077,66 | 10 | 837 | 6,76 | 1069,97 | 9 | 750 | 5,99 |
| R204_21 | 857,92 | 5 | 915 | 914,49 | 6 | 3503 | 6,59 | 873,32 | 7 | 1406 | 1,80 | 857,92 | 5 | 915 | 0,00 | 883,19 | 7 | 866 | 2,95 | 883,19 | 7 | 386 | 2,95 | 883,19 | 7 | 328 | 2,95 |
| R205_21 | 1100,24 | 9 | 1086 | 1157,31 | 13 | 734 | 5,19 | 1100,24 | 9 | 1086 | 0,00 | 1121,62 | 11 | 1027 | 1,94 | 1182,43 | 6 | 730 | 7,47 | 1163,54 | 9 | 478 | 5,75 | 1102,45 | 5 | 9998 | 0,20 |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

**Tablo 5.30 (devam):** EARP-ZP 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-ZP | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngüsel | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| R206_21 | 1071,99 | 8 | 2129 | 1108,51 | 6 | 6840 | 3,41 | 1074,27 | 10 | 1287 | 0,21 | 1098,59 | 10 | 822 | 2,48 | 1151,79 | 14 | 790 | 7,44 | 1073,63 | 8 | 908 | 0,15 | 1071,99 | 8 | 2129 | 0,00 |
| R207_21 | 936,47 | 6 | 4909 | 976,22 | 7 | 2500 | 4,24 | 936,47 | 6 | 4909 | 0,00 | 979,87 | 7 | 672 | 4,63 | 1102,14 | 12 | 18 | 17,69 | 1102,14 | 12 | 16 | 17,69 | 1102,14 | 12 | 552 | 17,69 |
| R208_21 | 842,04 | 4 | 27276 | 900,26 | 7 | 2135 | 6,91 | 907,87 | 6 | 4199 | 7,82 | 943,32 | 9 | 3319 | 12,03 | 990,43 | 11 | 6 | 17,62 | 990,43 | 11 | 5 | 17,62 | 990,43 | 11 | 6 | 17,62 |
| R209_21 | 981,22 | 7 | 2133 | 1015,18 | 10 | 1273 | 3,46 | 1043,41 | 9 | 1032 | 6,34 | 1015,97 | 5 | 11440 | 3,54 | 1090,99 | 12 | 845 | 11,19 | 1007,85 | 7 | 895 | 2,71 | 981,22 | 7 | 2133 | 0,00 |
| R210_21 | 1043,16 | 7 | 2687 | 1061,62 | 8 | 4162 | 1,77 | 1092,76 | 12 | 1585 | 4,75 | 1078,37 | 11 | 1775 | 3,38 | 1100,93 | 13 | 17 | 5,54 | 1100,93 | 13 | 16 | 5,54 | 1100,93 | 13 | 502 | 5,54 |
| R211_21 | 885,51 | 4 | 700 | 919,49 | 7 | 3773 | 3,84 | 911,48 | 6 | 5208 | 2,93 | 917,94 | 6 | 641 | 3,66 | 1026,63 | 12 | 10 | 15,94 | 1026,63 | 12 | 10 | 15,94 | 1023,46 | 12 | 839 | 15,58 |
| RC101_21 | 2255,54 | 22 | 865 | 2317,30 | 23 | 883 | 2,74 | 2397,18 | 22 | 490 | 6,28 | 2255,54 | 22 | 865 | 0,00 | 2650,68 | 23 | 861 | 17,52 | 2407,75 | 23 | 796 | 6,75 | 2433,49 | 23 | 743 | 7,89 |
| RC102_21 | 2221,90 | 22 | 928 | 2242,02 | 21 | 931 | 0,91 | 2254,68 | 21 | 768 | 1,48 | 2221,90 | 22 | 928 | 0,00 | 2446,73 | 23 | 738 | 10,12 | 2303,57 | 22 | 875 | 3,68 | 2241,53 | 21 | 943 | 0,88 |
| RC103_21 | 1818,14 | 17 | 898 | 1989,36 | 19 | 1005 | 9,42 | 1818,14 | 17 | 898 | 0,00 | 1880,65 | 18 | 1017 | 3,44 | 2455,92 | 21 | 772 | 35,08 | 1956,52 | 19 | 976 | 7,61 | 2081,38 | 18 | 963 | 14,48 |
| RC104_21 | 1542,59 | 14 | 860 | 1583,27 | 16 | 518 | 2,64 | 1583,25 | 15 | 635 | 2,64 | 1542,59 | 14 | 860 | 0,00 | 1586,98 | 15 | 921 | 2,88 | 1542,62 | 15 | 774 | 0,00 | 1555,76 | 15 | 916 | 0,85 |
| RC105_21 | 1944,09 | 18 | 898 | 2075,42 | 21 | 842 | 6,76 | 1951,35 | 18 | 905 | 0,37 | 2122,30 | 19 | 932 | 9,17 | 2320,79 | 21 | 857 | 19,38 | 1944,09 | 18 | 898 | 0,00 | 1990,28 | 19 | 741 | 2,38 |
| RC106_21 | 1969,29 | 18 | 825 | 1999,41 | 18 | 941 | 1,53 | 2051,89 | 20 | 767 | 4,19 | 1969,29 | 18 | 825 | 0,00 | 2249,43 | 19 | 909 | 14,23 | 2124,07 | 19 | 840 | 7,86 | 2116,16 | 19 | 703 | 7,46 |
| RC107_21 | 1478,68 | 15 | 694 | 1490,29 | 15 | 865 | 0,79 | 1480,63 | 14 | 1028 | 0,13 | 1480,67 | 15 | 632 | 0,13 | 1519,87 | 16 | 178 | 2,79 | 1519,79 | 16 | 459 | 2,78 | 1486,89 | 14 | 986 | 0,56 |
| RC108_21 | 1415,87 | 14 | 1028 | 1465,64 | 14 | 283 | 3,52 | 1419,08 | 14 | 712 | 0,23 | 1435,03 | 14 | 628 | 1,35 | 1473,42 | 15 | 972 | 4,06 | 1466,06 | 14 | 846 | 3,54 | 1417,81 | 14 | 1013 | 0,14 |
| RC201_21 | 1460,81 | 12 | 720 | 1594,86 | 15 | 814 | 9,18 | 1460,81 | 12 | 720 | 0,00 | 1467,89 | 8 | 1281 | 0,48 | 1612,57 | 9 | 936 | 10,39 | 1517,91 | 8 | 1730 | 3,91 | 1524,67 | 8 | 1348 | 4,37 |
| RC202_21 | 1333,39 | 11 | 857 | 1466,22 | 10 | 1106 | 9,96 | 1333,39 | 11 | 857 | 0,00 | 1418,23 | 8 | 1972 | 6,36 | 1417,90 | 9 | 653 | 6,34 | 1377,73 | 8 | 2661 | 3,33 | 1384,67 | 8 | 2321 | 3,85 |
| RC203_21 | 1137,70 | 11 | 661 | 1194,70 | 12 | 1001 | 5,01 | 1137,70 | 11 | 661 | 0,00 | 1163,45 | 10 | 983 | 2,26 | 1320,71 | 10 | 880 | 16,09 | 1162,28 | 8 | 1504 | 2,16 | 1171,07 | 8 | 1311 | 2,93 |
| RC204_21 | 1045,74 | 8 | 816 | 1098,29 | 10 | 735 | 5,03 | 1125,21 | 8 | 771 | 7,60 | 1097,49 | 9 | 1631 | 4,95 | 1206,95 | 12 | 5 | 15,42 | 1045,74 | 8 | 816 | 0,00 | 1045,74 | 8 | 809 | 0,00 |
| RC205_21 | 1281,03 | 11 | 1025 | 1452,51 | 13 | 831 | 13,39 | 1303,17 | 10 | 684 | 1,73 | 1281,03 | 11 | 1025 | 0,00 | 1353,50 | 11 | 769 | 5,66 | 1299,64 | 10 | 1395 | 1,45 | 1319,81 | 10 | 900 | 3,03 |
| RC206_21 | 1218,35 | 7 | 578 | 1308,12 | 10 | 921 | 7,37 | 1219,86 | 7 | 879 | 0,12 | 1232,69 | 8 | 1225 | 1,18 | 1339,59 | 11 | 791 | 9,95 | 1263,97 | 7 | 2724 | 3,74 | 1272,13 | 7 | 1811 | 4,41 |
| RC207_21 | 1099,69 | 9 | 137 | 1209,83 | 9 | 903 | 10,02 | 1099,69 | 9 | 137 | 0,00 | 1192,35 | 11 | 1070 | 8,43 | 1296,66 | 13 | 13 | 17,91 | 1258,15 | 7 | 928 | 14,41 | 1273,36 | 12 | 1004 | 15,79 |
| RC208_21 | 1032,16 | 8 | 794 | 1087,28 | 10 | 1306 | 5,34 | 1055,29 | 9 | 272 | 2,24 | 1032,16 | 8 | 794 | 0,00 | 1142,93 | 11 | 17 | 10,73 | 1141,27 | 11 | 489 | 10,57 | 1142,93 | 11 | 412 | 10,73 |
| **Ortalama** | **1304,5** | **12,6** | **1663** | 1380,7 | 13,9 | 1315 | **6,36** | 1330,1 | 13,2 | 1159 | **2,08** | 1341,2 | 12,9 | 1329 | **3,19** | 1504,0 | 15,6 | 630 | **15,91** | 1387,7 | 13,5 | 838 | **6,97** | 1370,8 | 13,1 | 1208 | **5,44** |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

**Tablo 5.31:** EARP-ZP 100 Müşterili veri setlerinin V6-V12 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-ZP | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101_21 | 1259,23 | 15 | 814 | 1289,62 | 15 | 834 | 2,41 | 1289,62 | 15 | 825 | 2,41 | 1279,94 | 15 | 953 | 1,64 | 1320,47 | 15 | 474 | 4,86 | 1320,47 | 15 | 463 | 4,86 | 1337,49 | 16 | 422 | 6,21 |
| C102_21 | 1212,88 | 15 | 940 | 1252,51 | 16 | 837 | 3,27 | 1252,51 | 16 | 764 | 3,27 | 1252,51 | 16 | 532 | 3,27 | 1234,32 | 15 | 765 | 1,77 | 1234,32 | 15 | 777 | 1,77 | 1353,44 | 16 | 670 | 11,59 |
| C103_21 | 1234,54 | 14 | 1058 | 1320,25 | 16 | 800 | 6,94 | 1360,40 | 17 | 908 | 10,19 | 1304,45 | 15 | 1002 | 5,66 | 1293,10 | 15 | 923 | 4,74 | 1293,10 | 15 | 898 | 4,74 | 1264,01 | 15 | 767 | 2,39 |
| C104_21 | 1098,92 | 13 | 706 | 1160,39 | 11 | 879 | 5,59 | 1160,39 | 11 | 798 | 5,59 | 1129,35 | 14 | 1005 | 2,77 | 1113,64 | 13 | 867 | 1,34 | 1113,64 | 13 | 855 | 1,34 | 1151,92 | 14 | 713 | 4,82 |
| C105_21 | 1256,70 | 14 | 677 | 1291,03 | 15 | 514 | 2,73 | 1291,03 | 15 | 453 | 2,73 | 1291,03 | 15 | 355 | 2,73 | 1256,70 | 14 | 677 | 0,00 | 1256,70 | 14 | 671 | 0,00 | 1305,44 | 16 | 891 | 3,88 |
| C106_21 | 1166,38 | 14 | 848 | 1248,72 | 15 | 827 | 7,06 | 1248,41 | 15 | 838 | 7,03 | 1243,01 | 15 | 794 | 6,57 | 1341,58 | 13 | 681 | 15,02 | 1341,58 | 13 | 651 | 15,02 | 1337,35 | 17 | 654 | 14,66 |
| C107_21 | 1182,57 | 13 | 545 | 1337,48 | 14 | 795 | 13,10 | 1337,48 | 14 | 723 | 13,10 | 1309,57 | 13 | 896 | 10,74 | 1323,27 | 16 | 671 | 11,90 | 1323,27 | 16 | 681 | 11,90 | 1182,57 | 13 | 545 | 0,00 |
| C108_21 | 1278,22 | 15 | 975 | 1282,47 | 15 | 871 | 0,33 | 1282,47 | 15 | 824 | 0,33 | 1278,22 | 15 | 975 | 0,00 | 1302,41 | 13 | 874 | 1,89 | 1302,41 | 13 | 867 | 1,89 | 1338,97 | 16 | 939 | 4,75 |
| C109_21 | 1209,45 | 13 | 877 | 1271,83 | 15 | 836 | 5,16 | 1271,83 | 15 | 754 | 5,16 | 1271,71 | 15 | 582 | 5,15 | 1224,66 | 15 | 636 | 1,26 | 1224,66 | 15 | 635 | 1,26 | 1247,89 | 14 | 768 | 3,18 |
| C201_21 | 946,37 | 8 | 835 | 1022,10 | 10 | 784 | 8,00 | 1020,75 | 10 | 1935 | 7,86 | 1020,75 | 10 | 1820 | 7,86 | 1005,12 | 8 | 809 | 6,21 | 1005,12 | 8 | 789 | 6,21 | 952,43 | 9 | 710 | 0,64 |
| C202_21 | 1027,51 | 8 | 3470 | 1027,51 | 8 | 3470 | 0,00 | 1027,51 | 8 | 3432 | 0,00 | 1027,51 | 8 | 3354 | 0,00 | 1096,62 | 9 | 925 | 6,73 | 1096,62 | 9 | 930 | 6,73 | 1029,70 | 10 | 917 | 0,21 |
| C203_21 | 860,42 | 9 | 3036 | 1005,32 | 6 | 929 | 16,84 | 1005,32 | 6 | 794 | 16,84 | 979,24 | 6 | 4742 | 13,81 | 1280,81 | 16 | 408 | 48,86 | 1280,81 | 16 | 401 | 48,86 | 1036,11 | 12 | 849 | 20,42 |
| C204_21 | 777,91 | 7 | 3636 | 829,78 | 9 | 501 | 6,67 | 829,78 | 9 | 510 | 6,67 | 829,78 | 9 | 473 | 6,67 | 878,70 | 11 | 484 | 12,96 | 878,70 | 11 | 501 | 12,96 | 801,30 | 7 | 782 | 3,01 |
| C205_21 | 895,28 | 9 | 1721 | 1028,54 | 7 | 903 | 14,88 | 1048,14 | 7 | 852 | 17,07 | 987,51 | 8 | 4287 | 10,30 | 978,46 | 7 | 778 | 9,29 | 978,46 | 7 | 760 | 9,29 | 899,73 | 9 | 1599 | 0,50 |
| C206_21 | 861,92 | 8 | 803 | 946,78 | 11 | 563 | 9,85 | 912,58 | 6 | 9839 | 5,88 | 861,92 | 8 | 803 | 0,00 | 918,14 | 8 | 2386 | 6,52 | 918,14 | 8 | 2342 | 6,52 | 883,19 | 8 | 2596 | 2,47 |
| C207_21 | 880,00 | 8 | 2355 | 885,14 | 7 | 918 | 0,58 | 885,14 | 7 | 910 | 0,58 | 892,00 | 7 | 6056 | 1,36 | 1069,90 | 12 | 876 | 21,58 | 1069,90 | 12 | 715 | 21,58 | 911,87 | 6 | 890 | 3,62 |
| C208_21 | 901,33 | 10 | 985 | 943,49 | 7 | 3253 | 4,68 | 986,71 | 8 | 2818 | 9,47 | 928,58 | 11 | 1511 | 3,02 | 1050,83 | 12 | 1156 | 16,59 | 1050,83 | 12 | 1148 | 16,59 | 1045,48 | 6 | 764 | 15,99 |
| R101_21 | 2057,38 | 26 | 890 | 2260,01 | 27 | 839 | 9,85 | 2194,83 | 27 | 922 | 6,68 | 2155,05 | 26 | 859 | 4,75 | 2222,54 | 26 | 871 | 8,03 | 2278,92 | 26 | 870 | 10,77 | 2305,73 | 26 | 779 | 12,07 |
| R102_21 | 1949,90 | 23 | 616 | 2074,17 | 23 | 869 | 6,37 | 2074,33 | 24 | 867 | 6,38 | 2024,55 | 24 | 909 | 3,83 | 2169,66 | 25 | 656 | 11,27 | 2169,66 | 25 | 651 | 11,27 | 2103,32 | 25 | 503 | 7,87 |
| R103_21 | 1872,63 | 21 | 916 | 2004,66 | 21 | 651 | 7,05 | 1987,36 | 21 | 830 | 6,13 | 1927,96 | 21 | 778 | 2,95 | 2019,35 | 21 | 832 | 7,83 | 2014,34 | 21 | 814 | 7,57 | 1887,04 | 21 | 590 | 0,77 |
| R104_21 | 1626,25 | 18 | 909 | 1770,88 | 18 | 925 | 8,89 | 1691,00 | 17 | 941 | 3,98 | 1663,53 | 16 | 815 | 2,29 | 1811,53 | 17 | 778 | 11,39 | 1753,98 | 17 | 792 | 7,85 | 1683,65 | 16 | 609 | 3,53 |
| R105_21 | 1925,03 | 20 | 782 | 2114,99 | 21 | 795 | 9,87 | 2091,09 | 23 | 841 | 8,63 | 2005,03 | 21 | 929 | 4,16 | 2089,96 | 23 | 855 | 8,57 | 2142,00 | 22 | 691 | 11,27 | 2155,14 | 23 | 498 | 11,95 |
| R106_21 | 1837,27 | 20 | 875 | 1982,51 | 20 | 832 | 7,91 | 1974,52 | 22 | 899 | 7,47 | 1919,57 | 19 | 860 | 4,48 | 1972,45 | 19 | 806 | 7,36 | 1909,44 | 19 | 906 | 3,93 | 2001,85 | 20 | 618 | 8,96 |
| R107_21 | 1408,28 | 16 | 651 | 1426,18 | 16 | 755 | 1,27 | 1426,18 | 16 | 694 | 1,27 | 1426,53 | 16 | 657 | 1,30 | 1455,79 | 16 | 573 | 3,37 | 1455,79 | 16 | 555 | 3,37 | 1451,24 | 16 | 641 | 3,05 |
| R108_21 | 1518,87 | 16 | 788 | 1639,29 | 17 | 784 | 7,93 | 1633,85 | 16 | 1000 | 7,57 | 1518,87 | 16 | 788 | 0,00 | 1586,09 | 16 | 799 | 4,43 | 1586,09 | 16 | 789 | 4,43 | 1609,52 | 16 | 896 | 5,97 |
| R109_21 | 1506,31 | 17 | 890 | 1525,60 | 19 | 789 | 1,28 | 1543,03 | 19 | 894 | 2,44 | 1551,81 | 20 | 425 | 3,02 | 1550,73 | 18 | 845 | 2,95 | 1550,73 | 18 | 833 | 2,95 | 1563,69 | 17 | 892 | 3,81 |
| R110_21 | 1280,52 | 14 | 609 | 1290,92 | 14 | 649 | 0,81 | 1291,13 | 14 | 1045 | 0,83 | 1280,52 | 14 | 609 | 0,00 | 1312,39 | 16 | 991 | 2,49 | 1312,39 | 16 | 986 | 2,49 | 1289,71 | 15 | 693 | 0,72 |
| R111_21 | 1351,60 | 15 | 708 | 1423,71 | 18 | 800 | 5,34 | 1424,71 | 18 | 789 | 5,41 | 1409,63 | 17 | 647 | 4,29 | 1394,75 | 16 | 965 | 3,19 | 1394,75 | 16 | 948 | 3,19 | 1368,80 | 16 | 598 | 1,27 |
| R112_21 | 1259,74 | 13 | 1020 | 1288,42 | 14 | 804 | 2,28 | 1288,42 | 14 | 815 | 2,28 | 1278,05 | 15 | 818 | 1,45 | 1259,74 | 13 | 1020 | 0,00 | 1259,74 | 13 | 986 | 0,00 | 1276,52 | 14 | 890 | 1,33 |
| R201_21 | 1282,63 | 10 | 781 | 1325,11 | 11 | 1472 | 3,31 | 1325,11 | 11 | 1425 | 3,31 | 1317,62 | 11 | 1154 | 2,73 | 1310,94 | 11 | 1241 | 2,21 | 1310,94 | 11 | 1209 | 2,21 | 1308,67 | 11 | 1142 | 2,03 |
| R202_21 | 1143,86 | 6 | 922 | 1195,06 | 6 | 4024 | 4,48 | 1195,06 | 6 | 4029 | 4,48 | 1195,06 | 6 | 4048 | 4,48 | 1153,25 | 7 | 2549 | 0,82 | 1153,25 | 7 | 2565 | 0,82 | 1162,64 | 10 | 506 | 1,64 |
| R203_21 | 1009,47 | 8 | 3080 | 1018,96 | 8 | 542 | 0,94 | 1018,96 | 8 | 535 | 0,94 | 1030,60 | 8 | 2423 | 2,09 | 1084,01 | 10 | 869 | 7,38 | 1084,01 | 10 | 858 | 7,38 | 1031,37 | 7 | 874 | 2,17 |
| R204_21 | 857,92 | 5 | 915 | 885,04 | 6 | 3461 | 3,16 | 885,04 | 6 | 3378 | 3,16 | 885,29 | 6 | 3712 | 3,19 | 883,96 | 6 | 478 | 3,04 | 883,96 | 6 | 460 | 3,04 | 901,94 | 5 | 471 | 5,13 |
| R205_21 | 1100,24 | 9 | 1086 | 1174,24 | 9 | 597 | 6,73 | 1174,24 | 9 | 594 | 6,73 | 1148,35 | 10 | 1504 | 4,37 | 1138,19 | 9 | 1284 | 3,45 | 1138,19 | 9 | 1297 | 3,45 | 1125,92 | 6 | 462 | 2,33 |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

**Tablo 5.31 (devam):** EARP-ZP 100 Müşterili veri setlerinin V6-V12 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-ZP | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | t | % |
| R206_21 | 1071,99 | 8 | 2129 | 1106,39 | 9 | 1694 | 3,21 | 1105,84 | 7 | 3488 | 3,16 | 1105,84 | 7 | 3516 | 3,16 | 1121,41 | 9 | 795 | 4,61 | 1121,41 | 9 | 799 | 4,61 | 1077,11 | 5 | 695 | 0,48 |
| R207_21 | 936,47 | 6 | 4909 | 954,75 | 7 | 911 | 1,95 | 954,75 | 7 | 909 | 1,95 | 954,75 | 7 | 2103 | 1,95 | 1102,14 | 12 | 16 | 17,69 | 1102,14 | 12 | 17 | 17,69 | 1102,14 | 12 | 546 | 17,69 |
| R208_21 | 842,04 | 4 | 27276 | 854,15 | 4 | 744 | 1,44 | 842,04 | 4 | 27276 | 0,00 | 858,36 | 4 | 28751 | 1,94 | 990,43 | 11 | 5 | 17,62 | 990,43 | 11 | 5 | 17,62 | 990,43 | 11 | 5 | 17,62 |
| R209_21 | 981,22 | 7 | 2133 | 1059,31 | 9 | 874 | 7,96 | 1059,31 | 9 | 812 | 7,96 | 1061,41 | 9 | 1650 | 8,17 | 1038,51 | 6 | 880 | 5,84 | 1026,84 | 5 | 928 | 4,65 | 1038,51 | 6 | 857 | 5,84 |
| R210_21 | 1043,16 | 7 | 2687 | 1043,16 | 7 | 2687 | 0,00 | 1043,16 | 7 | 2575 | 0,00 | 1044,07 | 7 | 2600 | 0,09 | 1100,93 | 13 | 16 | 5,54 | 1100,93 | 13 | 16 | 5,54 | 1100,93 | 13 | 506 | 5,54 |
| R211_21 | 885,51 | 4 | 700 | 885,51 | 4 | 700 | 0,00 | 885,51 | 4 | 575 | 0,00 | 892,04 | 4 | 10411 | 0,74 | 1015,99 | 11 | 905 | 14,74 | 1015,99 | 11 | 904 | 14,74 | 967,47 | 10 | 877 | 9,26 |
| RC101_21 | 2255,54 | 22 | 865 | 2377,70 | 23 | 724 | 5,42 | 2303,74 | 23 | 920 | 2,14 | 2281,51 | 21 | 787 | 1,15 | 2472,84 | 23 | 745 | 9,63 | 2472,84 | 23 | 662 | 9,63 | 2362,73 | 23 | 925 | 4,75 |
| RC102_21 | 2221,90 | 22 | 928 | 2491,37 | 23 | 742 | 12,13 | 2340,49 | 23 | 686 | 5,34 | 2227,33 | 21 | 842 | 0,24 | 2249,02 | 21 | 862 | 1,22 | 2270,81 | 21 | 728 | 2,20 | 2318,88 | 21 | 498 | 4,36 |
| RC103_21 | 1818,14 | 17 | 898 | 2103,81 | 18 | 908 | 15,71 | 2103,81 | 18 | 926 | 15,71 | 1951,87 | 19 | 608 | 7,36 | 2018,58 | 18 | 867 | 11,02 | 2018,58 | 18 | 871 | 11,02 | 1926,54 | 18 | 746 | 5,96 |
| RC104_21 | 1542,59 | 14 | 860 | 1595,16 | 16 | 1000 | 3,41 | 1594,90 | 16 | 839 | 3,39 | 1570,15 | 15 | 739 | 1,79 | 1563,10 | 15 | 846 | 1,33 | 1563,10 | 15 | 838 | 1,33 | 1569,98 | 16 | 749 | 1,78 |
| RC105_21 | 1944,09 | 18 | 898 | 1986,52 | 20 | 830 | 2,18 | 2120,69 | 20 | 762 | 9,08 | 2022,28 | 19 | 953 | 4,02 | 2064,06 | 19 | 827 | 6,17 | 2064,06 | 19 | 808 | 6,17 | 2076,20 | 19 | 808 | 6,80 |
| RC106_21 | 1969,29 | 18 | 825 | 2011,54 | 19 | 904 | 2,15 | 2082,70 | 19 | 879 | 5,76 | 2039,09 | 18 | 806 | 3,54 | 2104,17 | 19 | 806 | 6,85 | 2101,75 | 19 | 892 | 6,73 | 2122,84 | 19 | 794 | 7,80 |
| RC107_21 | 1478,68 | 15 | 694 | 1507,53 | 15 | 971 | 1,95 | 1508,61 | 15 | 930 | 2,02 | 1479,92 | 15 | 681 | 0,08 | 1478,68 | 15 | 694 | 0,00 | 1478,68 | 15 | 715 | 0,00 | 1482,00 | 14 | 873 | 0,22 |
| RC108_21 | 1415,87 | 14 | 1028 | 1429,28 | 14 | 904 | 0,95 | 1428,52 | 14 | 725 | 0,89 | 1421,04 | 14 | 789 | 0,37 | 1415,87 | 14 | 1028 | 0,00 | 1415,87 | 14 | 1021 | 0,00 | 1420,08 | 14 | 915 | 0,30 |
| RC201_21 | 1460,81 | 12 | 720 | 1561,41 | 8 | 526 | 6,89 | 1561,41 | 8 | 547 | 6,89 | 1594,27 | 11 | 950 | 9,14 | 1494,48 | 10 | 1284 | 2,30 | 1494,48 | 10 | 1283 | 2,30 | 1563,52 | 12 | 376 | 7,03 |
| RC202_21 | 1333,39 | 11 | 857 | 1373,16 | 8 | 1710 | 2,98 | 1373,16 | 8 | 1706 | 2,98 | 1373,16 | 8 | 1516 | 2,98 | 1356,06 | 8 | 2292 | 1,70 | 1356,06 | 8 | 2229 | 1,70 | 1401,44 | 7 | 410 | 5,10 |
| RC203_21 | 1137,70 | 11 | 661 | 1145,40 | 10 | 829 | 0,68 | 1145,40 | 10 | 782 | 0,68 | 1146,95 | 10 | 644 | 0,81 | 1175,28 | 6 | 4365 | 3,30 | 1175,28 | 6 | 4455 | 3,30 | 1175,28 | 6 | 4177 | 3,30 |
| RC204_21 | 1045,74 | 8 | 816 | 1126,28 | 10 | 28 | 7,70 | 1126,28 | 10 | 28 | 7,70 | 1126,28 | 10 | 28 | 7,70 | 1153,16 | 11 | 853 | 10,27 | 1153,16 | 11 | 862 | 10,27 | 1175,71 | 11 | 854 | 12,43 |
| RC205_21 | 1281,03 | 11 | 1025 | 1412,72 | 11 | 1222 | 10,28 | 1412,72 | 11 | 1163 | 10,28 | 1325,06 | 10 | 802 | 3,44 | 1344,69 | 12 | 1032 | 4,97 | 1344,69 | 12 | 1016 | 4,97 | 1346,84 | 10 | 374 | 5,14 |
| RC206_21 | 1218,35 | 7 | 578 | 1281,60 | 8 | 3191 | 5,19 | 1281,60 | 8 | 3178 | 5,19 | 1281,60 | 8 | 3134 | 5,19 | 1218,35 | 7 | 578 | 0,00 | 1218,35 | 7 | 489 | 0,00 | 1241,87 | 9 | 2214 | 1,93 |
| RC207_21 | 1099,69 | 9 | 137 | 1131,97 | 8 | 830 | 2,94 | 1131,97 | 8 | 833 | 2,94 | 1131,97 | 8 | 792 | 2,94 | 1237,07 | 12 | 672 | 12,49 | 1237,07 | 12 | 660 | 12,49 | 1243,86 | 12 | 587 | 13,11 |
| RC208_21 | 1032,16 | 8 | 794 | 1046,98 | 7 | 762 | 1,44 | 1046,98 | 7 | 753 | 1,44 | 1046,98 | 7 | 710 | 1,44 | 1141,27 | 11 | 946 | 10,57 | 1141,27 | 11 | 950 | 10,57 | 1144,11 | 11 | 1004 | 10,85 |
| **Ortalama** | **1304,5** | **12,6** | **1663** | 1375,5 | 12,9 | 1103 | **5,22** | 1372,9 | 12,9 | 1781 | **5,13** | 1349,3 | 12,8 | 2069 | **3,56** | 1392,1 | 13,6 | 931 | **7,27** | 1392,0 | 13,6 | 919 | **7,23** | 1377,8 | 13,3 | 838 | **5,72** |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

### 5.3.3 Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, EARP-EZTD kapsamında 100 müşteri ve 21 Şİ'den oluşan veri setlerinin tez çalışmasında geliştirilen DKA türevleri ile çözümünden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslamanın amacı, 12 farklı algoritmadan oluşan DKA türevlerinin EARP-EZTD'yi çözmedeki etkinliğini ve performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bölüm 5.2'de küçük boyutlu veri setlerinin CPLEX ile elde edilen kesin çözüm sonuçları mevcut olduğu için DKA varyantları CPLEX ile karşılaştırılmıştı. Bu bölümde ise, büyük boyutlu veri setleri CPLEX ile çözülemediği için, DKA varyantlarına ait sonuçlardan BEÇ referans alınarak, her bir algoritmaya ait sonuçlar BEÇ ile karşılaştırılmıştır.

Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarının kullanılmasıyla tasarlanan 12 DKA versiyonuna ait tüm sonuçlar tek tabloya sığmadığı için iki tablo olarak sunulmuştur. EARP-EZTD kapsamında 100 müşteri ve 21 Şİ'den oluşan büyük boyutlu 34 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonları ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.32'de; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonları ile elde edilen sonuçlar ise Tablo 5.33'te verilmiştir.

**Tablo 5.32:** EARP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-EZTD | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngüsel | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101_21 | 726,55 | 7 | 912 | 822,92 | 7 | 668 | 13,26 | 726,55 | 7 | 912 | 0,00 | 784,73 | 6 | 877 | 8,01 | 984,59 | 8 | 727 | 35,52 | 912,65 | 8 | 884 | 25,61 | 830,05 | 6 | 882 | 14,25 |
| C201_21 | 589,12 | 3 | 954 | 730,03 | 3 | 828 | 23,92 | 652,13 | 5 | 903 | 10,70 | 589,12 | 3 | 954 | 0,00 | 893,93 | 3 | 763 | 51,74 | 915,46 | 3 | 15 | 55,39 | 907,56 | 3 | 222 | 54,05 |
| C204_21 | 589,12 | 3 | 954 | 673,77 | 2 | 1030 | 14,37 | 652,13 | 5 | 903 | 10,70 | 589,12 | 3 | 954 | 0,00 | 893,93 | 3 | 768 | 51,74 | 915,46 | 3 | 15 | 55,39 | 907,56 | 3 | 222 | 54,05 |
| C206_21 | 589,12 | 3 | 949 | 673,77 | 2 | 1033 | 14,37 | 652,13 | 5 | 907 | 10,70 | 589,12 | 3 | 949 | 0,00 | 901,02 | 3 | 417 | 52,94 | 915,46 | 3 | 15 | 55,39 | 907,56 | 3 | 249 | 54,05 |
| C207_21 | 589,12 | 3 | 952 | 673,77 | 2 | 1032 | 14,37 | 652,13 | 5 | 903 | 10,70 | 589,12 | 3 | 952 | 0,00 | 901,02 | 3 | 417 | 52,94 | 915,46 | 3 | 15 | 55,39 | 907,56 | 3 | 224 | 54,05 |
| R101_21 | 873,67 | 6 | 902 | 895,53 | 6 | 734 | 2,50 | 904,19 | 5 | 885 | 3,49 | 901,99 | 7 | 814 | 3,24 | 985,74 | 6 | 663 | 12,83 | 873,67 | 6 | 902 | 0,00 | 930,13 | 6 | 805 | 6,46 |
| R104_21 | 906,20 | 8 | 891 | 919,86 | 7 | 867 | 1,51 | 931,35 | 6 | 857 | 2,78 | 906,20 | 8 | 891 | 0,00 | 1005,41 | 6 | 442 | 10,95 | 961,89 | 7 | 631 | 6,15 | 988,92 | 7 | 824 | 9,13 |
| R106_21 | 884,49 | 6 | 838 | 891,63 | 7 | 854 | 0,81 | 901,59 | 5 | 934 | 1,93 | 915,03 | 8 | 903 | 3,45 | 1007,06 | 8 | 681 | 13,86 | 936,34 | 6 | 832 | 5,86 | 949,83 | 5 | 878 | 7,39 |
| R107_21 | 865,05 | 6 | 884 | 938,01 | 8 | 791 | 8,43 | 865,05 | 6 | 884 | 0,00 | 900,12 | 6 | 859 | 4,05 | 1029,67 | 6 | 861 | 19,03 | 983,05 | 7 | 774 | 13,64 | 914,84 | 5 | 884 | 5,76 |
| R108_21 | 879,27 | 6 | 586 | 888,64 | 6 | 864 | 1,07 | 879,27 | 6 | 586 | 0,00 | 903,46 | 6 | 890 | 2,75 | 997,27 | 8 | 882 | 13,42 | 890,39 | 6 | 702 | 1,26 | 930,15 | 6 | 744 | 5,79 |
| R109_21 | 907,76 | 7 | 896 | 939,04 | 7 | 733 | 3,45 | 935,29 | 6 | 887 | 3,03 | 907,76 | 7 | 896 | 0,00 | 1016,94 | 6 | 851 | 12,03 | 963,39 | 7 | 892 | 6,13 | 977,62 | 5 | 720 | 7,70 |
| R110_21 | 906,20 | 8 | 899 | 919,86 | 7 | 897 | 1,51 | 930,42 | 7 | 820 | 2,67 | 906,20 | 8 | 899 | 0,00 | 1005,41 | 6 | 448 | 10,95 | 961,89 | 7 | 634 | 6,15 | 988,92 | 7 | 836 | 9,13 |
| R111_21 | 916,52 | 6 | 845 | 931,93 | 7 | 895 | 1,68 | 916,52 | 6 | 845 | 0,00 | 943,68 | 6 | 915 | 2,96 | 1010,64 | 6 | 872 | 10,27 | 980,17 | 6 | 879 | 6,94 | 954,86 | 5 | 792 | 4,18 |
| R112_21 | 919,81 | 6 | 677 | 919,81 | 6 | 677 | 0,00 | 945,88 | 7 | 840 | 2,83 | 932,64 | 8 | 881 | 1,39 | 1010,64 | 6 | 868 | 9,87 | 963,39 | 7 | 889 | 4,74 | 944,15 | 5 | 791 | 2,65 |
| R201_21 | 719,56 | 2 | 825 | 731,47 | 2 | 818 | 1,66 | 719,56 | 2 | 825 | 0,00 | 728,93 | 2 | 730 | 1,30 | 827,17 | 2 | 444 | 14,95 | 828,40 | 2 | 453 | 15,13 | 857,00 | 2 | 420 | 19,10 |
| R202_21 | 702,81 | 4 | 520 | 702,81 | 4 | 520 | 0,00 | 706,10 | 3 | 793 | 0,47 | 709,21 | 3 | 966 | 0,91 | 841,87 | 2 | 593 | 19,79 | 839,44 | 2 | 680 | 19,44 | 850,74 | 2 | 330 | 21,05 |
| R203_21 | 719,56 | 2 | 830 | 731,47 | 2 | 813 | 1,66 | 719,56 | 2 | 830 | 0,00 | 728,93 | 2 | 729 | 1,30 | 827,17 | 2 | 440 | 14,95 | 828,40 | 2 | 454 | 15,13 | 857,00 | 2 | 346 | 19,10 |
| R204_21 | 702,81 | 4 | 497 | 702,81 | 4 | 497 | 0,00 | 705,29 | 3 | 920 | 0,35 | 712,03 | 3 | 967 | 1,31 | 841,87 | 2 | 578 | 19,79 | 832,82 | 2 | 917 | 18,50 | 844,19 | 2 | 325 | 20,12 |
| R205_21 | 725,48 | 2 | 813 | 726,01 | 2 | 719 | 0,07 | 725,48 | 2 | 813 | 0,00 | 725,69 | 1 | 795 | 0,03 | 829,04 | 2 | 993 | 14,27 | 833,44 | 2 | 989 | 14,88 | 841,10 | 2 | 400 | 15,94 |
| R206_21 | 731,41 | 2 | 948 | 731,47 | 2 | 851 | 0,01 | 745,16 | 2 | 508 | 1,88 | 731,46 | 3 | 756 | 0,01 | 830,12 | 2 | 914 | 13,50 | 838,63 | 2 | 986 | 14,66 | 846,34 | 2 | 361 | 15,71 |
| R207_21 | 702,81 | 4 | 466 | 702,81 | 4 | 466 | 0,00 | 711,65 | 3 | 632 | 1,26 | 711,44 | 3 | 786 | 1,23 | 837,62 | 2 | 533 | 19,18 | 831,27 | 2 | 1009 | 18,28 | 841,26 | 2 | 329 | 19,70 |
| R208_21 | 702,81 | 4 | 575 | 702,81 | 4 | 575 | 0,00 | 726,56 | 2 | 759 | 3,38 | 713,55 | 4 | 641 | 1,53 | 855,17 | 2 | 925 | 21,68 | 819,75 | 2 | 907 | 16,64 | 859,62 | 2 | 342 | 22,31 |
| R209_21 | 731,46 | 3 | 752 | 731,47 | 2 | 837 | 0,00 | 733,75 | 4 | 721 | 0,31 | 731,46 | 3 | 752 | 0,00 | 827,17 | 2 | 436 | 13,08 | 828,40 | 2 | 447 | 13,25 | 843,87 | 2 | 356 | 15,37 |
| R210_21 | 719,56 | 2 | 825 | 731,47 | 2 | 816 | 1,66 | 719,56 | 2 | 825 | 0,00 | 728,93 | 2 | 731 | 1,30 | 827,17 | 2 | 442 | 14,95 | 828,40 | 2 | 450 | 15,13 | 857,00 | 2 | 343 | 19,10 |
| R211_21 | 702,81 | 4 | 467 | 702,81 | 4 | 467 | 0,00 | 715,65 | 3 | 325 | 1,83 | 713,55 | 4 | 479 | 1,53 | 837,62 | 2 | 530 | 19,18 | 836,41 | 2 | 954 | 19,01 | 847,76 | 2 | 327 | 20,62 |
| RC101_21 | 916,46 | 7 | 591 | 997,10 | 7 | 910 | 8,80 | 916,46 | 7 | 591 | 0,00 | 978,90 | 8 | 903 | 6,81 | 1214,79 | 7 | 960 | 32,55 | 1097,94 | 6 | 847 | 19,80 | 1108,85 | 7 | 741 | 20,99 |
| RC201_21 | 747,82 | 2 | 467 | 838,15 | 2 | 310 | 12,08 | 747,82 | 2 | 467 | 0,00 | 799,34 | 2 | 890 | 6,89 | 1043,04 | 2 | 900 | 39,48 | 1042,54 | 2 | 858 | 39,41 | 1051,15 | 2 | 443 | 40,56 |
| RC202_21 | 717,78 | 4 | 565 | 800,12 | 2 | 850 | 11,47 | 719,08 | 4 | 594 | 0,18 | 717,78 | 4 | 565 | 0,00 | 1040,34 | 2 | 932 | 44,94 | 1029,70 | 2 | 995 | 43,46 | 1043,38 | 2 | 617 | 45,36 |
| RC203_21 | 755,11 | 2 | 848 | 838,15 | 2 | 309 | 11,00 | 755,11 | 2 | 848 | 0,00 | 799,84 | 2 | 821 | 5,92 | 1047,14 | 2 | 466 | 38,67 | 1042,54 | 2 | 861 | 38,06 | 1051,15 | 2 | 448 | 39,20 |
| RC204_21 | 779,58 | 5 | 668 | 796,64 | 2 | 799 | 2,19 | 779,58 | 5 | 668 | 0,00 | 802,62 | 5 | 875 | 2,96 | 1041,65 | 2 | 926 | 33,62 | 1036,65 | 2 | 901 | 32,98 | 1055,13 | 2 | 528 | 35,35 |
| RC205_21 | 751,97 | 5 | 701 | 832,62 | 2 | 963 | 10,73 | 751,97 | 5 | 701 | 0,00 | 768,77 | 2 | 883 | 2,23 | 1051,00 | 2 | 966 | 39,77 | 1048,32 | 2 | 1063 | 39,41 | 1052,08 | 2 | 466 | 39,91 |
| RC206_21 | 719,08 | 4 | 706 | 818,57 | 2 | 714 | 13,84 | 719,08 | 4 | 706 | 0,00 | 778,75 | 1 | 1148 | 8,30 | 1047,14 | 2 | 451 | 45,62 | 1044,79 | 2 | 455 | 45,30 | 1046,48 | 2 | 400 | 45,53 |
| RC207_21 | 747,82 | 2 | 464 | 838,15 | 2 | 308 | 12,08 | 747,82 | 2 | 464 | 0,00 | 799,34 | 2 | 872 | 6,89 | 1043,04 | 2 | 889 | 39,48 | 1042,54 | 2 | 850 | 39,41 | 1051,15 | 2 | 442 | 40,56 |
| RC208_21 | 764,17 | 2 | 752 | 807,21 | 1 | 497 | 5,63 | 764,17 | 2 | 752 | 0,00 | 797,83 | 1 | 1074 | 4,40 | 1054,02 | 2 | 512 | 37,93 | 1035,29 | 2 | 1030 | 35,48 | 1049,20 | 2 | 489 | 37,30 |
| **Ortalama** | **761,8** | **4,2** | **748** | 802,4 | 3,9 | 734 | **5,71** | 775,7 | 4,2 | 759 | **2,03** | 780,5 | 4,1 | 853 | **2,37** | 953,2 | 3,6 | 691 | **26,34** | 931,0 | 3,6 | 711 | **23,86** | 938,1 | 3,4 | 515 | **24,75** |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

**Tablo 5.33:** EARP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V7-V12 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-EZTD | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101_21 | 726,55 | 7 | 912 | 740,98 | 7 | 857 | 1,99 | 750,33 | 7 | 775 | 3,27 | 740,98 | 7 | 541 | 1,99 | 848,97 | 8 | 682 | 16,85 | 848,97 | 8 | 576 | 16,85 | 848,97 | 8 | 388 | 16,85 |
| C201_21 | 589,12 | 3 | 954 | 656,18 | 3 | 700 | 11,38 | 645,98 | 5 | 800 | 9,65 | 648,93 | 5 | 864 | 10,15 | 919,68 | 3 | 249 | 56,11 | 919,68 | 3 | 237 | 56,11 | 919,68 | 3 | 239 | 56,11 |
| C204_21 | 589,12 | 3 | 954 | 656,18 | 3 | 702 | 11,38 | 645,98 | 5 | 807 | 9,65 | 648,93 | 5 | 869 | 10,15 | 919,68 | 3 | 250 | 56,11 | 919,68 | 3 | 239 | 56,11 | 919,68 | 3 | 244 | 56,11 |
| C206_21 | 589,12 | 3 | 949 | 656,18 | 3 | 705 | 11,38 | 645,98 | 5 | 812 | 9,65 | 648,93 | 5 | 869 | 10,15 | 919,68 | 3 | 249 | 56,11 | 919,68 | 3 | 239 | 56,11 | 919,68 | 3 | 244 | 56,11 |
| C207_21 | 589,12 | 3 | 952 | 658,19 | 3 | 698 | 11,72 | 645,98 | 5 | 809 | 9,65 | 648,93 | 5 | 868 | 10,15 | 919,68 | 3 | 252 | 56,11 | 919,68 | 3 | 237 | 56,11 | 919,68 | 3 | 243 | 56,11 |
| R101_21 | 873,67 | 6 | 902 | 917,85 | 5 | 954 | 5,06 | 910,62 | 6 | 885 | 4,23 | 887,16 | 5 | 818 | 1,54 | 922,49 | 8 | 836 | 5,59 | 965,67 | 5 | 911 | 10,53 | 961,71 | 6 | 757 | 10,08 |
| R104_21 | 906,20 | 8 | 891 | 925,93 | 8 | 733 | 2,18 | 949,75 | 9 | 706 | 4,81 | 921,95 | 8 | 779 | 1,74 | 940,14 | 7 | 862 | 3,75 | 940,14 | 7 | 775 | 3,75 | 940,14 | 7 | 559 | 3,75 |
| R106_21 | 884,49 | 6 | 838 | 956,67 | 6 | 927 | 8,16 | 964,41 | 6 | 922 | 9,04 | 884,49 | 6 | 838 | 0,00 | 947,46 | 7 | 876 | 7,12 | 947,46 | 7 | 743 | 7,12 | 947,46 | 7 | 587 | 7,12 |
| R107_21 | 865,05 | 6 | 884 | 935,21 | 7 | 904 | 8,11 | 934,27 | 7 | 925 | 8,00 | 941,57 | 7 | 418 | 8,85 | 962,36 | 6 | 732 | 11,25 | 956,49 | 6 | 825 | 10,57 | 956,17 | 6 | 742 | 10,53 |
| R108_21 | 879,27 | 6 | 586 | 925,74 | 7 | 793 | 5,29 | 903,14 | 6 | 848 | 2,71 | 915,18 | 6 | 656 | 4,08 | 1004,95 | 7 | 894 | 14,29 | 984,82 | 6 | 871 | 12,00 | 936,84 | 8 | 937 | 6,55 |
| R109_21 | 907,76 | 7 | 896 | 949,04 | 7 | 831 | 4,55 | 933,34 | 7 | 728 | 2,82 | 961,32 | 5 | 714 | 5,90 | 1000,88 | 5 | 921 | 10,26 | 1000,88 | 5 | 841 | 10,26 | 997,99 | 5 | 757 | 9,94 |
| R110_21 | 906,20 | 8 | 899 | 925,93 | 8 | 728 | 2,18 | 949,75 | 9 | 697 | 4,81 | 921,95 | 8 | 780 | 1,74 | 940,14 | 7 | 862 | 3,75 | 940,14 | 7 | 765 | 3,75 | 940,14 | 7 | 560 | 3,75 |
| R111_21 | 916,52 | 6 | 845 | 923,61 | 7 | 883 | 0,77 | 937,21 | 8 | 826 | 2,26 | 950,10 | 7 | 870 | 3,66 | 980,12 | 6 | 767 | 6,94 | 980,12 | 6 | 669 | 6,94 | 980,12 | 6 | 558 | 6,94 |
| R112_21 | 919,81 | 6 | 677 | 944,19 | 7 | 905 | 2,65 | 928,19 | 6 | 911 | 0,91 | 920,31 | 6 | 880 | 0,05 | 988,45 | 6 | 836 | 7,46 | 988,45 | 6 | 770 | 7,46 | 988,45 | 6 | 565 | 7,46 |
| R201_21 | 719,56 | 2 | 825 | 730,15 | 2 | 889 | 1,47 | 730,15 | 2 | 896 | 1,47 | 737,45 | 2 | 620 | 2,49 | 868,05 | 2 | 942 | 20,64 | 868,05 | 2 | 603 | 20,64 | 868,05 | 2 | 555 | 20,64 |
| R202_21 | 702,81 | 4 | 520 | 748,58 | 2 | 620 | 6,51 | 749,03 | 2 | 682 | 6,58 | 717,81 | 2 | 914 | 2,13 | 853,11 | 2 | 542 | 21,39 | 853,11 | 2 | 531 | 21,39 | 853,11 | 2 | 485 | 21,39 |
| R203_21 | 719,56 | 2 | 830 | 730,15 | 2 | 891 | 1,47 | 730,15 | 2 | 890 | 1,47 | 734,36 | 2 | 603 | 2,06 | 868,05 | 2 | 945 | 20,64 | 868,05 | 2 | 604 | 20,64 | 868,05 | 2 | 563 | 20,64 |
| R204_21 | 702,81 | 4 | 497 | 747,28 | 2 | 721 | 6,33 | 747,73 | 2 | 733 | 6,39 | 719,06 | 2 | 896 | 2,31 | 867,70 | 2 | 78 | 23,46 | 867,70 | 2 | 65 | 23,46 | 867,70 | 2 | 64 | 23,46 |
| R205_21 | 725,48 | 2 | 813 | 769,96 | 2 | 830 | 6,13 | 756,81 | 1 | 949 | 4,32 | 751,50 | 2 | 935 | 3,59 | 865,68 | 2 | 80 | 19,33 | 854,53 | 2 | 735 | 17,79 | 854,53 | 2 | 420 | 17,79 |
| R206_21 | 731,41 | 2 | 948 | 731,41 | 2 | 948 | 0,00 | 731,41 | 2 | 941 | 0,00 | 740,16 | 2 | 1055 | 1,20 | 868,32 | 2 | 456 | 18,72 | 868,32 | 2 | 432 | 18,72 | 868,32 | 2 | 398 | 18,72 |
| R207_21 | 702,81 | 4 | 466 | 729,20 | 2 | 852 | 3,75 | 732,20 | 2 | 893 | 4,18 | 730,47 | 1 | 889 | 3,94 | 862,33 | 2 | 74 | 22,70 | 862,33 | 2 | 61 | 22,70 | 848,46 | 2 | 939 | 20,72 |
| R208_21 | 702,81 | 4 | 575 | 730,57 | 2 | 789 | 3,95 | 736,85 | 2 | 870 | 4,84 | 750,54 | 2 | 958 | 6,79 | 870,39 | 2 | 75 | 23,84 | 870,39 | 2 | 63 | 23,84 | 870,39 | 2 | 63 | 23,84 |
| R209_21 | 731,46 | 3 | 752 | 732,19 | 2 | 944 | 0,10 | 732,19 | 2 | 949 | 0,10 | 741,91 | 2 | 1113 | 1,43 | 868,32 | 2 | 457 | 18,71 | 868,32 | 2 | 436 | 18,71 | 868,32 | 2 | 396 | 18,71 |
| R210_21 | 719,56 | 2 | 825 | 730,15 | 2 | 888 | 1,47 | 730,15 | 2 | 888 | 1,47 | 734,36 | 2 | 606 | 2,06 | 868,05 | 2 | 943 | 20,64 | 868,05 | 2 | 600 | 20,64 | 868,05 | 2 | 563 | 20,64 |
| R211_21 | 702,81 | 4 | 467 | 729,20 | 2 | 847 | 3,75 | 732,20 | 2 | 897 | 4,18 | 730,47 | 1 | 951 | 3,94 | 859,68 | 2 | 612 | 22,32 | 860,56 | 2 | 273 | 22,45 | 860,56 | 2 | 272 | 22,45 |
| RC101_21 | 916,46 | 7 | 591 | 1117,02 | 8 | 900 | 21,88 | 940,18 | 8 | 507 | 2,59 | 1123,03 | 7 | 490 | 22,54 | 937,99 | 7 | 735 | 2,35 | 937,99 | 7 | 665 | 2,35 | 937,99 | 7 | 530 | 2,35 |
| RC201_21 | 747,82 | 2 | 467 | 777,79 | 2 | 907 | 4,01 | 777,76 | 2 | 911 | 4,00 | 808,84 | 1 | 903 | 8,16 | 1058,07 | 2 | 503 | 41,49 | 1058,07 | 2 | 493 | 41,49 | 1058,07 | 2 | 501 | 41,49 |
| RC202_21 | 717,78 | 4 | 565 | 795,73 | 2 | 716 | 10,86 | 792,92 | 2 | 853 | 10,47 | 817,17 | 2 | 545 | 13,85 | 1067,00 | 2 | 71 | 48,65 | 1067,00 | 2 | 59 | 48,65 | 1067,00 | 2 | 56 | 48,65 |
| RC203_21 | 755,11 | 2 | 848 | 777,79 | 2 | 903 | 3,00 | 777,76 | 2 | 919 | 3,00 | 808,84 | 1 | 857 | 7,12 | 1058,07 | 2 | 504 | 40,12 | 1058,07 | 2 | 492 | 40,12 | 1058,07 | 2 | 489 | 40,12 |
| RC204_21 | 779,58 | 5 | 668 | 861,48 | 2 | 917 | 10,51 | 850,41 | 2 | 926 | 9,09 | 849,12 | 1 | 955 | 8,92 | 1085,82 | 2 | 23 | 39,28 | 1085,82 | 2 | 21 | 39,28 | 1085,82 | 2 | 16 | 39,28 |
| RC205_21 | 751,97 | 5 | 701 | 781,04 | 2 | 1095 | 3,87 | 778,88 | 2 | 901 | 3,58 | 768,47 | 2 | 777 | 2,19 | 1077,31 | 2 | 77 | 43,27 | 1077,31 | 2 | 63 | 43,27 | 1077,31 | 2 | 60 | 43,27 |
| RC206_21 | 719,08 | 4 | 706 | 800,40 | 2 | 743 | 11,31 | 810,47 | 2 | 924 | 12,71 | 786,05 | 1 | 1215 | 9,31 | 1073,57 | 2 | 929 | 49,30 | 1073,57 | 2 | 921 | 49,30 | 1066,84 | 2 | 1039 | 48,36 |
| RC207_21 | 747,82 | 2 | 464 | 801,00 | 2 | 795 | 7,11 | 802,56 | 2 | 703 | 7,32 | 808,28 | 1 | 849 | 8,08 | 1053,38 | 2 | 632 | 40,86 | 1053,38 | 2 | 490 | 40,86 | 1053,38 | 2 | 486 | 40,86 |
| RC208_21 | 764,17 | 2 | 752 | 842,31 | 2 | 916 | 10,23 | 842,86 | 2 | 928 | 10,30 | 831,63 | 1 | 942 | 8,83 | 1085,82 | 2 | 22 | 42,09 | 1085,82 | 2 | 20 | 42,09 | 1085,82 | 2 | 16 | 42,09 |
| **Ortalama** | **761,8** | **4,2** | **748** | 806,9 | 3,7 | 836 | **6,02** | 800,8 | 4,0 | 842 | **5,28** | 803,8 | 3,6 | 819 | **5,62** | 948,0 | 3,6 | 528 | **26,22** | 948,2 | 3,5 | 480 | **26,24** | 946,0 | 3,6 | 450 | **25,97** |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

### 5.3.4 Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Topla-Dağıt Elektrikli Araç Rotalama Problemi

Bu bölümde, EARP-ZP-EZTD kapsamında 100 müşteri ve 21 Şİ'den oluşan veri setlerinin tez çalışmasında geliştirilen DKA türevleri ile çözümünden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslamanın amacı, 12 farklı algoritmadan oluşan DKA türevlerinin EARP-ZP-EZTD'yi çözmedeki etkinliğini ve performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bölüm 5.2'de küçük boyutlu veri setlerinin CPLEX ile elde edilen kesin çözüm sonuçları mevcut olduğu için DKA varyantları CPLEX ile karşılaştırılmıştı. Bu bölümde ise, büyük boyutlu veri setleri CPLEX ile çözülemediği için, DKA varyantlarına ait sonuçlardan BEÇ referans alınarak, her bir algoritmaya ait sonuçlar BEÇ ile karşılaştırılmıştır.

Farklı DKA türleri ve komşuluk değiştirme adımlarının kullanılmasıyla tasarlanan 12 DKA versiyonuna ait tüm sonuçlar tek tabloya sığmadığı için iki tablo olarak sunulmuştur. EARP-ZP-EZTD kapsamında 100 müşteri ve 21 Şİ'den oluşan büyük boyutlu 56 veri setinin İ-DKA, B-DKA ve G-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v1-v6 versiyonları ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.34'te; R-DKA ve K-DKA'nın farklı komşuluk değiştirme adımları ile kullanıldığı v7-v12 versiyonları ile elde edilen sonuçlar ise Tablo 5.35'te verilmiştir.

**Tablo 5.34:** EARP-ZP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-ZP-EZTD | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngüsel | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101_21 | 1110,63 | 12 | 492 | 1279,36 | 15 | 938 | 14,80 | 1266,93 | 15 | 816 | 13,68 | 1114,47 | 12 | 851 | 0,00 | 1133,89 | 13 | 902 | 1,74 | 1156,12 | 13 | 1384 | 3,74 | 1251,05 | 14 | 916 | 12,26 |
| C102_21 | 1094,91 | 12 | 1166 | 1299,36 | 15 | 1052 | 18,67 | 1180,79 | 14 | 1121 | 7,84 | 1097,63 | 13 | 796 | 0,25 | 1149,31 | 14 | 866 | 4,97 | 1142,57 | 13 | 1482 | 4,35 | 1128,95 | 14 | 924 | 3,11 |
| C103_21 | 1098,00 | 12 | 649 | 1225,11 | 14 | 624 | 9,61 | 1230,59 | 13 | 341 | 10,10 | 1117,67 | 12 | 787 | 0,00 | 1199,25 | 13 | 702 | 7,30 | 1183,10 | 14 | 1238 | 5,85 | 1288,89 | 14 | 984 | 15,32 |
| C104_21 | 985,94 | 11 | 607 | 1093,70 | 13 | 634 | 10,93 | 1093,70 | 13 | 655 | 10,93 | 985,94 | 11 | 607 | 0,00 | 1034,81 | 12 | 535 | 4,96 | 1042,70 | 12 | 496 | 5,76 | 1093,70 | 13 | 1086 | 10,93 |
| C105_21 | 1131,97 | 13 | 1212 | 1348,13 | 17 | 921 | 19,10 | 1259,55 | 14 | 630 | 11,27 | 1155,04 | 12 | 905 | 2,04 | 1241,64 | 13 | 823 | 9,69 | 1173,61 | 13 | 1471 | 3,68 | 1219,79 | 15 | 462 | 7,76 |
| C106_21 | 1061,37 | 12 | 779 | 1255,35 | 14 | 897 | 18,26 | 1179,88 | 13 | 886 | 11,15 | 1061,48 | 12 | 828 | 0,00 | 1192,68 | 14 | 583 | 12,36 | 1081,73 | 12 | 1238 | 1,91 | 1169,94 | 14 | 733 | 10,22 |
| C107_21 | 1067,11 | 12 | 1341 | 1205,50 | 14 | 822 | 12,97 | 1209,66 | 13 | 883 | 13,36 | 1074,40 | 12 | 890 | 0,68 | 1109,42 | 13 | 887 | 3,96 | 1067,11 | 12 | 1341 | 0,00 | 1121,76 | 12 | 893 | 5,12 |
| C108_21 | 1096,66 | 12 | 607 | 1261,44 | 15 | 725 | 15,03 | 1209,93 | 14 | 666 | 10,33 | 1096,66 | 12 | 607 | 0,00 | 1166,13 | 13 | 785 | 6,33 | 1129,33 | 12 | 1480 | 2,98 | 1213,59 | 13 | 593 | 10,66 |
| C109_21 | 1049,55 | 12 | 622 | 1247,83 | 13 | 1075 | 18,89 | 1211,91 | 13 | 845 | 15,47 | 1049,55 | 12 | 622 | 0,00 | 1135,57 | 12 | 754 | 8,20 | 1120,59 | 12 | 1396 | 6,77 | 1184,76 | 12 | 1029 | 12,88 |
| C201_21 | 864,80 | 8 | 718 | 1161,80 | 14 | 911 | 34,34 | 1002,80 | 11 | 871 | 15,96 | 864,80 | 8 | 718 | 0,00 | 871,98 | 8 | 770 | 0,83 | 876,42 | 8 | 1483 | 1,34 | 948,20 | 7 | 712 | 9,64 |
| C202_21 | 798,40 | 6 | 564 | 1092,51 | 11 | 2001 | 36,84 | 970,46 | 11 | 2043 | 21,55 | 798,40 | 6 | 564 | 0,00 | 886,54 | 8 | 906 | 11,04 | 856,06 | 6 | 1319 | 7,22 | 927,97 | 7 | 3167 | 16,23 |
| C203_21 | 735,19 | 5 | 1292 | 915,69 | 10 | 2226 | 24,55 | 825,52 | 8 | 2487 | 12,29 | 775,36 | 6 | 778 | 5,46 | 777,24 | 7 | 893 | 5,72 | 786,76 | 7 | 1050 | 7,01 | 863,18 | 9 | 639 | 17,41 |
| C204_21 | 722,44 | 5 | 862 | 847,47 | 9 | 1718 | 17,31 | 764,83 | 6 | 10226 | 5,87 | 722,44 | 5 | 862 | 0,00 | 738,13 | 6 | 911 | 2,17 | 726,23 | 6 | 1494 | 0,52 | 789,09 | 6 | 7819 | 9,23 |
| C205_21 | 830,46 | 6 | 600 | 1035,14 | 13 | 839 | 24,65 | 898,03 | 9 | 1862 | 8,14 | 830,46 | 6 | 600 | 0,00 | 875,68 | 8 | 841 | 5,45 | 850,08 | 8 | 785 | 2,36 | 924,54 | 8 | 3764 | 11,33 |
| C206_21 | 791,55 | 6 | 675 | 933,35 | 11 | 1248 | 17,91 | 952,13 | 7 | 3321 | 20,29 | 791,55 | 6 | 675 | 0,00 | 839,25 | 8 | 770 | 6,03 | 807,17 | 7 | 1414 | 1,97 | 830,04 | 6 | 6602 | 4,86 |
| C207_21 | 812,94 | 6 | 862 | 928,68 | 11 | 1544 | 14,24 | 908,33 | 6 | 7016 | 11,73 | 812,94 | 6 | 862 | 0,00 | 828,13 | 8 | 850 | 1,87 | 823,30 | 6 | 1494 | 1,27 | 877,89 | 7 | 5496 | 7,99 |
| C208_21 | 774,23 | 5 | 838 | 918,92 | 11 | 538 | 18,69 | 926,39 | 10 | 1986 | 19,65 | 774,23 | 5 | 838 | 0,00 | 844,92 | 7 | 901 | 9,13 | 797,59 | 6 | 1083 | 3,02 | 878,64 | 7 | 3295 | 13,49 |
| R101_21 | 1957,77 | 23 | 868 | 2178,00 | 25 | 836 | 11,25 | 2099,90 | 26 | 815 | 7,26 | 1957,77 | 23 | 868 | 0,00 | 2150,29 | 25 | 913 | 9,83 | 2000,45 | 23 | 998 | 2,18 | 2209,16 | 26 | 842 | 12,84 |
| R102_21 | 1773,21 | 20 | 743 | 2087,80 | 22 | 872 | 17,74 | 1943,87 | 21 | 774 | 9,62 | 1773,21 | 20 | 743 | 0,00 | 2010,13 | 23 | 902 | 13,36 | 1824,41 | 21 | 1484 | 2,89 | 1940,84 | 22 | 855 | 9,45 |
| R103_21 | 1580,69 | 17 | 427 | 2019,69 | 23 | 730 | 27,77 | 1832,28 | 20 | 887 | 15,92 | 1580,69 | 17 | 427 | 0,00 | 1830,85 | 19 | 888 | 15,83 | 1633,17 | 18 | 1299 | 3,32 | 1890,46 | 20 | 770 | 19,60 |
| R104_21 | 1297,71 | 14 | 862 | 1934,16 | 19 | 907 | 49,04 | 1664,36 | 18 | 838 | 28,25 | 1297,71 | 14 | 862 | 0,00 | 1537,24 | 15 | 857 | 18,46 | 1440,80 | 15 | 1435 | 11,03 | 1595,81 | 15 | 910 | 22,97 |
| R105_21 | 1710,17 | 19 | 886 | 2000,70 | 22 | 699 | 16,99 | 1956,14 | 21 | 896 | 14,38 | 1710,17 | 19 | 886 | 0,00 | 1963,62 | 22 | 771 | 14,82 | 1776,86 | 19 | 1498 | 3,90 | 1854,40 | 21 | 798 | 8,43 |
| R106_21 | 1612,50 | 18 | 810 | 2013,82 | 20 | 564 | 24,89 | 1710,90 | 19 | 894 | 6,10 | 1612,50 | 18 | 810 | 0,00 | 1820,03 | 19 | 883 | 12,87 | 1623,42 | 19 | 1408 | 0,68 | 1859,98 | 20 | 766 | 15,35 |
| R107_21 | 1335,84 | 15 | 412 | 1429,44 | 17 | 756 | 7,01 | 1435,47 | 18 | 751 | 7,46 | 1335,84 | 15 | 412 | 0,00 | 1397,59 | 16 | 698 | 4,62 | 1386,59 | 16 | 787 | 3,80 | 1428,57 | 16 | 891 | 6,94 |
| R108_21 | 1341,75 | 14 | 1192 | 1634,93 | 16 | 769 | 21,85 | 1513,60 | 15 | 833 | 12,81 | 1345,45 | 14 | 848 | 0,28 | 1471,95 | 15 | 809 | 9,70 | 1354,91 | 14 | 1323 | 0,98 | 1579,06 | 15 | 947 | 17,69 |
| R109_21 | 1460,65 | 16 | 1058 | 1525,97 | 16 | 942 | 4,47 | 1487,87 | 17 | 888 | 1,86 | 1462,62 | 17 | 770 | 0,13 | 1504,78 | 18 | 171 | 3,02 | 1500,48 | 17 | 1346 | 2,73 | 1482,63 | 16 | 801 | 1,50 |
| R110_21 | 1230,80 | 14 | 165 | 1298,13 | 15 | 635 | 5,47 | 1274,69 | 14 | 700 | 3,57 | 1230,80 | 14 | 165 | 0,00 | 1266,60 | 14 | 639 | 2,91 | 1255,03 | 14 | 974 | 1,97 | 1289,71 | 14 | 789 | 4,79 |
| R111_21 | 1331,25 | 14 | 761 | 1390,32 | 16 | 877 | 4,32 | 1344,70 | 15 | 784 | 0,90 | 1348,42 | 15 | 898 | 1,18 | 1413,30 | 17 | 438 | 6,05 | 1373,04 | 16 | 982 | 3,03 | 1379,52 | 16 | 718 | 3,51 |
| R112_21 | 1208,11 | 13 | 801 | 1265,68 | 15 | 678 | 4,40 | 1270,94 | 13 | 1031 | 4,84 | 1212,31 | 13 | 605 | 0,00 | 1252,16 | 14 | 627 | 3,29 | 1238,19 | 13 | 1395 | 2,13 | 1287,56 | 15 | 877 | 6,21 |
| R201_21 | 1190,58 | 8 | 824 | 1336,31 | 12 | 1838 | 12,24 | 1308,56 | 10 | 988 | 9,91 | 1201,61 | 7 | 763 | 0,93 | 1238,62 | 10 | 857 | 4,04 | 1190,58 | 8 | 824 | 0,00 | 1264,12 | 10 | 1080 | 6,18 |
| R202_21 | 1080,21 | 8 | 1077 | 1143,39 | 11 | 1312 | 5,85 | 1119,94 | 7 | 691 | 3,68 | 1096,66 | 6 | 784 | 1,52 | 1114,39 | 9 | 694 | 3,16 | 1080,21 | 8 | 1077 | 0,00 | 1154,48 | 8 | 297 | 6,88 |
| R203_21 | 962,34 | 5 | 603 | 1022,45 | 9 | 1960 | 4,46 | 1009,35 | 8 | 3248 | 3,12 | 978,83 | 6 | 706 | 0,00 | 1003,92 | 6 | 850 | 2,56 | 993,98 | 7 | 1288 | 1,55 | 1005,74 | 8 | 2748 | 2,75 |
| R204_21 | 806,85 | 4 | 834 | 891,58 | 8 | 1522 | 10,50 | 845,51 | 5 | 6837 | 4,79 | 806,85 | 4 | 834 | 0,00 | 858,78 | 6 | 893 | 6,44 | 820,02 | 4 | 794 | 1,63 | 869,98 | 4 | 19267 | 7,82 |
| R205_21 | 1018,51 | 7 | 751 | 1138,83 | 10 | 718 | 11,81 | 1073,71 | 9 | 780 | 5,42 | 1018,51 | 7 | 751 | 0,00 | 1069,36 | 7 | 860 | 4,99 | 1061,59 | 9 | 952 | 4,23 | 1110,42 | 6 | 4089 | 9,02 |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

**Tablo 5.34 (devam):** EARP-ZP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V1-V6 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-ZP-EZTD | | | İndirgenmiş DKA | | | | | | | | | | | | Basit DKA | | | | Genel DKA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V1 Sıralı | | | | V2 Boru | | | | V3 Döngüsel | | | | V4 Sıralı | | | | V5 Boru | | | | V6 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| R206_21 | 999,45 | 8 | 1110 | 1076,42 | 12 | 1186 | 7,70 | 1050,01 | 9 | 768 | 5,06 | 1006,92 | 6 | 573 | 0,75 | 1024,12 | 8 | 665 | 2,47 | 999,45 | 8 | 1110 | 0,00 | 1058,70 | 5 | 9070 | 5,93 |
| R207_21 | 916,93 | 6 | 746 | 990,00 | 8 | 1213 | 7,97 | 935,49 | 5 | 909 | 2,02 | 916,93 | 6 | 746 | 0,00 | 951,97 | 7 | 577 | 3,82 | 919,49 | 5 | 1582 | 0,28 | 967,20 | 5 | 878 | 5,48 |
| R208_21 | 806,53 | 4 | 884 | 885,38 | 7 | 911 | 9,78 | 865,79 | 4 | 871 | 7,35 | 806,53 | 4 | 884 | 0,00 | 859,75 | 7 | 881 | 6,60 | 809,44 | 4 | 1453 | 0,36 | 859,77 | 6 | 871 | 6,60 |
| R209_21 | 948,17 | 6 | 689 | 999,96 | 5 | 11159 | 5,46 | 996,18 | 7 | 2415 | 5,06 | 948,17 | 6 | 689 | 0,00 | 980,18 | 8 | 761 | 3,38 | 966,68 | 6 | 943 | 1,95 | 1030,19 | 8 | 1727 | 8,65 |
| R210_21 | 918,90 | 6 | 1237 | 1040,47 | 6 | 5699 | 13,23 | 1028,79 | 10 | 1974 | 11,96 | 946,16 | 6 | 825 | 2,97 | 982,33 | 8 | 448 | 6,90 | 946,39 | 6 | 1539 | 2,99 | 1008,33 | 8 | 2823 | 9,73 |
| R211_21 | 844,45 | 5 | 1183 | 964,67 | 10 | 825 | 14,24 | 889,50 | 7 | 709 | 5,33 | 854,97 | 5 | 656 | 1,25 | 903,94 | 7 | 835 | 7,04 | 874,10 | 6 | 917 | 3,51 | 880,75 | 5 | 16221 | 4,30 |
| RC101_21 | 2016,65 | 20 | 902 | 2343,38 | 23 | 874 | 16,20 | 2265,04 | 22 | 939 | 12,32 | 2016,65 | 20 | 902 | 0,00 | 2319,26 | 23 | 737 | 15,01 | 2203,22 | 22 | 1473 | 9,25 | 2243,83 | 23 | 835 | 11,27 |
| RC102_21 | 1883,59 | 18 | 874 | 2260,80 | 21 | 583 | 20,03 | 2254,77 | 21 | 842 | 19,71 | 1883,59 | 18 | 874 | 0,00 | 2107,52 | 20 | 771 | 11,89 | 2021,45 | 19 | 1499 | 7,32 | 2120,95 | 21 | 917 | 12,60 |
| RC103_21 | 1638,17 | 15 | 853 | 2007,24 | 19 | 984 | 22,53 | 1932,38 | 17 | 934 | 17,96 | 1638,17 | 15 | 853 | 0,00 | 1903,89 | 19 | 895 | 16,22 | 1739,39 | 17 | 1386 | 6,18 | 1946,98 | 18 | 930 | 18,85 |
| RC104_21 | 1441,92 | 14 | 867 | 1510,38 | 15 | 953 | 4,75 | 1547,77 | 15 | 792 | 7,34 | 1441,92 | 14 | 867 | 0,00 | 1492,52 | 14 | 788 | 3,51 | 1480,18 | 14 | 1489 | 2,65 | 1540,35 | 16 | 949 | 6,83 |
| RC105_21 | 1722,70 | 17 | 915 | 2047,56 | 20 | 806 | 18,86 | 2039,26 | 20 | 884 | 18,38 | 1722,70 | 17 | 915 | 0,00 | 1989,45 | 19 | 633 | 15,48 | 1820,52 | 17 | 1395 | 5,68 | 1993,23 | 20 | 638 | 15,70 |
| RC106_21 | 1783,57 | 17 | 1173 | 1972,58 | 19 | 878 | 10,60 | 1854,18 | 19 | 960 | 3,96 | 1785,27 | 17 | 900 | 0,10 | 1930,73 | 17 | 625 | 8,25 | 1783,57 | 17 | 1173 | 0,00 | 1925,82 | 19 | 916 | 7,98 |
| RC107_21 | 1428,05 | 14 | 855 | 1470,61 | 14 | 682 | 2,98 | 1477,47 | 14 | 986 | 3,46 | 1428,05 | 14 | 855 | 0,00 | 1492,96 | 14 | 831 | 4,55 | 1436,51 | 14 | 1117 | 0,59 | 1475,51 | 14 | 983 | 3,32 |
| RC108_21 | 1342,34 | 13 | 662 | 1418,34 | 14 | 981 | 5,66 | 1395,66 | 14 | 916 | 3,97 | 1365,86 | 13 | 836 | 1,75 | 1342,34 | 13 | 662 | 0,00 | 1369,97 | 13 | 1492 | 2,06 | 1409,09 | 14 | 743 | 4,97 |
| RC201_21 | 1334,41 | 10 | 1285 | 1574,38 | 13 | 824 | 17,98 | 1452,89 | 10 | 883 | 8,88 | 1366,93 | 10 | 847 | 2,44 | 1362,34 | 10 | 678 | 2,09 | 1334,41 | 10 | 1285 | 0,00 | 1505,40 | 12 | 739 | 12,81 |
| RC202_21 | 1234,74 | 8 | 901 | 1387,81 | 9 | 1727 | 12,40 | 1346,30 | 6 | 803 | 9,04 | 1234,74 | 8 | 901 | 0,00 | 1334,72 | 10 | 864 | 8,10 | 1279,10 | 9 | 1401 | 3,59 | 1372,12 | 9 | 293 | 11,13 |
| RC203_21 | 1037,10 | 8 | 580 | 1147,16 | 10 | 1285 | 10,61 | 1080,31 | 8 | 828 | 4,17 | 1037,10 | 8 | 580 | 0,00 | 1119,45 | 9 | 756 | 7,94 | 1071,02 | 7 | 1447 | 3,27 | 1146,89 | 7 | 5917 | 10,59 |
| RC204_21 | 932,45 | 6 | 727 | 1111,34 | 10 | 206 | 19,18 | 1018,63 | 8 | 858 | 9,24 | 963,87 | 6 | 847 | 3,37 | 964,73 | 8 | 855 | 3,46 | 943,25 | 6 | 1171 | 1,16 | 1021,12 | 6 | 903 | 9,51 |
| RC205_21 | 1158,30 | 8 | 908 | 1302,96 | 9 | 1347 | 12,49 | 1265,95 | 10 | 1502 | 9,29 | 1189,72 | 7 | 830 | 2,71 | 1252,42 | 8 | 868 | 8,13 | 1158,30 | 8 | 908 | 0,00 | 1339,62 | 10 | 1494 | 15,65 |
| RC206_21 | 1152,19 | 8 | 962 | 1264,58 | 11 | 902 | 9,75 | 1232,14 | 7 | 2663 | 6,94 | 1158,86 | 6 | 625 | 0,58 | 1197,56 | 8 | 864 | 3,94 | 1153,14 | 7 | 1104 | 0,08 | 1243,18 | 8 | 1438 | 7,90 |
| RC207_21 | 998,90 | 7 | 821 | 1135,30 | 8 | 2244 | 13,66 | 1044,15 | 8 | 178 | 4,53 | 998,90 | 7 | 821 | 0,00 | 1037,14 | 7 | 908 | 3,83 | 1027,21 | 6 | 1297 | 2,83 | 1092,58 | 9 | 1699 | 9,38 |
| RC208_21 | 908,12 | 6 | 950 | 1032,67 | 9 | 595 | 13,72 | 1029,65 | 6 | 7423 | 13,38 | 917,83 | 6 | 786 | 1,07 | 928,87 | 7 | 668 | 2,28 | 908,12 | 6 | 950 | 0,00 | 992,13 | 8 | 1721 | 9,25 |
| **Ortalama** | | | **840** | | | 1289 | **15,02** | | | 1595 | **9,88** | | | 760 | **0,60** | | | 768 | **6,91** | | | 1244 | **2,93** | | | 2308 | **9,88** |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

**Tablo 5.35:** EARP-ZP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V6-V12 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-ZP-EZTD | | | Rassal DKA | | | | | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | m | t | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % | f | m | t | % |
| C101_21 | 1110,63 | 12 | 492 | 1268,32 | 14 | 917 | 13,80 | 1258,77 | 15 | 921 | 12,95 | 1116,68 | 12 | 429 | 0,20 | 1301,64 | 14 | 334 | 16,79 | 1267,48 | 14 | 500 | 14,12 | 1110,63 | 12 | 492 | 0,00 |
| C102_21 | 1094,91 | 12 | 1166 | 1331,31 | 15 | 672 | 21,59 | 1334,14 | 16 | 889 | 21,85 | 1094,91 | 12 | 1166 | 0,00 | 1273,81 | 16 | 794 | 16,34 | 1216,08 | 15 | 490 | 11,07 | 1122,51 | 13 | 746 | 2,52 |
| C103_21 | 1098,00 | 12 | 649 | 1302,50 | 15 | 876 | 16,54 | 1275,44 | 15 | 856 | 14,12 | 1151,01 | 14 | 443 | 2,98 | 1213,61 | 15 | 651 | 8,58 | 1227,33 | 15 | 795 | 11,78 | 1098,00 | 12 | 649 | 0,00 |
| C104_21 | 985,94 | 11 | 607 | 1071,08 | 12 | 1097 | 8,64 | 1071,08 | 12 | 1105 | 8,64 | 1031,43 | 12 | 334 | 4,61 | 1102,51 | 12 | 627 | 11,82 | 1069,48 | 11 | 172 | 8,47 | 1065,09 | 11 | 787 | 8,03 |
| C105_21 | 1131,97 | 13 | 1212 | 1299,14 | 14 | 466 | 14,77 | 1206,64 | 14 | 726 | 6,60 | 1131,97 | 13 | 1212 | 0,00 | 1295,58 | 15 | 901 | 14,45 | 1276,55 | 13 | 517 | 12,77 | 1142,42 | 12 | 685 | 0,92 |
| C106_21 | 1061,37 | 12 | 779 | 1343,59 | 15 | 835 | 26,58 | 1208,99 | 16 | 865 | 13,90 | 1072,82 | 12 | 1274 | 1,07 | 1240,77 | 14 | 251 | 16,89 | 1183,25 | 15 | 284 | 11,48 | 1061,37 | 12 | 779 | 0,00 |
| C107_21 | 1067,11 | 12 | 1341 | 1181,79 | 13 | 804 | 10,75 | 1181,79 | 13 | 698 | 10,75 | 1140,45 | 12 | 1163 | 6,87 | 1217,73 | 14 | 676 | 14,11 | 1169,50 | 14 | 772 | 9,60 | 1073,72 | 12 | 570 | 0,62 |
| C108_21 | 1096,66 | 12 | 607 | 1333,97 | 17 | 871 | 21,64 | 1346,08 | 15 | 495 | 22,74 | 1142,25 | 13 | 1171 | 4,16 | 1305,99 | 15 | 260 | 19,09 | 1267,25 | 14 | 753 | 15,56 | 1152,36 | 12 | 796 | 5,08 |
| C109_21 | 1049,55 | 12 | 622 | 1233,57 | 14 | 840 | 17,53 | 1238,61 | 12 | 607 | 18,01 | 1077,13 | 12 | 1262 | 2,63 | 1166,95 | 13 | 456 | 11,19 | 1147,05 | 12 | 809 | 9,29 | 1094,99 | 11 | 735 | 4,33 |
| C201_21 | 864,80 | 8 | 718 | 916,03 | 7 | 890 | 5,92 | 916,03 | 7 | 970 | 5,92 | 884,36 | 8 | 880 | 2,26 | 928,63 | 10 | 682 | 7,38 | 906,79 | 8 | 115 | 4,86 | 916,00 | 8 | 293 | 5,92 |
| C202_21 | 798,40 | 6 | 564 | 942,85 | 7 | 874 | 18,09 | 950,42 | 9 | 382 | 19,04 | 827,92 | 6 | 1025 | 3,70 | 980,58 | 9 | 794 | 22,82 | 857,16 | 7 | 322 | 7,36 | 816,64 | 6 | 686 | 2,28 |
| C203_21 | 735,19 | 5 | 1292 | 891,67 | 8 | 2645 | 21,28 | 891,67 | 8 | 2588 | 21,28 | 735,19 | 5 | 1292 | 0,00 | 872,08 | 7 | 787 | 18,62 | 861,79 | 7 | 236 | 17,22 | 798,75 | 7 | 674 | 8,65 |
| C204_21 | 722,44 | 5 | 862 | 846,50 | 7 | 8002 | 17,17 | 837,32 | 6 | 849 | 15,90 | 744,39 | 5 | 1238 | 3,04 | 814,83 | 8 | 236 | 12,79 | 781,56 | 5 | 249 | 8,18 | 724,61 | 5 | 787 | 0,30 |
| C205_21 | 830,46 | 6 | 600 | 985,66 | 9 | 894 | 18,69 | 942,38 | 10 | 924 | 13,48 | 839,78 | 8 | 1238 | 1,12 | 909,02 | 10 | 761 | 9,46 | 931,70 | 8 | 283 | 12,19 | 851,34 | 8 | 672 | 2,51 |
| C206_21 | 791,55 | 6 | 675 | 886,22 | 8 | 874 | 11,96 | 879,12 | 8 | 3384 | 11,06 | 822,10 | 6 | 1277 | 3,86 | 891,62 | 9 | 897 | 12,64 | 851,44 | 6 | 522 | 7,57 | 798,26 | 5 | 559 | 0,85 |
| C207_21 | 812,94 | 6 | 862 | 923,61 | 7 | 7646 | 13,61 | 917,87 | 7 | 2804 | 12,91 | 815,46 | 6 | 1246 | 0,31 | 856,46 | 8 | 824 | 5,35 | 875,62 | 8 | 611 | 7,71 | 815,75 | 7 | 705 | 0,35 |
| C208_21 | 774,23 | 5 | 838 | 905,80 | 8 | 2398 | 16,99 | 905,80 | 8 | 2370 | 16,99 | 789,35 | 6 | 1226 | 1,95 | 888,38 | 9 | 599 | 14,74 | 883,51 | 8 | 485 | 14,11 | 802,68 | 6 | 569 | 3,67 |
| R101_21 | 1957,77 | 23 | 868 | 2288,67 | 26 | 861 | 16,90 | 2205,40 | 25 | 681 | 12,65 | 1975,21 | 23 | 1170 | 0,89 | 2344,84 | 27 | 702 | 19,77 | 2167,72 | 27 | 739 | 10,72 | 2113,71 | 25 | 714 | 7,97 |
| R102_21 | 1773,21 | 20 | 743 | 2056,68 | 23 | 903 | 15,99 | 2016,37 | 22 | 712 | 13,71 | 1867,80 | 22 | 938 | 5,33 | 2007,11 | 23 | 615 | 13,19 | 2029,93 | 23 | 811 | 14,48 | 1863,42 | 22 | 783 | 5,09 |
| R103_21 | 1580,69 | 17 | 427 | 1980,33 | 21 | 904 | 25,28 | 1861,80 | 20 | 856 | 17,78 | 1666,47 | 18 | 776 | 5,43 | 1800,37 | 19 | 524 | 13,90 | 1850,50 | 19 | 316 | 17,07 | 1672,16 | 18 | 718 | 5,79 |
| R104_21 | 1297,71 | 14 | 862 | 1693,70 | 19 | 918 | 30,51 | 1802,50 | 20 | 880 | 38,90 | 1430,23 | 16 | 1089 | 10,21 | 1751,06 | 17 | 868 | 34,93 | 1585,36 | 16 | 373 | 22,17 | 1367,62 | 14 | 554 | 5,39 |
| R105_21 | 1710,17 | 19 | 886 | 2015,26 | 22 | 867 | 17,84 | 2048,04 | 22 | 817 | 19,76 | 1739,47 | 20 | 1238 | 1,71 | 2007,34 | 21 | 588 | 17,38 | 2013,30 | 21 | 193 | 17,73 | 1715,00 | 20 | 750 | 0,28 |
| R106_21 | 1612,50 | 18 | 810 | 1857,72 | 19 | 896 | 15,21 | 1911,04 | 20 | 823 | 18,51 | 1691,04 | 19 | 957 | 4,87 | 1975,46 | 21 | 299 | 22,51 | 1884,52 | 20 | 340 | 16,87 | 1714,77 | 19 | 671 | 6,34 |
| R107_21 | 1335,84 | 15 | 412 | 1453,26 | 16 | 907 | 8,79 | 1436,25 | 18 | 813 | 7,52 | 1337,93 | 15 | 944 | 0,16 | 1427,39 | 18 | 275 | 6,85 | 1407,64 | 15 | 116 | 5,37 | 1396,07 | 16 | 674 | 4,51 |
| R108_21 | 1341,75 | 14 | 1192 | 1608,88 | 17 | 711 | 19,91 | 1603,86 | 16 | 1101 | 19,53 | 1341,75 | 14 | 1192 | 0,00 | 1592,68 | 15 | 890 | 18,70 | 1421,22 | 14 | 720 | 5,92 | 1388,58 | 14 | 667 | 3,49 |
| R109_21 | 1460,65 | 16 | 1058 | 1488,28 | 16 | 1074 | 1,89 | 1488,28 | 16 | 1082 | 1,89 | 1460,65 | 16 | 1058 | 0,00 | 1549,21 | 18 | 230 | 6,06 | 1529,24 | 17 | 555 | 4,70 | 1493,97 | 17 | 617 | 2,28 |
| R110_21 | 1230,80 | 14 | 165 | 1286,89 | 15 | 841 | 4,56 | 1286,89 | 15 | 1029 | 4,56 | 1270,42 | 14 | 562 | 3,22 | 1285,52 | 15 | 195 | 4,45 | 1268,53 | 14 | 128 | 3,07 | 1279,96 | 14 | 428 | 3,99 |
| R111_21 | 1331,25 | 14 | 761 | 1401,78 | 16 | 829 | 5,18 | 1412,21 | 15 | 940 | 5,97 | 1332,70 | 15 | 1055 | 0,00 | 1396,84 | 17 | 68 | 4,81 | 1393,87 | 17 | 100 | 4,70 | 1331,25 | 14 | 761 | 0,00 |
| R112_21 | 1208,11 | 13 | 801 | 1287,30 | 15 | 709 | 6,19 | 1275,27 | 15 | 1029 | 5,19 | 1228,26 | 13 | 1157 | 1,32 | 1265,29 | 14 | 443 | 4,37 | 1254,99 | 14 | 614 | 3,88 | 1208,11 | 13 | 801 | 0,00 |
| R201_21 | 1190,58 | 8 | 824 | 1304,86 | 11 | 806 | 9,60 | 1298,92 | 10 | 1195 | 9,10 | 1196,63 | 8 | 1048 | 0,51 | 1303,95 | 11 | 511 | 9,52 | 1270,88 | 11 | 650 | 6,74 | 1217,48 | 8 | 571 | 2,26 |
| R202_21 | 1080,21 | 8 | 1077 | 1143,83 | 8 | 2106 | 5,89 | 1163,27 | 11 | 1220 | 7,69 | 1098,49 | 8 | 1101 | 1,69 | 1193,71 | 11 | 744 | 10,51 | 1145,33 | 6 | 398 | 6,03 | 1111,31 | 6 | 790 | 2,88 |
| R203_21 | 962,34 | 5 | 603 | 1019,56 | 7 | 3046 | 4,16 | 1036,79 | 9 | 3417 | 5,92 | 979,29 | 6 | 1164 | 0,05 | 1067,39 | 10 | 558 | 9,05 | 1039,28 | 8 | 753 | 8,00 | 962,34 | 5 | 603 | 0,00 |
| R204_21 | 806,85 | 4 | 834 | 866,72 | 5 | 11184 | 7,42 | 852,99 | 5 | 4266 | 5,72 | 842,54 | 6 | 1212 | 4,42 | 962,95 | 8 | 848 | 19,35 | 881,65 | 5 | 221 | 9,27 | 837,98 | 4 | 750 | 3,86 |
| R205_21 | 1018,51 | 7 | 751 | 1128,77 | 7 | 465 | 10,83 | 1128,46 | 10 | 1341 | 10,80 | 1043,58 | 8 | 1145 | 2,46 | 1136,05 | 10 | 616 | 11,54 | 1094,31 | 9 | 152 | 7,44 | 1069,49 | 6 | 490 | 5,01 |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

**Tablo 5.35 (devam):** EARP-ZP-EZTD 100 Müşterili veri setlerinin V6-V12 DKA çözüm sonuçları

| | EARP-ZP-EZTD | | | Rassal DKA | | | | | | | | Kümelenmiş DKA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BEÇ | | | V7 Sıralı | | | | V8 Boru | | | | V9 Döngüsel | | | | V10 Sıralı | | | | V11 Boru | | | | V12 Döngüsel | | | |
| **Veri Seti** | f | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | f | m | t | % |
| R206_21 | 999,45 | 8 | 1110 | 1098,57 | 8 | 3844 | 9,92 | 1098,57 | 8 | 3839 | 9,92 | 1013,35 | 8 | 652 | 1,39 | 1088,54 | 10 | 818 | 8,91 | 1063,01 | 7 | 696 | 6,36 | 1030,45 | 6 | 606 | 3,10 |
| R207_21 | 916,93 | 6 | 746 | 963,38 | 7 | 676 | 5,07 | 963,38 | 7 | 671 | 5,07 | 918,96 | 5 | 1293 | 0,22 | 992,41 | 7 | 690 | 8,23 | 944,16 | 5 | 630 | 2,97 | 918,05 | 5 | 791 | 0,12 |
| R208_21 | 806,53 | 4 | 884 | 892,04 | 7 | 815 | 10,60 | 841,63 | 6 | 915 | 4,35 | 813,31 | 4 | 1216 | 0,84 | 894,61 | 7 | 712 | 10,92 | 841,77 | 5 | 439 | 4,37 | 818,00 | 4 | 371 | 1,42 |
| R209_21 | 948,17 | 6 | 689 | 1026,36 | 8 | 662 | 8,25 | 1026,36 | 8 | 700 | 8,25 | 963,30 | 6 | 1255 | 1,60 | 1029,46 | 10 | 521 | 8,57 | 997,45 | 7 | 746 | 5,20 | 970,61 | 6 | 810 | 2,37 |
| R210_21 | 918,90 | 6 | 1237 | 1046,87 | 11 | 1851 | 13,93 | 1046,87 | 11 | 1799 | 13,93 | 918,90 | 6 | 1237 | 0,00 | 1011,36 | 9 | 362 | 10,06 | 991,69 | 8 | 439 | 7,92 | 953,73 | 7 | 530 | 3,79 |
| R211_21 | 844,45 | 5 | 1183 | 917,92 | 4 | 16178 | 8,70 | 917,92 | 4 | 15121 | 8,70 | 844,45 | 5 | 1183 | 0,00 | 935,88 | 9 | 398 | 10,83 | 900,82 | 4 | 166 | 6,68 | 871,52 | 4 | 747 | 3,21 |
| RC101_21 | 2016,65 | 20 | 902 | 2356,61 | 22 | 864 | 16,86 | 2322,03 | 23 | 825 | 15,14 | 2135,56 | 21 | 1121 | 5,90 | 2357,30 | 23 | 436 | 16,89 | 2217,97 | 22 | 652 | 9,98 | 2134,92 | 20 | 771 | 5,86 |
| RC102_21 | 1883,59 | 18 | 874 | 2295,70 | 23 | 693 | 21,88 | 2237,44 | 21 | 884 | 18,79 | 1943,20 | 18 | 1247 | 3,16 | 2105,68 | 20 | 460 | 11,79 | 2146,37 | 21 | 605 | 13,95 | 1938,79 | 19 | 544 | 2,93 |
| RC103_21 | 1638,17 | 15 | 853 | 2141,90 | 20 | 1001 | 30,75 | 2165,79 | 19 | 900 | 32,21 | 1663,74 | 16 | 1037 | 1,56 | 1944,39 | 18 | 295 | 18,69 | 1805,28 | 17 | 339 | 10,20 | 1779,34 | 17 | 776 | 8,62 |
| RC104_21 | 1441,92 | 14 | 867 | 1532,50 | 15 | 1084 | 6,28 | 1559,40 | 15 | 966 | 8,15 | 1489,44 | 15 | 1215 | 3,30 | 1574,98 | 15 | 856 | 9,23 | 1531,27 | 14 | 757 | 6,20 | 1495,66 | 14 | 368 | 3,73 |
| RC105_21 | 1722,70 | 17 | 915 | 2077,14 | 20 | 722 | 20,57 | 2122,13 | 22 | 870 | 23,19 | 1766,69 | 18 | 997 | 2,55 | 2014,06 | 19 | 784 | 16,91 | 2060,36 | 19 | 265 | 19,60 | 1918,80 | 18 | 766 | 11,38 |
| RC106_21 | 1783,57 | 17 | 1173 | 1997,63 | 19 | 625 | 12,00 | 1994,80 | 19 | 873 | 11,84 | 1827,83 | 17 | 1175 | 2,48 | 1958,83 | 18 | 830 | 9,83 | 1896,34 | 18 | 607 | 6,32 | 1851,24 | 18 | 580 | 3,79 |
| RC107_21 | 1428,05 | 14 | 855 | 1477,90 | 15 | 497 | 3,49 | 1477,90 | 15 | 507 | 3,49 | 1443,91 | 14 | 846 | 1,11 | 1514,46 | 15 | 523 | 6,05 | 1498,14 | 14 | 321 | 4,91 | 1478,77 | 14 | 505 | 3,55 |
| RC108_21 | 1342,34 | 13 | 662 | 1404,01 | 14 | 907 | 4,59 | 1413,47 | 14 | 964 | 5,30 | 1395,10 | 14 | 1104 | 3,93 | 1425,04 | 14 | 863 | 6,16 | 1373,54 | 13 | 129 | 2,32 | 1388,90 | 13 | 426 | 3,47 |
| RC201_21 | 1334,41 | 10 | 1285 | 1617,41 | 12 | 927 | 21,21 | 1617,41 | 12 | 850 | 21,21 | 1371,12 | 11 | 472 | 2,75 | 1627,96 | 15 | 863 | 22,00 | 1546,97 | 11 | 378 | 15,93 | 1350,63 | 9 | 789 | 1,22 |
| RC202_21 | 1234,74 | 8 | 901 | 1336,26 | 8 | 1666 | 8,22 | 1336,26 | 8 | 1593 | 8,22 | 1287,95 | 7 | 1301 | 4,31 | 1420,59 | 13 | 726 | 15,05 | 1412,69 | 10 | 258 | 14,41 | 1286,69 | 8 | 744 | 4,21 |
| RC203_21 | 1037,10 | 8 | 580 | 1199,02 | 7 | 2347 | 15,61 | 1184,26 | 8 | 3424 | 14,19 | 1052,28 | 7 | 1101 | 1,46 | 1105,68 | 9 | 700 | 6,61 | 1129,86 | 10 | 742 | 8,94 | 1060,48 | 7 | 768 | 2,25 |
| RC204_21 | 932,45 | 6 | 727 | 1042,04 | 7 | 899 | 11,75 | 998,96 | 6 | 878 | 7,13 | 949,53 | 7 | 1253 | 1,83 | 1024,85 | 8 | 300 | 9,91 | 1035,80 | 7 | 790 | 11,08 | 932,45 | 6 | 727 | 0,00 |
| RC205_21 | 1158,30 | 8 | 908 | 1328,33 | 11 | 1033 | 14,68 | 1328,33 | 11 | 1085 | 14,68 | 1210,99 | 9 | 1080 | 4,55 | 1410,60 | 12 | 354 | 21,78 | 1310,08 | 8 | 244 | 13,10 | 1194,93 | 8 | 736 | 3,16 |
| RC206_21 | 1152,19 | 8 | 962 | 1213,33 | 7 | 3026 | 5,31 | 1213,33 | 7 | 2823 | 5,31 | 1152,19 | 8 | 962 | 0,00 | 1275,76 | 10 | 688 | 10,72 | 1255,13 | 9 | 595 | 8,93 | 1170,35 | 6 | 794 | 1,58 |
| RC207_21 | 998,90 | 7 | 821 | 1123,13 | 6 | 896 | 12,44 | 1120,35 | 6 | 4170 | 12,16 | 1008,14 | 7 | 1291 | 0,93 | 1104,65 | 9 | 592 | 10,59 | 1103,99 | 10 | 579 | 10,52 | 1036,94 | 7 | 570 | 3,81 |
| RC208_21 | 908,12 | 6 | 950 | 1032,85 | 8 | 844 | 13,73 | 1032,85 | 8 | 831 | 13,73 | 915,58 | 6 | 705 | 0,82 | 993,37 | 8 | 142 | 9,39 | 960,18 | 5 | 538 | 5,73 | 965,20 | 7 | 764 | 6,29 |
| **Ortalama** | | | **840** | | | 1816 | **13,61** | | | 1592 | **12,88** | | | 1061 | **2,32** | | | 579 | **12,93** | | | 465 | **9,70** | | | 661 | **3,30** |

**BEÇ**: V1-V12 arasında bulunan en iyi çözüm, **f**: toplam mesafe, **m**: kullanılan elektrikli araç sayısı, **t**: çözüm süresi (saniye), **%**: DKA çözümünün BEÇ ile farkı.

## 5.4 Deneysel Sonuçların İstatistiksel Analizi

Bu bölümde, 4 problem (EARP, EARP-ZP, EARP-EZTD, EARP-ZP-EZTD) için Bölüm 5.3'te detayları verilen 12 farklı DKA varyantına ait çözüm sonuçlarının istatistiksel analizleri yapılmıştır. İstatistiksel analizlerin amacı, farklı DKA türlerinin ve KDA'ların performansını değerlendirmek ve en iyi performans gösteren DKA türünü belirlemektir. Öncelikle, her bir problem için elde edilen çözümlere ait toplam mesafe değerleri kullanılarak bir veri matrisi hazırlanmıştır. Matriste her satır bir veri setini ve her sütun farklı bir DKA versiyonunu temsil etmektedir. Amaç fonksiyonu toplam mesafenin en küçüklenmesi olduğu için, matristeki değerlerden düşük olanlar ilgili DKA versiyonunun daha etkili olduğunu göstermektedir.

İstatistiksel analiz için öncelikle Friedman (Friedman 1937) testi uygulanmıştır. Bu test, bağımlı örneklem durumlarında kullanılır ve birden fazla eşleşmiş grup arasında anlamlı farklılıklar olup olmadığını belirlemeye çalışır. Bu durumda, veri setlerinin her birinde 12 farklı DKA versiyonu uygulandığı için, bağımlı örneklem durumu söz konusudur. Friedman testi, $p$ değerini hesaplar ve bu değer, önem düzeyi $\alpha$ ile karşılaştırılır. Bu çalışmada $\alpha = 0{,}05$ olarak belirlenmiştir.

Friedman testi sonucunda elde edilen $p$ değerinin $\alpha$ düzeyinden daha küçük olması durumunda, DKA versiyonları arasında anlamlı bir fark olduğu sonucuna varılır. Bu durumda, hangi DKA versiyonları arasında anlamlı farklılıklar olduğunu belirlemek için post-hoc testleri kullanılır. Bu çalışmada, post-hoc analiz olarak Dunn-Bonferroni (Dunn 1961) testi kullanılmıştır. Dunn-Bonferroni testi, non-parametrik çoklu karşılaştırmalar için uygundur ve Friedman testinden sonra uygulanabilir. Test, DKA versiyonları arasındaki karşılaştırmaların her biri için bir $Q$ değeri hesaplar ve bunları $Q_{kritik}$ değeri ile karşılaştırır. $Q$ değeri, $Q_{kritik}$ değerinden büyükse, hipotez $H_0$ reddedilir ve karşılaştırılan gruplar arasında anlamlı bir fark olduğu kabul edilir. Aksi takdirde, hipotez kabul edilir ve gruplar arasında anlamlı bir fark olmadığı sonucuna varılır.

Ancak, en iyi DKA versiyonunu belirlemek için sadece anlamlı farklılıklara bakmak yeterli değildir. Bunun yerine, ortalama sıralamalarını (mean rank) incelemek

ve en düşük ortalama sıralamaya sahip DKA versiyonunu belirlemek daha uygun olacaktır. Ortalama sıralamaları, DKA versiyonlarının tüm veri setleri üzerindeki performansını daha iyi yansıtmaktadır.

### 5.4.1 EARP için Sonuçların İstatistiksel Analizi

Bu bölümde, 100 müşteri 21 Şİ içeren büyük boyutlu 34 veri setinin EARP kapsamında 12 farklı DKA versiyonu ile çözümüne yönelik sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İstatistiksel analiz için öncelikle Friedman testi uygulanmıştır. Friedman test sonucunda $p = 4{,}88477E-37$ olarak bulunmuştur (Tablo 5.36). $p < \alpha$ olduğu için DKA versiyonları arasında anlamlı bir fark vardır.

**Tablo 5.36:** EARP sonuçları için Friedman testi ANOVA tablosu

| **Kaynak** | $\boldsymbol{SS}$ | $\boldsymbol{df}$ | $\boldsymbol{MS}$ | $\boldsymbol{Chi-sq}$ | $\boldsymbol{Prob > Chi-sq}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| DKA Versiyonları | 2609,29 | 11 | 237,209 | 200,88 | $4{,}88477E-37$ |
| Hata | 2248,71 | 363 | 6,195 | | |
| Toplam | 4858 | 407 | | | |

$\boldsymbol{SS}$: Kareler toplamı, $\boldsymbol{df}$: Serbestlik derecesi, $\boldsymbol{MS}$: Kareler ortalaması, $\boldsymbol{Chi-sq}$: Ki-Kare değeri, $\boldsymbol{Prob > Chi-sq}$: Ki-Kare değerinden büyük olasılık ($p$).

Hangi DKA versiyonları arasında farklılık olduğunu belirlemek için post-hoc analiz olarak Dunn-Bonferroni testi kullanılmış, test sonuçları Tablo 5.37'de verilmiştir.

**Tablo 5.37:** EARP sonuçları için Dunn-Bonferroni ikili karşılaştırma sonuçları

| **DKA Çifti** | $\boldsymbol{Q}$ | $\boldsymbol{Q_{kritik}}$ | $\boldsymbol{H_0}$ |
|---|---|---|---|
| **V4-V3** | **3,7355** | **3,3609** | **Red** |
| **V4-V1** | **3,5808** | **3,3609** | **Red** |
| V4-V2 | 3,2661 | 3,3609 | Kabul |
| V6-V3 | 3,3566 | 3,3609 | Kabul |
| V10-V3 | 3,3437 | 3,3609 | Kabul |
| V11-V3 | 3,3257 | 3,3609 | Kabul |
| V12-V3 | 3,2512 | 3,3609 | Kabul |
| V5-V3 | 2,738 | 3,3609 | Kabul |
| V7-V3 | 0,9646 | 3,3609 | Kabul |
| V8-V3 | 0,9523 | 3,3609 | Kabul |
| V9-V3 | 0,5995 | 3,3609 | Kabul |
| V2-V3 | 0,4694 | 3,3609 | Kabul |
| V1-V3 | 0,1548 | 3,3609 | Kabul |

Dunn-Bonferroni testi sonuçlarına göre, B-DKA (V4 Sıralı) ile İ-DKA (V3 Döngüsel); B-DKA (V4 Sıralı) ile İ-DKA (V1 Sıralı) arasında anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Bu sonuçlar, DKA versiyonlarının performansının önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir. Ancak, en iyi DKA versiyonlarını belirlemek için sadece anlamlı farklılıklara bakmak yeterli değildir. Bunun yerine, ortalama sıralamaları incelemek ve en düşük ortalama sıralamaya sahip DKA versiyonunu belirlemek daha uygun olacaktır. Ortalama sıralamalar, DKA versiyonlarının tüm veri setleri üzerindeki performansını daha iyi yansıtmaktadır (Tablo 5.38).

**Tablo 5.38:** EARP sonuçları için Dunn-Bonferroni ortalama sıralamaları sonuçları

| DKA Versiyonu | *N* | Sıralamalar Toplamı | Ortalama Sıralama |
|---|---|---|---|
| İ-DKA (V1 Sıralı) | 34 | 5248,5 | 154,37 |
| İ-DKA (V2 Boru) | 34 | 5554,5 | 163,37 |
| **İ-DKA (V3 Döngüsel)** | **34** | **5098** | **149,94** |
| B-DKA (V4 Sıralı) | 34 | 8730,5 | 256,78 |
| G-DKA (V5 Boru) | 34 | 7760,5 | 228,25 |
| G-DKA (V6 Döngüsel) | 34 | 8362 | 245,94 |
| R-DKA (V7 Sıralı) | 34 | 6036 | 177,53 |
| R-DKA (V8 Boru) | 34 | 6024 | 177,18 |
| R-DKA (V9 Döngüsel) | 34 | 5681 | 167,09 |
| K-DKA (V10 Sıralı) | 34 | 8349,5 | 245,57 |
| K-DKA (V11 Boru) | 34 | 8332 | 245,06 |
| K-DKA (V12 Döngüsel) | 34 | 8259,5 | 242,93 |

Ortalama sıralamaları incelendiğinde, İ-DKA (V3 Döngüsel)'in en düşük ortalama sıralamaya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, İ-DKA (V3 Döngüsel)'in diğer DKA versiyonlarına göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle, veriler ve istatistiksel analizler ışığında, İ-DKA (V3 Döngüsel)'in EARP'nin çözümünde en etkili DKA versiyonu olduğu sonucuna varılabilir.

### 5.4.2 EARP-ZP için Sonuçların İstatistiksel Analizi

Bu bölümde, 100 müşteri 21 Şİ içeren büyük boyutlu 56 veri setinin EARP-ZP kapsamında 12 farklı DKA versiyonu ile çözümüne yönelik sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İstatistiksel analiz için öncelikle Friedman testi uygulanmıştır. Friedman test sonucunda $p = 7{,}00347\mathrm{E} - 34$ olarak bulunmuştur (Tablo 5.39). $p < \alpha$ olduğu için DKA versiyonları arasında anlamlı bir fark vardır.

**Tablo 5.39:** EARP-ZP sonuçları için Friedman testi ANOVA tablosu

| **Kaynak** | $SS$ | $df$ | $MS$ | $Chi-sq$ | $Prob>Chi-sq$ |
|---|---|---|---|---|---|
| DKA Versiyonları | 2377,03 | 11 | 216,093 | 185,64 | 7,00347E − 34 |
| Hata | 5510,47 | 605 | 9,108 | | |
| Toplam | 7887,5 | 671 | | | |

$SS$: Kareler toplamı, $df$: Serbestlik derecesi, $MS$: Kareler ortalaması, $Chi-sq$: Ki-Kare değeri, $Prob>Chi-sq$: Ki-Kare değerinden büyük olasılık ($p$).

Hangi DKA versiyonları arasında farklılık olduğunu belirlemek için post-hoc analiz olarak Dunn-Bonferroni testi kullanılmış, test sonuçları Tablo 5.40'da verilmiştir.

**Tablo 5.40:** EARP-ZP sonuçları için Dunn-Bonferroni ikili karşılaştırma sonuçları

| **DKA Çifti** | $Q$ | $Q_{kritik}$ | $H_0$ |
|---|---|---|---|
| V4-V2 | 2,6281 | 3,3609 | Kabul |
| V10-V2 | 0,9199 | 3,3609 | Kabul |
| V11-V2 | 0,9158 | 3,3609 | Kabul |
| V5-V2 | 0,871 | 3,3609 | Kabul |
| V1-V2 | 0,8236 | 3,3609 | Kabul |
| V12-V2 | 0,735 | 3,3609 | Kabul |
| V6-V2 | 0,6169 | 3,3609 | Kabul |
| V8-V2 | 0,5948 | 3,3609 | Kabul |
| V7-V2 | 0,5573 | 3,3609 | Kabul |
| V9-V2 | 0,2891 | 3,3609 | Kabul |
| V3-V2 | 0,2127 | 3,3609 | Kabul |

Dunn-Bonferroni testi sonuçlarına göre, tüm DKA çiftleri için ise $H_0$ kabul edilir olarak çıkmıştır bu da hiçbir karşılaştırma için anlamlı bir fark olmadığını gösterir. Bu durum, farklı DKA versiyonlarının performanslarının genel olarak farklı olmasına rağmen, belirli DKA çiftleri arasında anlamlı farklar olmayabileceğini düşündürmektedir.

Ancak, DKA çiftleri arasında anlamlı farklar olmasa da hangi DKA versiyonlarının diğerlerinden daha iyi performans gösterdiğini ortalama sıralamaları inceleyerek ve en düşük ortalama sıralamaya sahip DKA versiyonunu belirleyerek bir çıkarım yapmak yerinde olacaktır. Ortalama sıralamalar, DKA versiyonlarının tüm veri setleri üzerindeki performansını daha iyi yansıtmaktadır (Tablo 5.41).

**Tablo 5.41:** EARP-ZP sonuçları için Dunn-Bonferroni ortalama sıralamaları sonuçları

| DKA Versiyonu | $N$ | Sıralamalar Toplamı | Ortalama Sıralama |
|---|---|---|---|
| İ-DKA (V1 Sıralı) | 56 | 18967 | 338,7 |
| **İ-DKA (V2 Boru)** | **56** | **17275** | **308,48** |
| İ-DKA (V3 Döngüsel) | 56 | 17712 | 316,29 |
| B-DKA (V4 Sıralı) | 56 | 22674 | 404,9 |
| G-DKA (V5 Boru) | 56 | 19064 | 340,44 |
| G-DKA (V6 Döngüsel) | 56 | 18542 | 331,12 |
| R-DKA (V7 Sıralı) | 56 | 18420 | 328,93 |
| R-DKA (V8 Boru) | 56 | 18497 | 330,3 |
| R-DKA (V9 Döngüsel) | 56 | 17869 | 319,09 |
| K-DKA (V10 Sıralı) | 56 | 19165 | 342,23 |
| K-DKA (V11 Boru) | 56 | 19156 | 342,08 |
| K-DKA (V12 Döngüsel) | 56 | 18785 | 335,45 |

Ortalama sıralamaları incelendiğinde, İ-DKA (V2 Boru)'nun en düşük ortalama sıralamaya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, İ-DKA (V2 Boru)'nun diğer DKA versiyonlarına göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle, veriler ve istatistiksel analizler ışığında, İ-DKA (V2 Boru)'nun EARP-ZP'nin çözümünde en etkili DKA versiyonu olduğu sonucuna varılabilir.

### 5.4.3 EARP-EZTD için Sonuçların İstatistiksel Analizi

Bu bölümde, 100 müşteri 21 Şİ içeren büyük boyutlu 34 veri setinin EARP-EZTD kapsamında 12 farklı DKA versiyonu ile çözümüne yönelik sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İstatistiksel analiz için öncelikle Friedman testi uygulanmıştır. Friedman test sonucunda $p = 6{,}5191E-51$ olarak bulunmuştur (Tablo 5.42). $p < \alpha$ olduğu için DKA versiyonları arasında anlamlı bir fark vardır.

**Tablo 5.42:** EARP-EZTD sonuçları için Friedman testi ANOVA tablosu

| Kaynak | $SS$ | $df$ | $MS$ | $Chi-sq$ | $Prob > Chi-sq$ |
|---|---|---|---|---|---|
| DKA Versiyonları | 3434,12 | 11 | 312,193 | 267,32 | $6{,}5191E-51$ |
| Hata | 1370,38 | 363 | 3,775 | | |
| Toplam | 4804,5 | 407 | | | |

$SS$: Kareler toplamı, $df$: Serbestlik derecesi, $MS$: Kareler ortalaması, $Chi-sq$: Ki-Kare değeri, $Prob > Chi-sq$: Ki-Kare değerinden büyük olasılık ($p$).

Hangi DKA versiyonları arasında farklılık olduğunu belirlemek için post-hoc analiz olarak Dunn-Bonferroni testi kullanılmış, test sonuçları Tablo 5.43'te verilmiştir.

**Tablo 5.43:** EARP-EZTD sonuçları için Dunn-Bonferroni ikili karşılaştırma sonuçları

| DKA Çifti | $Q$ | $Q_{kritik}$ | $H_0$ |
|---|---|---|---|
| V11-V2 | 6,0382 | 3,3609 | Red |
| V11-V3 | 5,8223 | 3,3609 | Red |
| V11-V1 | 5,2597 | 3,3609 | Red |
| V11-V9 | 5,0103 | 3,3609 | Red |
| V11-V8 | 4,9908 | 3,3609 | Red |
| V11-V7 | 4,8823 | 3,3609 | Red |
| V11-V5 | 0,8952 | 3,3609 | Kabul |
| V10-V2 | 6,0115 | 3,3609 | Red |
| V10-V3 | 5,7955 | 3,3609 | Red |
| V10-V1 | 5,233 | 3,3609 | Red |
| V10-V9 | 4,9836 | 3,3609 | Red |
| V10-V8 | 4,9641 | 3,3609 | Red |
| V10-V7 | 4,8556 | 3,3609 | Red |
| V10-V5 | 0,8685 | 3,3609 | Kabul |
| V12-V2 | 5,9524 | 3,3609 | Red |
| V12-V3 | 5,7364 | 3,3609 | Red |
| V12-V1 | 5,1739 | 3,3609 | Red |
| V12-V9 | 4,9245 | 3,3609 | Red |
| V12-V8 | 4,9049 | 3,3609 | Red |
| V12-V7 | 4,7964 | 3,3609 | Red |
| V12-V5 | 0,8093 | 3,3609 | Kabul |
| V4-V2 | 5,7127 | 3,3609 | Red |
| V4-V3 | 5,4968 | 3,3609 | Red |
| V4-V1 | 4,9342 | 3,3609 | Red |
| V4-V9 | 4,6849 | 3,3609 | Red |
| V4-V8 | 4,6653 | 3,3609 | Red |
| V4-V7 | 4,5568 | 3,3609 | Red |
| V4-V5 | 0,5697 | 3,3609 | Kabul |
| V6-V2 | 5,4567 | 3,3609 | Red |
| V6-V3 | 5,2407 | 3,3609 | Red |
| V6-V1 | 4,6782 | 3,3609 | Red |
| V6-V9 | 4,4288 | 3,3609 | Red |
| V6-V8 | 4,4092 | 3,3609 | Red |
| V6-V7 | 4,3007 | 3,3609 | Red |
| V6-V5 | 0,3137 | 3,3609 | Kabul |
| V5-V2 | 5,143 | 3,3609 | Red |
| V5-V3 | 4,927 | 3,3609 | Red |
| V5-V1 | 4,3645 | 3,3609 | Red |
| V5-V9 | 4,1151 | 3,3609 | Red |
| V5-V8 | 4,0956 | 3,3609 | Red |
| V5-V7 | 3,9871 | 3,3609 | Red |
| V7-V2 | 1,1559 | 3,3609 | Kabul |
| V8-V2 | 1,0474 | 3,3609 | Kabul |
| V9-V2 | 1,0279 | 3,3609 | Kabul |
| V1-V2 | 0,7785 | 3,3609 | Kabul |

Dunn-Bonferroni testi sonuçlarına göre, çoğu DKA çiftleri arasında $H_0$ hipotezi reddedildiği için anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Bu sonuçlar, DKA versiyonlarının performansının önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir. Ancak,

en iyi DKA versiyonlarını belirlemek için sadece anlamlı farklılıklara bakmak yeterli değildir. Bunun yerine, ortalama sıralamaları incelemek ve en düşük ortalama sıralamaya sahip DKA versiyonunu belirlemek daha uygun olacaktır. Ortalama sıralamalar, DKA versiyonlarının tüm veri setleri üzerindeki performansını daha iyi yansıtmaktadır (Tablo 5.44).

**Tablo 5.44:** EARP-EZTD sonuçları için Dunn-Bonferroni ortalama sıralamaları sonuçları

| DKA Versiyonu | *N* | Sıralamalar Toplamı | Ortalama Sıralama |
|---|---|---|---|
| İ-DKA (V1 Sıralı) | 34 | 4587 | 134,91 |
| **İ-DKA (V2 Boru)** | **34** | **3830** | **112,65** |
| **İ-DKA (V3 Döngüsel)** | **34** | **4040** | **118,82** |
| B-DKA (V4 Sıralı) | 34 | 9385 | 276,03 |
| G-DKA (V5 Boru) | 34 | 8831 | 259,74 |
| G-DKA (V6 Döngüsel) | 34 | 9136 | 268,71 |
| R-DKA (V7 Sıralı) | 34 | 4954 | 145,71 |
| R-DKA (V8 Boru) | 34 | 4848,5 | 142,6 |
| R-DKA (V9 Döngüsel) | 34 | 4829,5 | 142,04 |
| K-DKA (V10 Sıralı) | 34 | 9675,5 | 284,57 |
| K-DKA (V11 Boru) | 34 | 9701,5 | 285,34 |
| K-DKA (V12 Döngüsel) | 34 | 9618 | 282,88 |

Ortalama sıralamaları incelendiğinde, İ-DKA (V2 Boru) ve İ-DKA (V3 Döngüsel)'in en düşük ortalama sıralamaya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum her iki versiyonun diğer DKA versiyonlarına göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle, veriler ve istatistiksel analizler ışığında, EARP-EZTD'nin çözümünde en etkili DKA versiyonunun İ-DKA (V2 Boru); en etkili ikinci DKA versiyonunun İ-DKA (V3 Döngüsel) olduğu sonucuna varılabilir.

### 5.4.4 EARP-ZP-EZTD için Sonuçların İstatistiksel Analizi

Bu bölümde, 100 müşteri 21 Şİ içeren büyük boyutlu 56 veri setinin EARP-ZP-EZTD kapsamında 12 farklı DKA versiyonu ile çözümüne yönelik sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İstatistiksel analiz için öncelikle Friedman testi uygulanmıştır. Friedman test sonucunda $p = 1{,}59197\mathrm{E} - 91$ olarak bulunmuştur (Tablo 5.45). $p < \alpha$ olduğu için DKA versiyonları arasında anlamlı bir fark vardır.

**Tablo 5.45:** EARP-ZP-EZTD sonuçları için Friedman testi ANOVA tablosu

| **Kaynak** | $SS$ | $df$ | $MS$ | $Chi-sq$ | $Prob > Chi-sq$ |
|---|---|---|---|---|---|
| DKA Versiyonları | 5961,29 | 11 | 541,935 | 459,19 | 1,59197E − 91 |
| Hata | 2035,71 | 605 | 3,365 | | |
| Toplam | 7997 | 671 | | | |

$SS$: Kareler toplamı, $df$: Serbestlik derecesi, $MS$: Kareler ortalaması, $Chi-sq$: Ki-Kare değeri, $Prob > Chi-sq$: Ki-Kare değerinden büyük olasılık ($p$).

Hangi DKA versiyonları arasında farklılık olduğunu belirlemek için post-hoc analiz olarak Dunn-Bonferroni testi kullanılmış, test sonuçları Tablo 5.46'da verilmiştir.

**Tablo 5.46:** EARP-ZP-EZTD sonuçları için Dunn-Bonferroni ikili karşılaştırma sonuçları

| **DKA Çifti** | $Q$ | $Q_{kritik}$ | $H_0$ |
|---|---|---|---|
| V1-V3 | 2,403 | 3,3609 | Kabul |
| V7-V3 | 2,1669 | 3,3609 | Kabul |
| V10-V3 | 2,0637 | 3,3609 | Kabul |
| V8-V3 | 2,0044 | 3,3609 | Kabul |
| V2-V3 | 1,5629 | 3,3609 | Kabul |
| V6-V3 | 1,5605 | 3,3609 | Kabul |
| V11-V3 | 1,5478 | 3,3609 | Kabul |
| V4-V3 | 0,9934 | 3,3609 | Kabul |
| V12-V3 | 0,4264 | 3,3609 | Kabul |
| V5-V3 | 0,3952 | 3,3609 | Kabul |
| V9-V3 | 0,2896 | 3,3609 | Kabul |

Dunn-Bonferroni testi sonuçlarına göre, tabloda verilen tüm DKA çiftleri için $H_0$ hipotezi kabul edilirken; $H_0$ hipotezinin reddedildiği herhangi bir DKA çifti bulunmamaktadır. Bu durum, farklı DKA versiyonlarının performanslarının genel olarak farklı olmasına rağmen, belirli DKA çiftleri arasında anlamlı farklar olmayabileceğini düşündürmektedir.

Ancak, DKA çiftleri arasında anlamlı farklar olmasa da hangi DKA versiyonlarının diğerlerinden daha iyi performans gösterdiğini ortalama sıralamaları inceleyerek ve en düşük ortalama sıralamaya sahip DKA versiyonunu belirleyerek bir çıkarım yapmak yerinde olacaktır. Ortalama sıralamalar, DKA versiyonlarının tüm veri setleri üzerindeki performansını daha iyi yansıtmaktadır (Tablo 5.47).

**Tablo 5.47:** EARP-ZP-EZTD sonuçları için Dunn-Bonferroni ortalama sıralamaları sonuçları

| DKA Versiyonu | *N* | Sıralamalar Toplamı | Ortalama Sıralama |
|---|---|---|---|
| İ-DKA (V1 Sıralı) | 56 | 21142 | 377,54 |
| İ-DKA (V2 Boru) | 56 | 19416 | 346,71 |
| **İ-DKA (V3 Döngüsel)** | **56** | **16205** | **289,38** |
| B-DKA (V4 Sıralı) | 56 | 18246 | 325,82 |
| G-DKA (V5 Boru) | 56 | 17017 | 303,88 |
| G-DKA (V6 Döngüsel) | 56 | 19411 | 346,62 |
| R-DKA (V7 Sıralı) | 56 | 20657 | 368,88 |
| R-DKA (V8 Boru) | 56 | 20323 | 362,91 |
| R-DKA (V9 Döngüsel) | 56 | 16800 | 300 |
| K-DKA (V10 Sıralı) | 56 | 20445 | 365,09 |
| K-DKA (V11 Boru) | 56 | 19385 | 346,16 |
| K-DKA (V12 Döngüsel) | 56 | 17081 | 305,02 |

Ortalama sıralamaları incelendiğinde, İ-DKA (V3 Döngüsel)'in en düşük ortalama sıralamaya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, İ-DKA (V3 Döngüsel)'in diğer DKA versiyonlarına göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle, veriler ve istatistiksel analizler ışığında, İ-DKA (V3 Döngüsel)'in EARP-ZP-EZTD'nin çözümünde en etkili DKA versiyonu olduğu sonucuna varılabilir.

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, temelde EARP olmak üzere, zaman penceresi, eş zamanlı toplama ve dağıtım kısıtlarının ayrı ayrı ve birlikte ele alındığı dört farklı probleme (EARP, EARP-ZP, EARP-EZTD, EARP-ZP-EZTD) odaklanılmıştır. Her bir problemin varsayım ve kısıtları özetlenmiş, matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel modellerin çözülmesi için literatürde daha önce kullanılan veri setlerinden yararlanılarak probleme özgü bazı düzenlemeler yapılarak veri setleri oluşturulmuştur. Matematiksel modeller, 5, 10 ve 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu veri setleri kullanılarak CPLEX ile çözülmüştür.

EARP matematiksel olarak Np-zor grubunda olduğu için 100 müşteriden oluşan veri setleri CPLEX ile çözülememiştir. Bu nedenle optimuma yakın çözümleri daha kısa sürede elde edebilmek için meta-sezgisel algoritmalardan olan DKA algoritması kullanılmıştır. DKA algoritmasının uygun bir başlangıç çözümünü iyileştirebilmesi için CW tasarruf sezgiseli zaman penceresi kısıtı bulunan ve bulunmayan modeller kapsamında ayrı ayrı tasarlanmış ve MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. İyi bir başlangıç çözümünden başlanmasının çözüm süresini kısalttığı gözlemlenmiştir.

DKA algoritmasının sarsma ve yerel arama adımlarında kullanılacak operatörler, problemlerin yapısına ve özelliklerine göre tasarlanmış ve performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca kullanılan veri setlerinin büyülüğünün de operatörlerin çözüm üzerindeki iyileştirme performansını etkilediği gözlemlenmiştir.

CW tasarruf sezgiseli ile elde edilen başlangıç çözümünü adım adım iyileştirmek için 5 farklı DKA türü, farklı KDA kuralları barındıracak şekilde 12 farklı versiyonda MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. 5, 10 ve 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu veri setlerinin hem CPLEX hem de DKA sonuçları karşılaştırılarak DKA'nın optimum çözüme CPLEX'ten daha kısa sürede ulaştığı gözlemlenmiştir.

100 müşteriden oluşan büyük boyutlu veri setleri ise eşit zaman sınırı konularak 12 farklı DKA versiyonu kapsamında çözülmüştür. Farklı DKA versiyonlarına ait çözüm sonuçları 4 problem (EARP, EARP-ZP, EARP-EZTD,

EARP-ZP-EZTD) için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. EARP ve EARP-EZTD için en etkili DKA versiyonunun İndirgenmiş DKA döngüsel komşuluk değiştirme adımı (V3) olduğu gözlemlenirken, EARP-ZP ve EARP-ZP-EZTD için İndirgenmiş DKA boru komşuluk değiştirme adımı (V2) olduğu gözlemlenmiştir. 4 problem kapsamında en başarısız versiyonlar ise Basit DKA sıralı komşuluk değiştirme adımı (V4) ile Kümelenmiş DKA'nın V10-V12 versiyonlarıdır.

Sonuç olarak, bu doktora tez çalışması, Elektrikli Araç Rotalama Problemi'ni (EARP) çözmeye yönelik olarak zaman penceresi (ZP) ve eş zamanlı topla-dağıt (EZTD) kısıtlarını dikkate alan yenilikçi ve etkili yöntemler sunmaktadır. Önerilen 5 farklı DKA algoritması türü ve 12 farklı DKA versiyonu, her bir problem için özgün operatörlerle birlikte, problemleri daha etkin ve başarılı bir şekilde çözmeyi amaçlamaktadır. Yapılan karşılaştırmalı deneyler, önerilen yöntemlerin ve operatörlerin mevcut yöntemlerle kıyaslandığında hangi durumlarda daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, Elektrikli Araç Rotalama Problemi'ne yönelik gelecekteki araştırmalar için güçlü bir temel sağlamakta ve alandaki bilgi birikimine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Ayrıca tez çalışması boyunca geleceğin teknolojisi olmaktan çıkıp hızla yaygınlaşan ve farklı alanlarda kullanılan EA'lar ile ilgili kapsamlı ve geniş bir bilimsel literatür analizi yapılmıştır. Yapılan analiz göstermiştir ki, EA'lar ile ilgili bilimsel yazın henüz yeterli sayıda ve nitelikte değildir. Bu nedenle daha fazla araştırmacı bu alana katkıda bulunabilir. Daha fazla araştırma için farklı konularda çalışma fırsatları mevcuttur. Örneğin, modellerde mobil Şİ'ler dikkate alınarak daha esnek çözümler bulunabilir. Farklı alanlarda kullanılan İYMA'ların neredeyse tümü EA'lara dönüştürülebilir veya EA'lar ile değiştirilebilir. Bu nedenle, diğer ARP varyantları EARP kapsamında ele alınabilir.

Gözlemlenen diğer bir konu da kesin çözüm yöntemleri üzerine araştırmaların az olduğu ve problemlerin optimal çözümüne yönelik yaklaşımları tasarlamak için daha fazla araştırmacıya ihtiyaç olduğudur. Geliştirilen sezgisel çözüm algoritmalarının büyük kapsamlı veri setlerinde hızlı bir şekilde çözüme ulaştığını söylemek mümkün değildir.

Literatürde kullanılan veri setlerinin sayısı ve çeşitliliği oldukça düşük olmakla birlikte, gerçek dünya verisi kullanan çalışma sayısı azdır. Bu nedenle gerçek hayat verileri kullanılarak, gerçekçi kısıtları dikkate alan çalışmalara ihtiyaç vardır. EA kullanımının yüksek olduğu ülkelerden daha fazla kullanıcı deneyimi verisi elde edilerek araştırmacıların yeni sorunlara çözüm önerileri getirmesi sağlanabilir.

EA'ların yaygınlaşmasından dolayı elektrik dağıtım şebekesi üzerindeki yükün artmasından doğacak potansiyel sorunlara yönelik önlemler ve çözüm yöntemleri üzerine modeller geliştirilebilir.

Son olarak, otonom EA, 5G, nesnelerin interneti, vb. gibi teknolojilerin gelişmesinden dolayı EA'ların rotalanmasıyla ilgili ek problemler ortaya çıkacağı için, yeni modeller ve algoritmalar önerilerek araştırılabilir.

# 7. KAYNAKLAR


Agárdi, A., Kovács, L. and Bányai, T., "Two - echelon vehicle routing problem with recharge stations", *Transport and Telecommunication Journal*, 4, 305-317, (2019).

Akbay, M. A., Kalayci, C. B., Blum, C. and Polat, O., "Variable neighborhood search for the two-echelon electric vehicle routing problem with time windows", *Applied Sciences (Switzerland)*, 3, (2022).

Altınel, İ. K. and Öncan, T., "A new enhancement of the clarke and wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem", *Journal of the Operational Research Society*, 8, 954-961, (2005).

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

Bac, U. and Erdem, M., "Optimization of electric vehicle recharge schedule and routing problem with time windows and partial recharge: A comparative study for an urban logistics fleet", *Sustainable Cities and Society*, (2021).

Barco, J., Guerra, A., Munoz, L. and Quijano, N., "Optimal routing and scheduling of charge for electric vehicles: A case study", *Mathematical Problems in Engineering*, (2017).

Basso, R., Kulcsar, B., Egardt, B., Lindroth, P. and Sanchez-Diaz, I., "Energy consumption estimation integrated into the electric vehicle routing problem", *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 141-167, (2019).

Basso, R., Kulcsár, B., Sanchez-Diaz, I. and Qu, X., "Dynamic stochastic electric vehicle routing with safe reinforcement learning", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, (2022).

Bektaş, T., Demir, E. and Laporte, G., "Green vehicle routing", (H. N. Psaraftis), *Green transportation logistics: The quest for win-win solutions*, Cham:Springer International Publishing, 243-265, (2016).

Bektaş, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N. and Puchinger, J., "The role of operational research in green freight transportation", *European Journal of Operational Research*, 3, 807-823, (2019).

Bektaş, T. and Laporte, G., "The pollution-routing problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, 8, 1232-1250, (2011).

Belgin, O., Karaoglan, I. and Altiparmak, F., "Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach", *Computers and Industrial Engineering*, 1-16, (2018).

Birrell, S. A., Wilson, D., Yang, C. P., Dhadyalla, G. and Jennings, P., "How driver behaviour and parking alignment affects inductive charging systems for electric vehicles", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 721-731, (2015).

Brecher, A. and Arthur, D., "Review and evaluation of wireless power transfer (wpt) for electric transit applications", (2014).

Breunig, U., Baldacci, R., Hartl, R. F. and Vidal, T., "The electric two-echelon vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, 198-210, (2019).

Brown, A., Cappellucci, J., White, E., Heinrich, A. and Cost, E., "Electric vehicle charging infrastructure trends from the alternative fueling station locator: Second quarter 2022 [online]", https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84263.pdf, (2022).

Bruglieri, M., Mancini, S., Pezzella, F., Pisacane, O. and Suraci, S., "A three-phase matheuristic for the time-effective electric vehicle routing problem with partial recharges", *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 95-102, (2017).

Bruglieri, M., Pezzella, F., Pisacane, O. and Suraci, S., "A variable neighborhood search branching for the electric vehicle routing problem with time windows", *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 221-228, (2015).

Cai, W., Zhang, Y., Huang, F. and Ma, C., "Delivery routing problem of pure electric vehicle with multi-objective pick-up and delivery integration", *PLoS ONE*, 2 February, (2023).

Cataldo-Díaz, C., Linfati, R. and Escobar, J. W., "Mathematical model for the electric vehicle routing problem considering the state of charge of the batteries", *Sustainability (Switzerland)*, 3, (2022).

Chan, C. C., "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles", *Proceedings of the IEEE*, 4, 704-718, (2007).

Clarke, G. and Wright, J. W., "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", *Operations Research*, 4, 568-581, (1964).

Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y. and Semet, F., "A guide to vehicle routing heuristics", *Journal of the Operational Research Society*, 5, 512-522, (2002).

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

De Cauwer, C., Verbeke, W., Coosemans, T., Faid, S. and Van Mierlo, J., "A data-driven method for energy consumption prediction and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions", *Energies*, 5, 608, (2017).

Demir, E., Bektaş, T. and Laporte, G., "A review of recent research on green road freight transportation", *European Journal of Operational Research*, 3, 775-793, (2014).

Desaulniers, G., Errico, F., Irnich, S. and Schneider, M., "Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows", *Operations Research*, 6, 1388-1405, (2016).

Duman, E. N., Tas, D. and Catay, B., "Branch-and-price-and-cut methods for the electric vehicle routing problem with time windows", *International Journal of Production Research*, 17, 5332-5353, (2022).

Dunn, O. J., "Multiple comparisons among means", *Journal of the American Statistical Association*, 293, 52-64, (1961).

EIA, U., "Monthly energy review", (2014).

Elahi, M. and Avakh Darestani, S., "Modeling a periodic electric vehicle–routing problem considering delivery due date and mixed charging rates using metaheuristic method", *Environmental Science and Pollution Research*, 46, 69691-69704, (2022).

Erdem, M. and Koç, Ç., "Home health care and dialysis routing with electric vehicles and private and public charging stations", *Transportation Letters*, (2022).

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

Farahani, M., Zegordi, S. H. and Kashan, A. H., “A tailored meta-heuristic for the autonomous electric vehicle routing problem considering the mixed fleet”, *IEEE Access*, 8207-8222, (2023).

Fateme Attar, S., Mohammadi, M., Reza Pasandideh, S. H. and Naderi, B., “Formulation and exact algorithms for electric vehicle production routing problem”, *Expert Systems with Applications*, (2022).

Felipe, Á., Ortuño, M. T., Righini, G., Tirado, G. J. T. R. P. E. L. and Review, T., “A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges”, 111-128, (2014).

Ferreira, J. C., Steiner, M. T. A. and Canciglieri, O., “Multi-objective optimization for the green vehicle routing problem: A systematic literature review and future directions”, *Cogent Engineering*, 1, (2020).

Friedman, M., “The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance”, *Journal of the American Statistical Association*, 200, 675-701, (1937).

Froger, A., Mendoza, J. E., Jabali, O. and Laporte, G., “Improved formulations and algorithmic components for the electric vehicle routing problem with nonlinear charging functions”, *Computers & Operations Research*, 256-294, (2019).

Futalef, J. P., Muñoz-Carpintero, D., Rozas, H. and Orchard, M. E., “An online decision-making strategy for routing of electric vehicle fleets”, *Information Sciences*, 715-737, (2023).

Ghobadi, A., Fallah, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Kazemipoor, H., “A fuzzy two-echelon model to optimize energy consumption in an urban logistics network with electric vehicles”, *Sustainability (Switzerland)*, 21, (2022).

Ghobadi, A., Tavakkoli Moghadam, R., Fallah, M. and Kazemipoor, H., “Multi-depot electric vehicle routing problem with fuzzy time windows and pickup/delivery constraints”, *Journal of applied research on industrial engineering*, 1, 1-18, (2021).

Goeke, D., “Granular tabu search for the pickup and delivery problem with time windows and electric vehicles”, *European Journal of Operational Research*, 3, 821-836, (2019).

Goeke, D. and Schneider, M., "Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles", *European Journal of Operational Research*, 1, 81-99, (2015).

Goli, A., Golmohammadi, A. M. and Verdegay, J. L., "Two-echelon electric vehicle routing problem with a developed moth-flame meta-heuristic algorithm", *Operations Management Research*, 3-4, 891-912, (2022).

Grandinetti, L., Guerriero, F., Pezzella, F. and Pisacane, O., "A pick-up and delivery problem with time windows by electric vehicles", *International Journal of Productivity and Quality Management*, 2/3, 403-423, (2016).

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

Hien, V. Q., Dao, T. C. and Binh, H. T. T., "A greedy search based evolutionary algorithm for electric vehicle routing problem", *Applied Intelligence*, 3, 2908-2922, (2023).

Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S. and Hartl, R. F., "The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations", *European Journal of Operational Research*, 3, 995-1018, (2016).

Hof, J., Schneider, M. and Goeke, D., "Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an avns algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops", *Transportation Research Part B: Methodological*, 102-112, (2017a).

Hof, J., Schneider, M. and Goeke, D., "Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an avns algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops", *Transportation Research Part B-Methodological*, 102-112, (2017b).

Iacobucci, R., McLellan, B. and Tezuka, T., "Optimization of shared autonomous electric vehicles operations with charge scheduling and vehicle-to-grid", *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 34-52, (2019).

Inbar, M., "Battery swapping is the "worst case scenario." [online]", https://cleantechnica.com/2015/01/08/battery-swapping-can-now-scaled/, (2015).

International Energy Agency, I., "Global ev outlook 2021 [online]", (03.08.2023), https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021, (2021a).

International Energy Agency, I., “Japan 2021 [online]”, https://www.iea.org/reports/japan-2021, (2021b).

International Energy Agency, I., “World energy outlook 2022 [online]”, (03.08.2023), https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022, (2022).

Iwańkowicz, R., “Effective permutation encoding for evolutionary optimization of the electric vehicle routing problem”, *Energies*, 20, (2021).

Jia, Y. H., Mei, Y. and Zhang, M., “A bilevel ant colony optimization algorithm for capacitated electric vehicle routing problem”, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 10, 10855-10868, (2022).

Jie, W., Yang, J., Zhang, M. and Huang, Y., “The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology”, *European Journal of Operational Research*, 3, 879-904, (2019a).

Jie, W. C., Yang, J., Zhang, M. and Huang, Y. X., “The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology”, *European Journal of Operational Research*, 3, 879-904, (2019b).

Jung, J., Jayakrishnan, R. and Choi, K., “Dually sustainable urban mobility option: Shared-taxi operations with electric vehicles”, *International Journal of Sustainable Transportation*, 8, 567-581, (2017).

Kancharla, S. R. and Ramadurai, G., “Electric vehicle routing problem with non-linear charging and load-dependent discharging”, *Expert Systems with Applications*, (2020).

Karakatič, S., “Optimizing nonlinear charging times of electric vehicle routing with genetic algorithm”, *Expert Systems with Applications*, (2021).

Keskin, M. and Catay, B., “Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows”, *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 111-127, (2016).

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

Keskin, M., Catay, B. and 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*, (2021).

Keskin, M. and Çatay, B., "Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 111-127, (2016).

Keskin, M., Laporte, G. and Catay, B., "Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations", *Computers & Operations Research*, 77-94, (2019).

Kim, J., Park, H. and Jeong, B., "Robust optimization model for the electric vehicle routing problem under battery energy consumption uncertainty with arc segmentation", *International Journal of Sustainable Transportation*, (2022).

Kim, Y. J. and Chung, B. D., "Energy consumption optimization for the electric vehicle routing problem with state-of-charge-dependent discharging rates", *Journal of Cleaner Production*, (2023).

Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O. and Laporte, G., "The fleet size and mix pollution-routing problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, 239-254, (2014).

Koç, Ç., Jabali, O., Mendoza, J. E. and Laporte, G., "The electric vehicle routing problem with shared charging stations", *International Transactions in Operational Research*, 4, 1211-1243, (2019).

Kuo, Y., "Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem", *Computers & Industrial Engineering*, 1, 157-165, (2010).

Laporte, G. and Semet, F., "5. Classical heuristics for the capacitated vrp", *The vehicle routing problem*, 109-128, (2002).

Lee, C., "An exact algorithm for the electric-vehicle routing problem with nonlinear charging time", *Journal of the Operational Research Society*, 7, 1461-1485, (2020).

Li, C., Zhu, Y. and Lee, K. Y., "Route optimization of electric vehicles based on re-insertion genetic algorithm", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1-1, (2023).

Li, J., Du, Z., Ruther, R. E., An, S. J., David, L. A., Hays, K., Wood, M., Phillip, N. D., Sheng, Y. and Mao, C., "Toward low-cost, high-energy density, and high-power density lithium-ion batteries", *Jom*, 1484-1496, (2017).

Li, J., Liu, Z. and Wang, X., "Public charging station localization and route planning of electric vehicles considering the operational strategy: A bi-level optimizing approach", *Sustainable Cities and Society*, (2022).

Li-Ying, W. and Yuan-Bin, S., "Multiple charging station location-routing problem with time window of electric vehicle", *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 5, 190-201, (2015).

Lijun, F., Changshi, L. and Zhang, W., "Half-open time-dependent multi-depot electric vehicle routing problem considering battery recharging and swapping", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 1, 129-146, (2023).

Lin, B., Ghaddar, B. and Nathwani, J., "Electric vehicle routing with charging/discharging under time-variant electricity prices", *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, (2021).

Lin, B., Ghaddar, B. and Nathwani, J., "Deep reinforcement learning for the electric vehicle routing problem with time windows", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8, 11528-11538, (2022).

Lin, C. H., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H. and Lam, H. Y., "Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends", *Expert Systems with Applications*, 4, 1118-1138, (2014).

Lin, J., Zhou, W. and Wolfson, O., "Electric vehicle routing problem", *Ninth International Conference on City Logistics*, 508-521, (2016a).

Lin, J., Zhou, W. and Wolfson, O., "Electric vehicle routing problem", *Transportation Research Procedia*, 508-521, (2016b).

Lin, S., "Computer solutions of the traveling salesman problem", *Bell System Technical Journal*, 10, 2245-2269, (1965).

Liu, Q., Xu, P., Wu, Y. and Shen, T., "A hybrid genetic algorithm for the electric vehicle routing problem with time windows", *Control Theory and Technology*, 2, 279-286, (2022).

Löffler, M., Desaulniers, G., Irnich, S. and Schneider, M., "Routing electric vehicles with a single recharge per route", *Networks,* 2, 187-205, (2020).

Lu, J., Chen, Y. N., Hao, J. K. and He, R. J., "The time-dependent electric vehicle routing problem: Model and solution", *Expert Systems with Applications,* (2020).

Machura, P. and Li, Q., "A critical review on wireless charging for electric vehicles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 209-234, (2019).

Marmaras, C., Xydas, E. and Cipcigan, L., "Simulation of electric vehicle driver behaviour in road transport and electric power networks", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 239-256, (2017).

Meng, M. and Ma, Y., "Route optimization of electric vehicle considering soft time windows and two ways of power replenishment", *Advances in Operations Research,* (2020).

Messaoud, E., "Solving a stochastic programming with recourse model for the stochastic electric capacitated vehicle routing problem using a hybrid genetic algorithm", *European Journal of Industrial Engineering,* 1, 71-90, (2022).

Moghdani, R., Salimifard, K., Demir, E. and Benyettou, A., "The green vehicle routing problem: A systematic literature review", *Journal of Cleaner Production,* (2021).

Montoya, A., Gueret, C., Mendoza, J. E. and Villegas, J. G., "The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function", *Transportation Research Part B-Methodological,* 87-110, (2017a).

Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E. and Villegas, J. G., "The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function", *Transportation Research Part B: Methodological,* 87-110, (2017b).

Musk, E. and Straubel, J. B., "Model s efficiency and range [online]", https://www.tesla.com/blog/model-s-efficiency-and-range, (2012).

Or, I., "Traveling salesman-type combinatorial problems and their relation to the logistics of regional blood banking", (1976).

Pan, J. S., Zhuang, J., Liao, L. and Chu, S. C., "Advanced equilibrium optimizer for electric vehicle routing problem with time windows", *Journal of Network Intelligence,* 2, 216-237, (2021).

Park, H. and Jin, S., “Electric vehicle routing problem with heterogeneous vehicles and partial charge”, *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 4, 215-225, (2020).

Paz, J. C., Granada-Echeverri, M. and Escobar, J. W., “The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 1, 123-136, (2018a).

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

Pelletier, S., Jabali, O., Laporte, G. and Veneroni, M. J. T. R. P. B. M., “Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models”, 158-187, (2017).

Plotkin, S., Santini, D., Vyas, A., Anderson, J., Wang, M., Bharathan, D. and He, J., “Hybrid electric vehicle technology assessment : Methodology, analytical issues, and interim results [online]”, https://www.osti.gov/biblio/807353

https://www.osti.gov/servlets/purl/807353, (2002).

Polat, O., Kalayci, C. B., Kulak, O. and Günther, H.-O., “A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery with time limit”, *European Journal of Operational Research*, 2, 369-382, (2015).

Raeesi, R. and Zografos, K. G., “The multi-objective steiner pollution-routing problem on congested urban road networks”, *Transportation Research Part B: Methodological*, 457-485, (2019).

Raeesi, R. and Zografos, K. G., “The electric vehicle routing problem with time windows and synchronised mobile battery swapping”, *Transportation Research Part B-Methodological*, 101-129, (2020).

Rastani, S. and Çatay, B., “A large neighborhood search-based matheuristic for the load-dependent electric vehicle routing problem with time windows”, *Annals of Operations Research*, (2021).

Rauwald, C. and Sachgau, O., “Vw says the next generation of combustion cars will be its last [online]”, https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-12-04/vw-says-the-next-generation-of-combustion-cars-will-be-its-last, (2018).

Revesz, R. L., Howard, P. H., Arrow, K., Goulder, L. H., Kopp, R. E., Livermore, M. A., Oppenheimer, M. and Sterner, T., "Improve economic models of climate change", *Nature*, 7495, 173-175, (2014).

Rezgui, D., Siala, J. C., Aggoune-Mtalaa, W. and 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*, 537-550, (2019).

Salhi, S. and Nagy, G., "A cluster insertion heuristic for single and multiple depot vehicle routing problems with backhauling", *Journal of the Operational Research Society*, 10, 1034-1042, (1999).

Sánchez, D. G., Tabares, A., Faria, L. T., Rivera, J. C. and Franco, J. F., "A clustering approach for the optimal siting of recharging stations in the electric vehicle routing problem with time windows", *Energies*, 7, (2022).

Schiffer, M. and Walther, G., "The electric location routing problem with time windows and partial recharging", *European Journal of Operational Research*, 3, 995-1013, (2017).

Schneider, M., Stenger, A. and Goeke, D., "The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations", *Transportation Science*, 4, 500-520, (2014).

Schneider, M., Stenger, A. and Hof, J., "An adaptive vns algorithm for vehicle routing problems with intermediate stops", *Or Spectrum*, 2, 353-387, (2015).

Shao, S., Guan, W. and Bi, J., "Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption", *Iet Intelligent Transport Systems*, 3, 202-212, (2018).

Shao, S., Guan, W., Ran, B., He, Z. B. and Bi, J., "Electric vehicle routing problem with charging time and variable travel time", *Mathematical Problems in Engineering*, (2017).

Solomon, M. M., "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints", *Operations Research*, 2, 254-265, (1987).

Soysal, M., Cimen, M. and Belbag, S., "Pickup and delivery with electric vehicles under stochastic battery depletion", *Computers & Industrial Engineering*, (2020).

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, "Türkiye için elektrikli araç şarj altyapısı [online]", (03.08.2023), https://sarjdestek.sanayi.gov.tr/turkiye-icin-elektrikli-arac-sarj-altyapisi, (2022).

Tahami, H., Rabadi, G. and Haouari, M., "Exact approaches for routing capacitated electric vehicles", *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, (2020).

Taş, D., "Electric vehicle routing with flexible time windows: A column generation solution approach", *Transportation Letters*, 2, 97-103, (2020).

TUIK, "Motorlu kara taşıtları, aralık 2022 [online]", https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2022-49436, (2023).

Upadhyay, O., "Why battery swapping is not good for electric vehicle [online]", https://www.linkedin.com/pulse/why-battery-swapping-good-electrical-vehicle-omprakash-upadhyay, (2017).

Urazel, B. and Keskin, K., "A hybrid solution approach for electric vehicle routing problem with soft time-windows", *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2, 994-1006, (2021).

Vaz Penna, P. H., Afsar, H. M., Prins, C. and Prodhon, C., "A hybrid iterative local search algorithm for the electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations", *IFAC-PapersOnLine*, 12, 955-960, (2016).

Wang, D. and Zhou, H., "A two-echelon electric vehicle routing problem with time windows and battery swapping stations", *Applied Sciences (Switzerland)*, 22, (2021).

Wang, L., Gao, S., Wang, K., Li, T., Li, L. and Chen, Z. Y., "Time-dependent electric vehicle routing problem with time windows and path flexibility", *Journal of Advanced Transportation*, 1DUMMMY, (2020).

Wang, W. and Zhao, J., "Partial linear recharging strategy for the electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations", *European Journal of Operational Research*, 2, 929-948, (2023).

Wang, Y., Zhou, J., Sun, Y., Fan, J., Wang, Z. and Wang, H., "Collaborative multidepot electric vehicle routing problem with time windows and shared charging stations", *Expert Systems with Applications*, (2023).

Wang, Y., Zhou, J., Sun, Y., Wang, X., Zhe, J. and Wang, H., "Electric vehicle charging station location-routing problem with time windows and resource sharing", *Sustainability (Switzerland)*, 18, (2022).

World Health Organization, W., "Ambient (outdoor) air pollution [online]", (03.08.2023), https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health, (2022).

Wu, Z. and Zhang, J., "A branch-and-price algorithm for two-echelon electric vehicle routing problem", *Complex and Intelligent Systems*, (2021).

Xiao, J., Du, J., Cao, Z., Zhang, X. and Niu, Y., "A diversity-enhanced memetic algorithm for solving electric vehicle routing problems with time windows and mixed backhauls", *Applied Soft Computing*, (2023).

Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. and Xu, Y., "Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, 7, 1419-1431, (2012).

Xu, P., Liu, Q. and Wu, Y., "Energy saving-oriented multi-depot vehicle routing problem with time windows in disaster relief", *Energies*, 4, (2023).

Xu, W., Zhang, C., Cheng, M. and Huang, Y., "Electric vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical modeling and adaptive large neighborhood search heuristic method", *Energies*, 23, (2022).

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

Yang, S. Y., Ning, L. J., Tong, L. and Shang, P., "Integrated electric logistics vehicle recharging station location-routing problem with mixed backhauls and recharging strategies", *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, (2022).

Yang, Y., Yao, E., Yang, Z. and Zhang, R., "Modeling the charging and route choice behavior of bev drivers", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 190-204, (2016).

Yao, C., Chen, S. and Yang, Z., “Joint routing and charging problem of multiple electric vehicles: A fast optimization algorithm”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7, 8184-8193, (2022).

Yilmaz, M. and Krein, P. T., “Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles”, *IEEE transactions on Power Electronics*, 5, 2151-2169, (2012).

Yilmaz, Y. and Kalayci, C. B., “Variable neighborhood search algorithms to solve the electric vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery”, *Mathematics*, 17, (2022).

Yu, V. F., Jodiawan, P. and 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*, (2021).

Zang, Y., Wang, M. and Qi, M., “A column generation tailored to electric vehicle routing problem with nonlinear battery depreciation”, *Computers and Operations Research*, (2022).

Zeng, W., Miwa, T. and Morikawa, T., “Prediction of vehicle co2 emission and its application to eco-routing navigation”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 194-214, (2016).

Zhang, R. Y., Guo, J. M. and Wang, J. W., “A time-dependent electric vehicle routing problem with congestion tolls”, *Ieee Transactions on Engineering Management*, 4, 861-873, (2022).

Zhang, S., Chen, M. Z. and Zhang, W. Y., “A novel location-routing problem in electric vehicle transportation with stochastic demands”, *Journal of Cleaner Production*, 567-581, (2019).

Zhang, S., Chen, M. Z., Zhang, W. Y. and Zhuang, X. Y., “Fuzzy optimization model for electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations”, *Expert Systems with Applications*, (2020).

Zhang, S., Gajpal, Y., Appadoo, S. S. and Abdulkader, M. M. S., “Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption”, *International Journal of Production Economics*, 404-413, (2018).

Zhao, M. T. and Lu, Y. W., “A heuristic approach for a real-world electric vehicle routing problem”, *Algorithms*, 2, (2019).

Zhao, Z. X., Li, X. M. and Zhou, X. C., “Distribution route optimization for electric vehicles in urban cold chain logistics for fresh products under time-varying traffic conditions”, *Mathematical Problems in Engineering*, (2020).

Zhou, Y., Huang, J., Shi, J., Wang, R. and Huang, K., “The electric vehicle routing problem with partial recharge and vehicle recycling”, *Complex and Intelligent Systems*, 3, 1445-1458, (2021).

Zhu, Y. F., Lee, K. Y. and Wang, Y. H., “Adaptive elitist genetic algorithm with improved neighbor routing initialization for electric vehicle routing problems”, *Ieee Access*, 16661-16671, (2021).

Zuo, X. R., Xiao, Y. Y., You, M., Kaku, I. and Xu, Y. C., “A new formulation of the electric vehicle routing problem with time windows considering concave nonlinear charging function”, *Journal of Cleaner Production*, (2019).