

Heterojen Filoya Sahip Elektrikli Araçların Rota Optimizasyonu

İlker Küçükoglu^{1*}, Nursel Öztürk²

¹Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 0 224 294 20 91,
ikuckoglu@uludag.edu.tr

²Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 0 224 294 20 83,
nursel@uludag.edu.tr

*İletişimden sorumlu yazar / Corresponding author

Geliş / Received: 29 Mayıs (May) 2016

Kabul / Accepted: 4 Ekim (October) 2016

DOI: 10.18466/cbayarfbe.280724

Özet

Son yıllarda fosil yakıtlı motor teknolojisine alternatif olan elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmalar, bu teknolojinin taşımalardan kaynaklı olan maliyet ve çevreye olan etkilerin azaltılması açısından umut verici bir fırsat olması nedeniyle artmaktadır. Ancak elektrikli araçlara ait düşük seyir menzili ve uzun şarj süreleri bu teknolojinin yaygın olarak kullanılmasını engellemektedir. Özellikle uzun mesafeler için elektrikli araçların gidebileceği şarj istasyonları ve araçların şarj süreleri ticari taşımalar açısından önemli bir durum haline gelmektedir. Bu çalışmada, elektrikli araçların lojistik operasyonlarında etkin kullanımını elde etmek amacıyla şarj istasyonlarını da kapsayan elektrikli araç rotalama problemi için karma tamsayı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde, klasik araç rotalama problemlerinde dikkate alınan araç yük kapasitesi ve zaman penceresi kısıtlarına ek olarak elektrikli araçların şarj kapasiteleri ve şarj istasyonlarında geçen şarj dolum süreleri matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bu model ayrıca uygun araç seçimi ile daha etkin rota planlaması sağlayan ve farklı elektrikli araçlardan oluşan heterojen filoyu da dikkate almaktadır. Önerilen model bir örnek problem seti üzerinde test edilmiş ve heterojen filo stratejisinin avantajlarını ortaya koymak için homojen filo ile elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar heterojen filonun toplam dolaşım mesafelerinde ve operasyonlar için kullanılan araç sayılarında kayda değer azalış sağladığını göstermiştir. Ayrıca, bazı problemler için homojen filo ile çözüm elde edilemezken, heterojen filo ile uygun bir çözüm elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler — Araç rotalama, elektrikli araçlar, heterojen filo, matematiksel modelleme, şarj istasyonları

Route Optimization of the Electric Vehicles with Heterogeneous Fleet

Abstract

In recent years, the researches on electric vehicles, which is an alternative to fossil-fuel based engine technology, have been increasing because of its promising opportunity for reducing cost and pollution effects caused by transportation. However, their limited cruising range and long recharging time hinder the widespread usage of this technology. Especially for the long distances, the charging stations and charging times of the electric vehicles are critical issue for commercial transportation. In this study a mixed integer mathematical model is developed for the electric vehicle routing problem with recharging stations in order to achieve an effective utilization of the electric vehicles in logistics operations. In addition to the vehicle loading capacity and time windows constraints considered in the traditional vehicle routing problems, the charge capacity and the charging times of the electric vehicles in stations are mathematically identified in the proposed model. This model also considers the heterogeneous fleet consist of different type electric vehicles which can provides more effective route plans by selecting

appropriate vehicles for the routes. The proposed model is tested on a benchmark problem set and the advantages of the heterogeneous fleet strategy is exposed by comparing the results obtained by homogeneous fleet. Numerical results show that, heterogeneous fleet provides considerable saving on total travelling distance and decrease on total number of vehicles used for the operations. Moreover, a feasible solution is found for some problems with a heterogeneous fleet, while the homogeneous fleet could not reach a feasible solution for these problems.

Keywords – Vehicle routing, electric vehicles, heterogeneous fleet, mathematical modelling, charging stations

1 Giriş

Günümüzde çevreye olan olumsuz etkisi nedeniyle, sera gazı emisyonlarının azaltılması konusunda gelişmiş olan ülkeler ve sivil toplum örgütleri tarafından önemli tedbirler alınmaktadır. Bu nedenle CO_2 emisyon miktarı açısından büyük bir paya sahip olan taşımacılık sistemi çevresel etkenler için önemli bir faktör haline gelmektedir. Artan rekabet ortamında işletmelere ait lojistik stratejilerinin uzun vadede sürdürülebilir olması için oluşturulacak planların çevreye olan etkisinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu yaklaşımlardan biri olan yeşil lojistik stratejisi ile daha az CO_2 emisyonu sağlayan alternatif yakıtlı araç teknolojilerinin kullanımı ön plana çıkmaktadır [1].

Son yıllarda gelişen teknoloji ile fosil yakıtları kullanan araçlara alternatif olarak ortaya çıkmış elektrikli araçlar, çevreye dost bir ulaşım aracı olarak kullanılmaktadır. Ekonomik ve çevreye verdiği daha az zarar açısından popüler olan elektrikli araçların fosil yakıtlı araçlara göre düşük menzili, sınırlı sayıda şarj dolmuş istasyonu ve uzun şarj süresi gibi önemli kısıtları bulunmaktadır [2, 3]. Bu nedenle üretim veya hizmet sistemlerinde kullanılacak bu tür araçların rota planlarının oluşturulmasında önemli bir faktör olan bu kısıtların göz önüne alınması gerekmektedir.

Yeşil lojistik kapsamında CO_2 emisyonlarını azaltmak amacıyla literatürde araç rotalama problemine ilişkin birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğunluğu fosil yakıtlı araçları dikkate alırken bir kısmı elektrikli veya hibrit araçları dikkate almaktadır. Bu yaklaşımlar arasında sadece elektrikli araçları ve şarj durumlarını dikkate alan elektrikli araç rotalama problemine (EARP) ait ilk çalışma Conrad ve Figliozzi [4] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yazarlar yaptıkları çalışmada elektrikli araçların müşteri noktalarında tam dolu veya kısmi dolu olarak şarj edilebildiğini

varsayımlardır. Tek tip araçların kullanıldığı problemde araçlara ait şarj dolmuş süresi ise sabit bir katsayı olarak alınmıştır. Problemde dikkate aldıkları amaç fonksiyonu, dağıtım işlemleri için kullanılacak araç sayısını ve toplam mesafeyi minimize etmektir. Wang ve Cheu [5] benzer bir problemi taksilerin rota planlaması için çalışmış ve problemin çözümü için tabu arama algoritmasını kullanmışlardır. Worley ve ark. [6] elektrik şarj istasyonlarına ait lokasyonların belirlenmesi ve rotalama problemini bütünlük olarak dikkate almışlardır. Problemde, elektrikli araçların rotalarına ait bir yolun uzunluğu aracın menzilinden fazla ise bu yola ancak bir şarj istasyonuna gidilerek devam etmesine izin verilmektedir. Neaimh ve ark. [7] elektrikli araçların daha uzun menzillerde dolaşımını sağlamak amacıyla yol ve trafik durumunu dikkate alan bir rota hesaplama yaklaşımı geliştirmişlerdir. Felipe ve ark. [8] EARP'yi şarj istasyonları ve bu istasyonlarda araçların kısmi şarj dolmuş işlemleri ile incelemişlerdir. Problemde klasik araç rotalama probleminden farklı olarak dağıtım işlemleri için elektrikli araçların kullanıldığı ve bu araçların çeşitli şarj istasyonu noktalarında tam dolu veya kısmi dolu olarak şarj edilebildiği varsayılmıştır. Menzilleri kısa olan elektrikli araçlar için bir rotada birden fazla şarj istasyonuna uğrayarak şarj işlemi gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Yazarlar, dikkate aldıkları problemin çözümü için bir tavlama benzetimi algoritması geliştirmişlerdir. Bu problemi Schneider ve ark. [9] müşterilere ait zaman kısıtlarını da dikkate alarak genişletmişlerdir. Fakat şarj istasyonlarında araçların tam dolu olarak şarj edildiği varsayılmıştır. Müşteri noktalarına ait zaman penceresinin bulunduğu problemde araçların gideceği şarj istasyonlarının belirlenmesi önemli bir durum haline gelmektedir. Problemin çözümü için hibrit bir algoritma geliştirilmiştir. Araçların şarj istasyonlarında şarj edilebildiği ve müşterilere ait zaman kısıtının bulunduğu bu problem tipi son

yıllarda birçok çalışmada incelenmiş ve problemin çözümü için farklı çözüm yöntemleri önerilmiştir [10-17].

Yapılan literatür araştırmasında, elektrikli araç rotalama probleminde farklı teknik özelliklere sahip heterojen filo yaklaşımı ve araç seçim stratejisini dikkate alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, Schneider ve ark. [9] tarafından belirtilmiş olan problem temel alınarak farklı teknik özelliklere sahip araçların uygun seçimi ile taşıma maliyetlerini azaltacak heterojen filoya sahip elektrikli araç rotalama problemi (HF-EARP) incelenmiş ve problemin çözümü için karma tamsayı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Çalışmanın geri kalan kısımları; problem tanımı, geliştirilen matematiksel model, sayısal uygulamalar ve sonuç bölümlerinden oluşmaktadır.

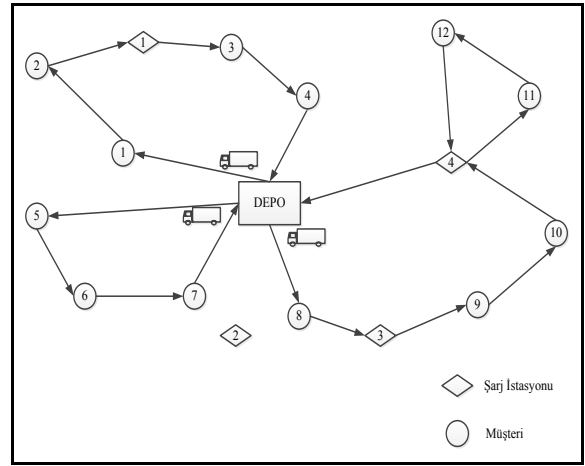
2 Problem Tanımı

Yapılan çalışmada, Schneider ve ark. [9] tarafından dikkate alınan EARP, farklı teknik özelliklere sahip elektrikli araçların kullanıldığı heterojen filo varsayımı ile incelenmiştir. EARP'de amaç, farklı lokasyonlarda bulunan N adet müşteriye servis verecek en az araç sayısına ve minimum uzunluğa sahip rotaların hesaplanmasıdır. Klasik ARP'de rota hesaplamalarında araçların yakıt kapasiteleri dikkate alınmazken, EARP'de elektrikli araçlara ait şarj kapasiteleri bir kısıt olarak dikkate alınmaktadır. Araç yakıt tüketimlerine ait literatürde birçok yaklaşım bulunmasına rağmen, hesaplama zorluğundan dolayı genel olarak aracın gittiği mesafeyle çarpılan bir tüketim katsayısı kullanılmaktadır [18]. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan HF-EARP'de farklı teknik özelliklere sahip araçlar depo noktasından ayrılarak müşterilere belirli zaman dilimi içerisinde servis verirler ve tekrar depo noktasına geri dönerek rotalarını tamamlarlar. Araçların dolaşımı esnasında elektrik şarj istasyonlarına uğramasına ve bu istasyonlardan tam dolu şarj ile rotasına devam etmesine izin verilmektedir. Bu sayede, elektrik şarjı tükenmek üzere olan bir aracın depoya dönmesinden dolayı oluşacak fazla maliyet önlenebilmektedir. HF-EARP'ye ait örnek bir gösterim Şekil 1'de yer almaktadır. Yapılan çalışmada HF-EARP için dikkate alınan varsayımlar;

- Her müşteri noktasına sadece bir araç ve en fazla bir defa servis verebilir,
- Araçlar, müşterilere ait zaman penceresine göre

servis işlemine başlayabilir,

- Bir araç birden fazla şarj istasyonuna uğrayabilir ve rotasına tam dolu şarj ile devam edebilir,
- Bir şarj istasyonuna birden fazla araç uğrayabilir,
- Araçlara ait elektrik tüketim miktarları, araçların gittiği mesafe ile orantılıdır ve şarj tüketim katsayısı ile belirlenmektedir,
- Araçların şarj istasyonlarında geçirdikleri süre, istasyona geldiklerindeki şarj oranına ve şarj olma süresine ait katsayı ile belirlenmektedir,
- Her araç farklı ağırlık kapasitesi, şarj kapasitesi, şarj tüketim katsayısı ve şarj olma süresi katsayısına sahip olabilir,
- Problemden amaç, belirli sayıda araca sahip filo için en az toplam mesafeyle müşterilere servis yapacak araç rotalarının hesaplanmasıdır.



Şekil 1. Heterojen filolu elektrikli araç rotalama probleminin bir örneği

3 Matematiksel Model

Yapılan kaynak araştırmasında elektrikli araç rotalama problemleri için birçok matematiksel modelin geliştirildiği görülmüştür. Bu modeller, dikkate aldıkları amaç fonksiyonlarına veya problem kısıtlarına göre farklılık göstermektedir. Yapılan bu çalışmada, Schneider ve ark. [9] tarafından homojen filoya sahip EARP için oluşturulmuş olan karma tamsayı matematiksel model temel alınmış ve bu model, birbirinden farklı teknik özelliklere sahip heterojen filo için geliştirilmiştir. HF-EARP için geliştirilmiş olan karma tamsayı matematiksel model aşağıda detaylı bir şekilde tanımlanmıştır.

Notasyonlar

$0, N + 1$: Depoyu temsil eden noktalar

F : Şarj istasyonlarına ait noktalar kümesi

F' : F kümesinden elde edilmiş kukla şarj istasyonlarına ait noktalar kümesi

V : Müşteri noktaları kümesi; $V = \{1,2, \dots, N\}$

V_0 : Müşteri ve depo noktaları kümesi; $V_0 = V \cup \{0\}$

V_{N+1} : Müşteri ve depo noktaları kümesi; $V_{N+1} = V \cup \{N+1\}$

V' : Müşteri ve şarj istasyonu noktalar kümesi; $V' = V \cup F'$

V'_0 : Müşteri, şarj istasyonu ve depo noktaları kümesi; $V'_0 = V' \cup \{0\}$

V'_{N+1} : Müşteri, şarj istasyonu ve depo noktaları kümesi; $V'_{N+1} = V' \cup \{N+1\}$

$V'_{0,N+1}$: Müşteri, şarj istasyonu ve depo noktaları kümesi; $V'_{0,N+1} = V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}$

K : Araç kümesi

d_{ij} : i noktasından j noktasına olan uzaklık; $\forall i, j \in V'_{0,N+1}$

t_{ij} : i noktasından j noktasına olan gidiş süresi; $\forall i, j \in V'_{0,N+1}$

C_k : k aracının yük kapasitesi; $\forall k \in K$

g_k : k aracının birim batarya kapasitesi başına şarj olma süresi; $\forall k \in K$

h_k : k aracının birim uzaklıkta tükettiği şarj oranı; $\forall k \in K$

Q_k : k aracının batarya kapasitesi; $\forall k \in K$

q_i : i müşterisine ait talep miktarı; $\forall i \in V$

e_i : i noktası için en erken işleme başlama zamanı; $\forall i \in V'_{0,N+1}$

l_i : i noktası için en geç işleme başlama zamanı; $\forall i \in V'_{0,N+1}$

s_i : i noktası için servis süresi; $\forall i \in V_0$

M : Büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

x_{ij}^k : i noktasından j noktasına k aracı ile gidilirse 1, aksi halde 0; $\forall i, j \in V'_{0,N+1}, i \neq j, d_{ij} > 0, \forall k \in K$

p_i : i noktasına gelen bir aracın işleme (servis veya şarj) başlama zamanı; $\forall i \in V'_{0,N+1}$

y_i : Bir aracın i müşteri noktasından ayrılmadan önceki veya şarj istasyonunda şarj olmaya başlamadan önceki batarya şarj oranı; $\forall i \in V'_0$

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min } z = \sum_{i \in V'_0} \sum_{j \in V'_{N+1}} \sum_{k \in K} d_{ij} x_{ij}^k \quad (3.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j \in V'_{N+1}} \sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in V \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in V'_0} \sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in V \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in V'_{N+1}} \sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i \in F' \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in V'_0} \sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall j \in F' \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in V'} x_{0j}^k \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in V'} x_{i\{N+1\}}^k \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in V'_0} x_{ij}^k = \sum_{i \in V'_{N+1}} x_{ji}^k \quad \forall j \in V', \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$p_i + (t_{ij} + s_i) \sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq p_j + M \left(1 - \sum_{k \in K} x_{ij}^k \right) \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V'_{N+1} \quad (3.9)$$

$$p_i + t_{ij} x_{ij}^k + g_k (Q_k - y_i) \leq p_j + M (1 - x_{ij}^k) \quad \forall i \in F', \forall j \in V'_{N+1}, \forall k \in K \quad (3.10)$$

$$e_i \leq p_i \leq l_i \quad \forall i \in V'_{0,N+1} \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V'_{N+1}} q_i x_{ij}^k \leq C_k \quad \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$y_j \leq y_i - d_{ij} \sum_{k \in K} h_k x_{ij}^k + M \left(1 - \sum_{k \in K} x_{ij}^k \right) \quad \forall i \in V, \forall j \in V'_{N+1} \quad (3.13)$$

$$y_j \leq Q_k - h_k d_{ij} x_{ij}^k + M (1 - x_{ij}^k)$$

$$\forall i \in F' \cup \{0\}, \forall j \in V'_{N+1}, \forall k \in K \quad (3.14)$$

(3.1) nolu ifade, araçların gittikleri toplam mesafeyi minimize edecek amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Kısıt (3.2) ve (3.3), her bir müşteri noktasına bir sefer ve tek bir araç ile servis verilmesini

garanti etmektedir. Kısıt (3.4) ve (3.5), bir kukla şarj istasyonunun en fazla bir kez kullanılmasına izin vermektedir. Kısıt (3.6) ve (3.7), eğer bir araç servis için kullanılacak ise bu aracın en fazla bir rotaya atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.8), araçlara ait rotalarda sürekliliği sağlamaktadır. Bu kısıt, eğer bir j noktasına herhangi bir i noktasından k aracı ile gelindiye yine bu noktadan herhangi bir i noktasına k aracı ile gidilmesini garanti eder. Kısıt (3.9)-(3.11) probleme ait zaman penceresi kısıtlarıdır. Kısıt (3.9) ve (3.10), bir i noktasından bir j noktasına k aracı ile gidiliyor ise bu iki noktaya ait işleme başlama zamanlarını hesaplamaktadır. Kısıt (3.11) ise her bir nokta için işleme başlama zamanlarının zaman penceresi alt ve üst sınırları içinde kalmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.12) araçlara ait kapasite kısıtını ifade etmektedir. Kısıt (3.13) ve (3.14), i noktasından j noktasına giden her bir aracın elektrik tüketimini ve bu noktalardan ayrılmadan önce bataryalarında kalan şarj oranlarını hesaplamaktadır. Kısıt (3.13) herhangi bir müşteri noktasından çıkış yapacak araçları dikkate alırken, kısıt (3.14) elektrik şarj istasyonlarından ve depodan çıkış yapacak araçları dikkate almaktadır. Elektrik şarj istasyonundan ve depodan çıkış yapacak araçların tam dolu şarj kapasitesi ile yola çıkmaları kısıt (3.14) ile sağlanmaktadır.

HF-EARP için yukarıda tanımlanan matematiksel model, Schneider ve ark. [9] tarafından geliştirilen modele üç hususta katkı sağlamıştır:

- Modelde farklı teknik özelliklere sahip araçları dikkate alan değişken ve parametreler kullanılmıştır.
- Schneider ve ark. [9] tarafından tanımlanan modelde daha karmaşık hesaplamalara sahip araç kapasite kısıtı, geliştirilen bu modelde (3.12) nolu kısıt ile daha basit halde ifade edilmiştir.
- Schneider ve ark. [9] tarafından tanımlanan modelde araçların aynı istasyona ait kukla noktalar arasında dolaşımına izin verilirken, geliştirilen modelde gereksiz hesaplamalara yol açan bu durum ortadan kaldırılmıştır.

4 Sayısal Uygulamalar

HF-EARP için geliştirilen karma tamsayı matematiksel modelin geçerliliğini ve etkinliğini test edebilmek amacıyla araç rotalama problemlerinde sıklıkla kullanılan bir örnek problem seti üzerinde çalışma yapılmıştır. Kullanılan problem seti ilk olarak

Solomon [19] tarafından zaman pencereli araç rotalama problemlerini test etmek amacıyla üretilmiş ve ardından birçok farklı problem tipine adapte edilmiştir. Schneider ve ark. [9] yapmış oldukları çalışmada bu problemleri belirli müşteri noktalarını şarj istasyonu olarak belirleyerek adapte etmişlerdir. Tek tip araç tipinin kullanıldığı problemlerde araçlara ait enerji tüketimleri ve şarj dolun süreleri birer katsayı ile verilmiştir.

HF-EARP için yapılan çalışmalar iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak geliştirilen modelin geçerliliği ve performansı, Schneider ve ark. [9] tarafından geliştirilen matematiksel modelin sonuçları ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Ardından, kullanılan problem seti farklı tipte araçları dikkate alan heterojen filo için düzenlenmiştir. Heterojen filonun oluşturulması için gerçek hayatta kullanılan sekiz farklı markaya ait elektrikli araçların teknik verisi problemlere adapte edilmiştir. Çizelge 1'de araçlara ait teknik detaylar yer almaktadır. Çalışmanın ikinci aşamasında, heterojen filo stratejisinin maliyetler üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sayısal uygulamalara ait problem çözümleri Intel Core i7 2.20 GHz işlemci ve 8 GB belleğe sahip bilgisayar üzerinde CPLEX 12.6 çözücü ile iki saatlik zaman kısıtı konularak elde edilmiştir.

Çizelge 1. Araç tiplerine ait kullanılan teknik özellikler

Araç Tip No k	Araç Şarj Kapasite (km)	Hızlı Şarj Süresi (dk)	Araç Yük Kapasitesi (kg)
1	178	30	425
2	168	180	385
3	172	25	317
4	168	30	450
5	158	30	408
6	162	30	428
7	133	180	445
8	118	40	405

Geliştirilen matematiksel modelin geçerliliğini ve etkinliğini analiz etmek için yapılan sayısal uygulamalar Çizelge 2'de Schneider ve ark. [9] tarafından elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, 15 müşteri noktasına sahip RC204 problemi dışında bütün problemler için aynı sonucun bulunduğu görülmektedir. Sonucun farklı çıktığı 15 müşterili RC204 problemi için ise iki saatlik zaman kısıtı sonunda Schneider ve ark. [9] tarafından elde edilen çözümden daha iyi bir çözüm elde edilmiştir. Elde

edilen çözümlere ait işlem süreleri incelendiğinde ise, geliştirilen matematiksel model ile çok daha kısa işlem süreleri ile sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Yapılan

bu çalışmalar sonucunda, HF-EARP için geliştirilen matematiksel modelin EARP için daha etkin çözüm ürettiği görülmüştür

Çizelge 2. Geliştirilen matematiksel modelin Schneider ve ark. tarafından geliştirilen model ile karşılaştırması

Problem Tipi	Müşteri Sayısı	Schneider ve ark. [9]		Geliştirilen Matematiksel Model	
		Amaç Fonksiyonu	İşlem Süresi (sn)	Amaç Fonksiyonu	İşlem Süresi (sn)
C101	5	257.75	81.00	257.75	0.98
C103		176.05	5.00	176.05	0.18
C206		242.55	518.00	242.55	1.15
C208		158.48	15.00	158.48	1.57
R104		136.69	1.00	136.69	0.79
R105		156.08	3.00	156.08	0.62
R202		128.78	1.00	128.78	0.34
R203		179.06	5.00	179.06	0.42
RC105		241.30	764.00	241.30	1.60
RC108		253.93	311.00	253.93	0.88
RC204	176.39	54.00	176.39	1.74	
RC208	167.98	21.00	167.98	0.72	
C101	10	393.76	171.00	393.76	8.09
C104		273.93	360.00	273.93	2.60
C202		304.06	300.00	304.06	1.07
C205		228.28	4.00	228.28	0.16
R102		249.19	389.00	249.19	0.61
R103		207.05	119.00	207.05	4.80
R201		241.51	177.00	241.51	3.34
R203		218.21	573.00	218.21	2.07
RC102		423.51	810.00	423.51	0.66
RC108		345.93	39.00	345.93	0.48
RC201	412.86	7200.00	412.86	69.00	
RC205	325.98	399.00	325.98	0.50	
C103	15	384.29	7200.00	384.79	7200.00
C106		275.13	17.00	275.13	23.74
C202		383.62	7200.00	383.62	2384.00
C208		300.55	5060.00	300.55	153.00
R102		413.93	7200.00	413.93	7200.00
R105		336.15	7200.00	336.15	10.09
R202		358.00	7200.00	358.00	7200.00
R209		313.24	7200.00	313.24	39.54
RC103		397.67	7200.00	397.67	4456.00
RC108		370.25	7200.00	370.25	7200.00
RC202	394.39	7200.00	394.39	640.00	
RC204	407.45	7200.00	384.86	7200.00	
Ortalama		284.28	2483.25	283.58	1216.97

HF-EARP'yi EARP ile kıyaslamak amacıyla Çizelge 1'de verilmiş olan sekiz farklı araca ait teknik özellikler Schneider ve ark. [9] tarafından tanımlanmış olan test problemlerine adapte edilmiştir. Araçların teknik özelliklerinin, örnek problemlerde yer alan zaman ve uzaklık bilgilerine uygun olması için araçlara ait şarj ve ağırlık kapasiteleri gerçek

değerlerin yarısı olarak kabul edilmiştir. Örnek olarak birinci aracın tam dolu şarj ile 178 km yerine 89 km gidebildiği ve aracın yük kapasitesinin 425 kg yerine $[425/2] = 212$ kg olduğu varsayılmıştır. Buna göre, 30 dk'da hızlı şarj olan bu aracın dakikada şarj olma oranı $89/30 = 2.97$ 'dir. Homojen filoya sahip problemler için ise sekiz araç içinden teknik özellikleri ortalama

değerlere en yakın olan beşinci araç seçilmiştir. Gerçek sonuçlar Çizelge 3'te yer almaktadır.
araç verilerinin kullanıldığı sayısal uygulamalara ait
Çizelge 3. Homojen ve heterojen filo ile elde edilen sonuçlar

Problem Tipi	Müşteri Sayısı	Homojen Filo			Heterojen Filo			
		Amaç Fonksiyonu	Araç Sayısı	İşlem Süresi (sn)	Amaç Fonksiyonu	%Fark	Araç Sayısı	İşlem Süresi (sn)
C101	5	247.15	3	0.39	234.82	-4.99	3	0.45
C103		165.67	3	0.83	161.26	-2.66	2	0.96
C206		236.58	3	0.65	221.98	-6.17	2	2.41
C208		158.48	1	0.85	158.20	-0.18	1	3.01
R104		136.69	2	0.84	136.45	-0.18	2	0.98
R105		169.62	3	0.22	151.15	-10.89	2	0.90
R202		126.78	1	0.42	126.78	0.00	1	0.91
R203		191.56	1	1.77	179.00	-6.56	1	6.36
RC105		*	-	-	233.90	-	3	1.72
RC108		*	-	-	253.93	-	2	0.72
RC204		176.39	1	1.51	176.00	-0.22	2	5.99
RC208		167.98	1	0.64	167.98	0.00	1	4.03
C101	10	386.22	3	73.00	379.22	-1.81	4	117.00
C104		273.93	3	502.00	262.49	-4.18	2	219.00
C202		243.20	2	1.46	243.20	0.00	2	23.53
C205		228.28	2	1.57	228.28	0.00	2	5.21
R102		324.61	5	318.00	242.28	-25.36	3	820.00
R103		191.33	3	679.00	191.33	0.00	3	474.00
R201		211.50	3	3.00	208.63	-1.36	3	8.79
R203		231.42	2	7200.00	218.10	-5.76	1	5192.00
RC102		*	-	-	423.51	-	4	107.00
RC108		539.32	7	7200.00	486.67	-9.76	5	7200.00
RC201		310.06	3	7200.00	305.48	-1.48	3	1246.00
RC205		350.09	3	4604.00	325.98	-6.89	2	585.00
C103	15	371.70	5	7200.00	342.33	-7.90	3	7200.00
C106		364.42	3	7200.00	271.21	-25.58	3	67.00
C202		369.56	3	7200.00	368.67	-0.24	3	3095.00
C208		300.55	2	7200.00	298.40	-0.72	3	2122.00
R102		428.41	6	7200.00	395.92	-7.58	5	7200.00
R105		381.45	5	7200.00	352.47	-7.60	5	7200.00
R202		396.01	4	7200.00	361.43	-8.73	3	7200.00
R209		295.40	3	7200.00	269.90	-8.63	2	7200.00
RC103		**	-	-	395.44	-	5	7200.00
RC108		**	-	-	401.43	-	4	7200.00
RC202		418.67	4	7200.00	400.94	-4.23	3	7200.00
RC204		396.33	4	7200.00	346.77	-12.50	3	7200.00
Ortalama		283.53	3.03	3219.04	275.60	-5.55	2.72	2391.94

*Problem çözümsüzdür.

**İki saatlik işlem süresi içinde problem için uygun bir çözüm bulunamamıştır.

Heterojen filo ile elde edilen sonuçların homojen filo ile elde edilen sonuçlara olan yüzdelik farkı eşitlik 4.1'de yer alan formül ile hesaplanmıştır.

$$\%Fark = \frac{HMFS - HTFS}{HMFS} \times \%100 \quad (4.1)$$

HMFS : Homojen filoya ait sonuç

HTFS : Heterojen filoya ait sonuç

Çizelge 3'te verilen sonuçlar incelendiğinde heterojen filo ile toplam mesafelerde homojen filoya göre ortalama %5.55 tasarruf sağlandığı görülmektedir. Bu tasarruf oranı bazı problemlerde %10'un üzerine çıkmaktadır. Ayrıca, çözümsüz olan veya iki saat içinde CPLEX ile çözüm bulunamayan beş problem için heterojen filo ile uygun bir çözüm bulunmuştur. Problem çözümlerinde kullanılan araç sayıları dikkate

alındığında ise farklı araç tiplerinin bulunduğu heterojen filoda daha uygun bir araç seçimi ile daha az sayıda aracın kullanıldığı tespit edilmiştir. Çözümlere ait işlem süreleri incelendiğinde ise heterojen filoya sahip örneklerin çözüm süreleri ortalama olarak homojen filoya sahip örneklerin çözüm sürelerinden daha kısadır. Yapılan bu çalışmaların sonucunda, heterojen filo ile uygun araç seçim stratejisine bağlı olarak daha kısa mesafelere sahip rota planı ve daha az araç kullanımı sağlanabilmektedir.

5 Sonuç

Son yıllarda CO_2 emisyonlarının azaltılması amacıyla alternatif yakıt türünün kullanıldığı elektrikli araç teknolojilerine olan ilginin hızla arttığı görülmektedir. Ancak mevcut teknolojik şartlarda elektrikli araçların şarj süreçleri, araçların gidecekleri mesafeler ve dolayısıyla rotaları için önemli bir kısıt oluşturmaktadır. Yapılan bu çalışmada, farklı teknik özelliklere sahip elektrikli araçlara ait rotalama problemi şarj istasyonları ile birlikte dikkate alınmış ve problem için karma tamsayı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde amaç, farklı tipte araçların bulunduğu heterojen bir filoya ait rota uzunluklarını minimize etmektir. Literatürde yer alan örnek problem setlerine gerçek araç verilerinin adapte edilmesi ile yapılan sayısal uygulamalarda, matematiksel modelin geçerliliği ve etkinliği test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, heterojen filoda uygun araç seçimleri ile homojen bir filoya göre daha kısa mesafeli rota planlarının oluşturulabileceği görülmüştür. Sonuç olarak geliştirilen matematiksel model ile lojistik faaliyetlerde kullanılacak elektrikli araçlar için daha az maliyetli rota planlaması oluşturabilecek bir çözüm önerisi sunulmuştur. Bu çalışmanın devamı olarak, gelecek çalışmalarda elektrikli araçlara ait enerji tüketim hesaplamalarının daha detaylı etkenleri dikkate alarak ilerletilmesi ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için meta-sezgisel bir algoritmanın geliştirilmesi düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Dekker, R.; Bloemhof, J.; Mallidis, I. Operations Research for Green Logistics – An Overview of Aspects, Issues, Contributions and Challenges. *Eur. J. Oper. Res.* 2012; 219(3), 671–679.
- [2] Hung, Y.-C.; Michailidis, G. Optimal Routing for Electric Vehicle Service Systems. *Eur. J. Oper. Res.* 2015; 247, 515–524.

- [3] Keskin, M.; Çatay, B. Partial Recharge Strategies for the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Teknik Rapor*, 2015; 28 pp.
- [4] Conrad, R.G.; Figliozzi, M.A. The Recharging Vehicle Routing Problem, *Proceedings of the Industrial Engineering Research Conference, Reno, USA, May 21-25 2011*.
- [5] Wang, H.; Cheu, R.L. Operations of a Taxi Fleet for Advance Reservations Using Electric Vehicles and Charging Stations. *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board.* 2013; 2352, 1–10.
- [6] Worley, O.; Klabjan, D.; Sweda, T.M. Simultaneous Vehicle Routing and Charging Station Siting for Commercial Electric Vehicles, *Proceedings of IEEE International Electric Vehicle Conference, South Carolina, USA, March 4-8 2012*; Taiber, J., Stogner, L.; 1–3, 2012.
- [7] Neaimeh, M.; Hill, G.A.; Hübner, Y.; Blythe, P.T. Routing Systems to Extend the Driving Range of Electric Vehicles. *IET Intell. Transp. Syst.* 2013; 7(3), 327–336.
- [8] Felipe, A.; Ortuno, M.T.; Righini, G.; Tirado, G. A Heuristic Approach for the Green Vehicle Routing Problem with Multiple Technologies and Partial Recharges. *Transport. Res. E-Log.* 2014; 71, 111–128.
- [9] Schneider, M.; Stenger, A.; Goeke, D. The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. *Transport. Sci.* 2014; 48(4), 500–520.
- [10] Afroditi, A.; Boile, M.; Theofanis, S.; Sdoukopoulos, E.; Margaritis, D. Electric Vehicle Routing Problem with Industry Constraints: Trends and Insights for Future Research. *Transport. Res. Procedia.* 2014; 3, 452–459.
- [11] Bruglieri, M.; Pezzella, F.; Pisacane, O.; Suraci, S. A Variable Neighborhood Search Branching for the Electric Vehicle Routing with Time Windows. *Electron. Notes Discrete Math.* 2014, 47, 221–228.
- [12] Ouahmed, A.A.; Aggoune-Mtalaa, W.; Habbas, Z.; Khadraoui, D. eM-VRP: A New Class of Vehicle Routing Problem Based on a New Concept of Modular Electric Vehicle, *Proceedings of Transportation Research Arena, Paris, France, April 14-17 2014*; 1–10.
- [13] Goeke, D.; Schneider, M. Routing a Mixed Fleet of Electric and Conventional Vehicles. *Eur. J. Oper. Res.* 2015; 245(1), 81–99.
- [14] Mancini, S. The Hybrid Vehicle Routing Problem. *Optimization Online: www.optimization-online.org.* 2015; 20 pp.
- [15] Murakami, K.; Morita, H. A Column Generation Model for the Electric and Fuel-engined Vehicle Routing Problem, *Proceedings of IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics, Hong Kong, China, October 9-12 2015*; 1986–1991.
- [16] Yang, H.; Yang, S.; Xu, Y.; Cao, E.; Lai, M.; Dpng, Z. Electric Vehicle Route Optimization Considering Time-of-Use Electricity Price by Learnable Partheno-Genetic Algorithm. 2015; *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2015; 6(2), 657–666.

- [17] Lin, J.; Zhou, W.; Wolfson, O. Electric Vehicle Routing Problem. *Transport. Res. Procedia*; 2016; 12, 508–521.
- [18] Küçüköğlü, İ.; Ene, S.; Aksoy, A.; Öztürk, N. A Memory Structure Adapted Simulated Annealing Algorithm for a Green Vehicle Routing Problem. *Environ. Sci. Pollut. R.* 2015; 22(5), 3279–3297.
- [19] Solomon, M.M. Algorithms for Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Windows Constraints. *Oper. Res.* 1987; 35(2), 254–26