Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 23, Sayı 4, 2018 ARAŞTIRMA

DOI: 10.17482/uumfd.454071

ELEKTRİKLİ KAMYONLAR İÇİN AÇIK UÇLU ROTALAMA OPTİMİZASYONU

Aslı AKSOY [*]
Seval ENE YALÇIN [*]
İlker KÜÇÜKOĞLU [*]
Nursel ÖZTÜRK [*]

Alınma:16.08.2018; düzeltme: 24.10.2018; kabul:09.11.2018

Öz: Son yıllarda lojistik sektörü kaynaklı çevresel problemlerin önüne geçilmesi ve enerji tüketim miktarının azaltılmasına yönelik çalışmalar ağırlık kazanmıştır. Elektrikli araç kullanımı, lojistik sektöründe bu amaçla uygulanabilecek yenilikçi yaklaşımlardan bir tanesidir ve yaygın olarak çalışılan konulardan biridir. Bu çalışma kapsamında lojistik sektöründe elektrikli kamyonların kullanılması durumunda rota optimizasyonu yapan bir matematiksel model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elektrikli araç rotalama problemi, açık uçlu araç rotalama konsepti ile birlikte dikkate alınmıştır. Problemin çözümü için karışık tamsayılı programlama modeli önerilmiştir ve probleme, toplam mesafe minimizasyonu, kullanılan toplam araç sayısı minimizasyonu ve harcanan toplam enerji miktarı minimizasyonu olmak üzere üç farklı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Önerilen model, örnek problemler üzerinde test edilerek doğrulanmış ve farklı amaç fonksiyonları için karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir. Ulaşılan sonuçlar, önerilen model ile küçük boyutlu gerçek hayat uygulamalarında kısa işlem süreleri ile optimum sonuçların elde edilebileceğini göstermiştir. Elektrikli araçların rota optimizasyonu yapılarak lojistik kaynaklı çevre kirlenmesinin azaltılacağı ve enerji verimliliği sağlanacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli kamyon, Karışık tam sayılı programlama, Rota optimizasyonu

Open Vehicle Routing Optimization for Electric Trucks

Abstract: In recent years, efforts have been focused on preventing environmental problems caused by the logistics sector and reducing the amount of energy consumption. The use of electric vehicles is one of the innovative approaches that can be applied for this purpose in the logistics sector and is one of the widely studied issues. In the scope of this study, it is aimed to develop a mathematical model that optimizes the route in case of using electric trucks in the logistics sector. The problem of electric vehicle routing is taken into account integrated with the concept of open vehicle routing. A mixed integer programming model is proposed for solving the problem and three different objective functions are defined; total distance minimization, minimization of the total number of used vehicles and total energy consumption minimization. The proposed model is tested on the sample problems, the model is verified and comparative results are obtained for different objective functions. The obtained results show that the proposed model can achieve optimum results with short processing times in small sized real life applications. It is anticipated that the route optimization of electric vehicles will reduce environmental pollution caused by logistics sector and provide energy efficiency.

Keywords: Electric trucks, Mixed integer programming, Route optimization

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması, imalat endüstrisinin gelişimini hızlandırmakta ve enerji ihtiyacını arttırmaktadır. Günümüzde enerji ihtiyacının büyük kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların lojistik sektöründe yoğun kullanılması neticesinde insan

[*] Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Nilüfer, 16059 Bursa
İletişim Yazarı: Seval Ene Yalçın (sevalene@uludag.edu.tr)

sağlığına ve çevreye zarar veren gazlar açığa çıkmakta, bu durum hem solunan havanın kalitesini olumsuz etkilemekte, hem de atmosferde sera etkisi yaratmaktadır. Fosil yakıtların kullanımıyla ilgili en önemli kaygılardan biri de, fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olmasıdır. Fosil yakıtlarla ilgili saptanan problemler nedeniyle hem resmi kurumlar, hem de özel kuruluşlar son yıllarda elektrik enerjisiyle çalışan araçlar ile ilişkili Ar-Ge çalışmalarına ağırlık vermişlerdir. Elektrikli araçlarla ilgili tanımlanan en büyük sorunlardan olan uzun şarj süresi ve düşük menzil ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda, şarj süresi ve menzildeki iyileşmeler elektrikli araçların lojistik sektöründe taşıma amaçlı daha sık kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, lojistik sektöründe elektrikli kamyonların kullanılması durumunda farklı amaç fonksiyonları için rota optimizasyonu yapan açık uçlu elektrikli araç rotalama problemi (AUEARP) ele alınmıştır. Çalışma kapsamında incelenen problemin çözümü için karışık tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde, araçların kat edeceği toplam mesafenin minimizasyonu, kullanılan toplam araç sayısının minimizasyonu ve araçların tükettiği toplam enerji miktarının minimizasyonu olmak üzere üç farklı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Örnek problemler üzerinde model test edilmiş, geçerliliği sağlanmış ve tanımlanan amaç fonksiyonları için modelden elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Makalenin ikinci bölümünde, elektrikli araç rotalama ve açık uçlu araç rotalama ile ilgili geçmiş çalışmalar kısaca özetlenmiş; üçüncü bölümde, incelenen problem tanımlanmış; dördüncü bölümde problem için önerilen karışık tamsayılı matematiksel model ve amaç fonksiyonları açıklanmış; beşinci bölümde sayısal uygulama sonuçlarına yer verilmiş ve altıncı bölümde sonuçlar özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yeşil araç rotalama problemi kategorisinde değerlendirilen elektrikli araç rotalama problemi, biyodizel, elektrik, hidrojen gibi temiz enerji kaynaklarının kullanıldığı araçlarda rota optimizasyonunu ele alan bir problemdir (Murakami, 2017). Literatürde elektrikli araç rotalama problemi konusunda yapılmış, enerji tüketimi ve şarj işlemi ile ilgili kısıtları dikkate alan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde, literatürde karşılaşılan bazı çalışmalar özetlenmiştir. Afroditi ve diğ. (2014), zaman pencereli elektrikli araç rotalama problemi için seyahat mesafesini ve kullanılan araç adedini minimize etmek amacıyla bir matematiksel formülasyon önermişlerdir. Hung ve Michailidis (2015), elektrikli araç hizmet sistemlerinde rota optimizasyonu için kuyruk modelleme tabanlı bir yapı geliştirmişlerdir. Lin ve diğ. (2016), elektrikli araç rotalama probleminde, seyahat ve enerji maliyetlerini minimize edecek rota stratejilerinin belirlenmesi için bir matematiksel formülasyon oluşturmuşlardır. Modelde, hem homojen olmayan araç filosu dikkate alınmış, hem de batarya tüketiminde araç hızı ile birlikte araç yükü hesaba katılmıştır. Murakami (2017), elektrikli ve dizel yakıtlı araçların rotalanması problemi için karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Enerji tüketiminin modellenmesinde, araç ağırlığı ve yük, araç hızı, ivmelenme ve yol eğimi parametrelerini dikkate almıştır. Mancini (2017), hem fosil yakıt hem de elektrik enerjisiyle çalışabilen hibrid araçların rotalanması problemi için karışık tamsayılı doğrusal programlama formülasyonu ve bir sezgisel algoritma önermiştir. Montoya ve diğ. (2017), elektrikli araç rotalama problemini, doğrusal olmayan şarj fonksiyonu ile birlikte incelemişlerdir. Problemin çözümü için karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli ve sezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Elektrikli araçların rota planlaması için literatürde birçok kaynak bulunmasına rağmen, az sayıda yayında farklı ve/veya çoklu amaç fonksiyonuna sahip modeller yer almaktadır (Wang ve diğ., 2017). Karmakar ve Nandi (2016), literatürde en çok tercih edilen amaç fonksiyonunun, enerji ve yakıt tüketimi minimizasyonu olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve diğ. (2017), elektrikli araçlar için toplam rota maliyetini enazlamak için geliştirdikleri modelde toplam rota süresini, enerji tüketimini ve şarj maliyetini enazlayan üç farklı amaç fonksiyonu tanımlayarak, bu amaç fonksiyonlarını tek fonksiyonda toplamışlar, amaç fonksiyonlarını değerlendirirken sürücünün sürüş konforunu da ençoklamaya çalışan model geliştirmişler ve modeli genetik algoritma ile çözmüşlerdir. Karmakar ve Nandi (2016),

optimal sürüş stratejisinin, rotaya ve mevcut sürüş koşulları ile ilgili bilgiye dayanan çok amaçlı modelin çözülmesiyle elde edileceğini belirtmişlerdir. Zhang ve diğ. (2016), rota uzunluğunu, süresini ve enerji tüketimini eşzamanlı olarak eniyilemeye çalışan model geliştirmişler, çözümde karınca kolonisi algoritması kullanmışlardır. Vaz ve diğ. (2015), elektrikli araç için optimum hız hesaplamasında, aracın enerji tüketimini ve motor verimliliğini dikkate alan çok amaçlı model geliştirmişlerdir.

Araç rotalama probleminin bir türü olan açık uçlu araç rotalama probleminde, araçlar, rotadaki son müşteriye hizmet götürdükten sonra depoya dönmemektedirler (MirHassani ve Abolghasemi, 2011). Literatürde açık uçlu araç rotalama probleminin çözümü için geliştirilmiş çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bu bölümde, literatürde karşılaşılan bazı çalışmaların özetlerine yer verilmiştir. MirHassani ve Abolghasemi (2011), açık uçlu araç rotalama probleminin çözümü için rota ve araç maliyetlerini minimize eden matematiksel model ve parçacık sürü optimizasyonu algoritması önermişlerdir. Erbao ve diğ. (2014), açık uçlu araç rotalama probleminde talep belirsizliğini dikkate alarak çok amaçlı bir matematiksel formülasyon önermişlerdir. Önerdikleri modelde, seyahat maliyetini ve karşılanmayan talep maliyetini minimize etmeye yönelik amaç fonksiyonları tanımlanmıştır. Modelin çözümü için ise, diferansiyel gelişim algoritmasını kullanmışlardır. Yu ve diğ. (2016), açık uçlu araç rotalama problemini çapraz sevkiyat ile birlikte dikkate alarak, problemin çözümü için araç kiralama ve taşıma maliyetlerini minimize eden karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli ve tavlama benzetimi algoritmasını geliştirmişlerdir. Niu ve diğ. (2018) zaman pencereli açık uçlu yeşil araç rotalama probleminin çözümü için bir matematiksel model ve hibrid tabu arama algoritması önermişlerdir. Önerdikleri çözüm yaklaşımında, yakıt emisyon hesabı için araç teknik özellikleri, hız, yük vb. parametreleri içeren bir model tanımlamışlardır. Yapılan çalışmada amaç ise, yakıt emisyon maliyetlerini ve sürücü maliyetlerini minimize etmek olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak elektrikli araç rotalama ve açık uçlu araç rotalama problemlerini birlikte dikkate alan AUEARP incelenmiş ve farklı amaç fonksiyonları altında optimizasyonu araştırılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen problemin çözümü için karışık tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir.

3. PROBLEM TANIMI

Tedarik zinciri yönetimi uygulamalarında, araç rotalama problemi (ARP), dağıtım yönetimi ve lojistik faaliyetleri ile ilgili çalışmalar hem akademik çalışmalarda, hem de sektörel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. ARP, farklı lokasyonlarda yer alan müşterilere, bir veya birden fazla depodan hizmet sağlayacak araçların dağıtım ve/veya toplama rotalarının belirlenmesi ile ilgilidir. Literatürde ARP'nin çözümü için önerilen yöntemler kesin ve sezgisel yöntemler olarak iki başlığa ayrılmıştır. ARP'de optimum çözüm, oluşturulacak olası rota kombinasyonlarından biridir. Eğer tüm kombinasyonlar test edilebilirse, en iyi çözüme ulaşmak mümkündür (Bozyer ve diğ., 2014).

Açık uçlu araç rotalama problemi klasik araç rotalama probleminin genişletilmiş halidir. Açık uçlu araç rotalama probleminde araçlar klasik araç rotalama probleminde olduğu gibi, son hizmet noktasından sonra depoya dönmezler. Açık uçlu araç rotalama probleminde, rotalar merkez depo ile başlamakta, talep noktası ile sona ermektedir. Bu nedenle açık uçlu araç rotalama probleminde amaç, müşteri taleplerini karşılayan Hamilton yollarının bulunmasıdır. Açık uçlu araç rotalama problemlerinde en çok incelenen amaç fonksiyonu, rota uzunluklarının minimizasyonu olmakla birlikte, toplam araç sayısını minimize eden çalışmalar da son yıllarda tercih edilmektedir (Atefi ve diğ., 2018).

Fosil yakıt tüketen araçlara göre çevreye daha az zarar veren elektrikli araçlara son yıllarda ilgi artmaktadır. Elektrikli araçlar fosil yakıt tüketen araçlarla kıyaslandığında düşük menzilli olmaları ve uzun şarj süreleri, elektrikli araçların yaygınlaşması ile ilgili temel kısıtları olarak düşünülmektedir. Kasım 2017 tarihinde tanıtımı yapılan elektrikli kamyon ise 30 dakikalık şarj süresi ile yaklaşık 650 km mesafe gidebilmektedir. Şarj süresi ve menzildeki olumlu gelişmeler

sayesinde elektrikli kamyonların tedarik zinciri faaliyetlerinde, lojistik süreçlerinde kullanımının artacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada, AUEARP için n müşteri sayısını gösterecek şekilde, $N = \{1, 2, \dots, n\}$ müşteriler kümesi tanımlanmıştır. Depo "0" ile gösterilmektedir. q_i i. müşterinin talebi $i \in N$, ve Q elektrikli aracın yük kapasitesini göstermektedir. Modelde en fazla K adet elektrikli kamyon olduğu kabul edilmiş, müşteriler arası uzaklık d_{ij} ile gösterilmiştir. Elektrikli aracın hizmet süresince tüketeceği enerji miktarının elektrikli aracın yüküne bağlı olarak değişeceği kabul edilmiştir. AUEARP için geliştirilen tamsayılı matematiksel model, araç kapasitesi Q ve batarya seviyesini dikkate alarak, elektrikli kamyonların tek şarjla tamamlayabileceği rotalar oluşturmaya çalışmaktadır. Rotalar; minimum mesafe, kullanılan minimum araç sayısı veya minimum harcanan enerji amaç fonksiyonları altında oluşturulmaktadır.

4. MATEMATİKSEL MODEL

Elektrikli kamyon teknolojisine ait batarya kapasitesinin de dikkate alındığı AUEARP'nin çözümü için karışık tamsayılı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan modele ait notasyonlar ve karar değişkenleri aşağıda tanımlanmıştır.

Notasyonlar

0 Depo noktası
N Dağıtım yapılacak noktalar kümesi
D Elektrikli kamyonların rotasına ait en son duraktan sonra gideceği varsayılan kukla nokta
K Elektrikli kamyon kümesi
Q Elektrikli kamyonların yük kapasitesi
q_i i noktası tarafından talep edilen yük miktarı; $\forall i \in N$
B Elektrikli kamyonun batarya kapasitesi
h_1 Elektrikli kamyonun yüksüz olarak bir birim uzaklık için tüketeceği enerji değeri
h_2 Elektrikli kamyonun bir birim ilave yük için bir birim uzaklıkta tüketeceği enerji değeri
d_{ij} i noktasından j noktasına olan uzaklık; $\forall i \in 0 \cup N, \forall j \in N \cup D$

Karar Değişkenleri

x_{ij}^k Eğer k elektrikli kamyonu i noktasından j noktasına giderse 1, aksi halde 0; $\forall i \in 0 \cup N, \forall j \in N \cup D, i \neq j, k \in K$
y_{ik} k elektrikli kamyonun i noktasından ayrılmadan önce yük miktarı; $\forall i \in 0 \cup N, k \in K$
b_{ik} k elektrikli kamyonun i noktasından ayrılmadan önce batarya düzeyi; $\forall i \in 0 \cup N, k \in K$

Literatürde elektrikli araçlara ait rotalama problemleri üzerine yapılan birçok çalışmada, elektrikli araçların enerji tüketimlerine ait hesaplamalarda mesafeye bağlı sabit enerji tüketim katsayısı kullanılmaktadır (Hiermann ve diğ., 2016; Keskin ve Çatay, 2016; Roberti ve Wen, 2016; Schiffer ve diğ., 2018; Schneider ve diğ., 2014). Bu çalışmada AUEARP'nin çözümü için geliştirilen matematiksel modelde ise, elektrikli kamyonlara ait enerji tüketim hesaplamasında mesafeyi dikkate alan h_1 katsayısına ek olarak aracın taşıdığı yükün ağırlığını dikkate alan h_2 katsayısı da kullanılmıştır. Bu kapsamda, yukarıda tanımlanan notasyon ve karar değişkenlerine göre AUEARP'ye ait matematiksel model aşağıda formüle edilmiştir.

$$Min\ Z_1 = \sum_{i \in 0 \cup N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} d_{ij} x_{ij}^k \tag{1}$$

Kısıtlar;

$$\sum_{i \in 0 \cup N} \sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1 \qquad \forall j \in N \tag{2}$$

$$\sum_{j\in N\cup D}\sum_{k\in K} x_{ij}^{k} = 1 \qquad \forall i \in N \tag{3}$$

$$\sum_{j\in N} x_{0j}^{k} \leq 1 \qquad \forall k \in K \tag{4}$$

$$\sum_{i\in N} x_{iD}^{k} \leq 1 \qquad \forall k \in K \tag{5}$$

$$\sum_{i\in 0\cup N} x_{ij}^{k} = \sum_{i\in N\cup D} x_{ji}^{k} \qquad \forall j \in N \qquad \forall k \in K \tag{6}$$

$$y_{0k} = \sum_{i\in N}\sum_{j\in N\cup D} q_i x_{ij}^{k} \qquad \forall k \in K \tag{7}$$

$$y_{0k} \leq Q\sum_{j\in N} x_{0j}^{k} \qquad \forall k \in K \tag{8}$$

$$y_{jk} + q_j x_{ij}^{k} - y_{ik} \leq Q\left(1 - x_{ij}^{k}\right) \quad \forall i \in 0\cup N \quad \forall j \in N \quad i \neq j \quad \forall k \in K \tag{9}$$

$$b_{0k} \leq B\sum_{j\in N} x_{0j}^{k} \qquad \forall k \in K \tag{10}$$

$$b_{jk} + d_{ij}(h_1 + h_2 y_{ik}) - b_{ik} \leq \left(d_{ij}h_1 + d_{ij}h_2 Q + B\right)\left(1 - x_{ij}^{k}\right)$$
$$\forall i \in 0\cup N \quad \forall j \in N \quad i \neq j \quad \forall k \in K \tag{11}$$

$$x_{ij}^{k} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in 0\cup N \quad \forall j \in N\cup D \quad i \neq j \quad k \in K \tag{12}$$

$$y_{ik}, b_{ik} \geq 0 \qquad \forall i \in 0\cup N \qquad k \in K \tag{13}$$

Matematiksel modelde yer alan (1) no.lu ifade elektrikli kamyonların rotasına ait toplam mesafeyi minimize edecek amaç fonksiyonunu tanımlamaktadır. Çalışmada toplam mesafe minimizasyonuna ek olarak, dikkate alınan diğer iki amaç fonksiyonu (14) ve (15) no.lu ifadede verilmiştir. Buna göre (14) no.lu ifade kullanılan toplam araç sayısını minimize etmeyi sağlarken, (15) no.lu ifade araçların harcadığı toplam enerji miktarını en aza indirmektedir. (2) ve (3) no.lu kısıtlar her servis noktasına bir kere ziyaret edilmeyi garanti etmektedir. (4) ve (5) no.lu kısıtlar ise her bir elektrikli kamyonun en fazla bir rota için kullanılmasını sağlamaktadır. (6) no.lu kısıt, elektrikli araçlara ait rotaların sürekliliğini sağlamaktadır. (7) no.lu eşitlik her bir k elektrikli aracının depodan ayrılmadan önceki yük miktarını hesaplamaktadır. (8) no.lu ifade ise elektrikli araçlara ait kapasite kısıtını belirtmektedir. Elektrikli araçların servis noktalarından ayrılmadan önceki yük miktarı ise (9) no.lu kısıt ile hesaplanmaktadır. (10) ve (11) no.lu kısıtlar kapasite kısıtlarına benzer şekilde sırasıyla elektrikli araçların depodan ve servis noktalarından ayrılmadan önceki batarya seviyesini hesaplamaktadır. Son olarak (12) ve (13) no.lu ifadeler modelde kullanılan karar değişkenlerini tanımlamaktadır.

$$Min\ Z_2 = \sum_{j\in N}\sum_{k\in K} x_{0j}^{k} \tag{14}$$

$$Min\ Z_3 = \sum_{k\in K} b_{0k} \tag{15}$$

5. SAYISAL UYGULAMA

AUEARP için geliştirilmiş olan karışık tamsayılı matematiksel modelin geçerliliği ve etkinliğini test edebilmek için 15 adet küçük boyutlu problem üretilmiştir. Üretilen problemlerde elektrikli araçların servis vereceği noktaların koordinatları ve bu noktaların talep miktarı rassal olarak belirlenmiştir. Tablo 1'de problemlerde kullanılan elektrikli kamyonlara ait teknik veriler gösterilmiştir. Elektrikli araçlara ait yük kapasitesi, batarya kapasitesi ve enerji tüketim değerleri ise ticari olarak kullanıma sunulacak olan elektrikli bir kamyonun teknik verileri üzerinden belirlenmiştir. Tablo 2'de üretilmiş olan problemlere ait nokta sayısı, noktalar arası minimum/maksimum/ortalama uzaklık ve minimum/maksimum/ortalama talep miktarı bilgileri yer almaktadır.

Üretilmiş olan test problemleri Z_1, Z_2 ve Z_3 amaç fonksiyonları dikkate alınarak, GUROBI 7.0.1 çözücü ile Intel® Xeon® CPU E5-2643 v3 3.4 GHz işlemci ve 64 GB belleğe sahip bilgisayar üzerinde bir saatlik süre kısıtı ile çözdürülmüştür. Bir saat sonunda optimum sonuca ulaşılamayan problemlerde GUROBI ile elde edilen tamsayılı çözümler sonuç olarak kullanılmıştır. Tablo 3-5'de sırasıyla Z_1, Z_2 ve Z_3 amaç fonksiyonları ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Her bir tabloda, problemler için elde edilen çözümlere ait toplam rota uzunluğu değerleri, kullanılan araç sayısı, toplam enerji tüketim değerleri ve çözüm süreleri verilmiştir.

Tablo 1. Elektrikli kamyonlar için dikkate alınan teknik değerler

Aracın yük kapasitesi Q (ton)	40
Aracın batarya kapasitesi B (kWh)	1116
Aracın yüksüz olarak bir mil uzaklıkta tüketeceği enerji h_1 (kWh)	1,8000
Aracın bir ton ilave yük için bir mil uzaklıkta tüketeceği enerji h_2 (kWh)	0,0108

Tablo 2. Kullanılan problem setine ait bilgiler

Problem No	Nokta Sayısı	Mesafe (mil)			Talep Miktarı (ton)		
		Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
1	5	32,24	348,20	170,63	2	6	4,00
2	8	64,48	323,12	154,84	2	6	4,12
3	10	12,64	407,08	206,46	2	6	3,90
4	12	32,24	475,48	204,18	1	6	3,75
5	13	34,16	393,64	196,84	1	8	4,00
6	15	8,96	437,92	172,91	1	5	3,53
7	18	8,96	472,60	208,06	3	5	4,06
8	16	16,00	415,24	201,94	2	6	4,00
9	15	32,24	427,32	207,68	2	6	3,93
10	16	23,32	396,16	204,46	2	6	4,38
11	20	16,00	415,24	196,10	2	6	4,25
12	22	8,00	467,28	212,81	2	8	3,86
13	25	8,96	520,48	206,32	2	6	3,72
14	20	20,00	399,44	201,20	1	8	3,55
15	21	12,64	421,92	208,01	2	6	3,90

Tablo 3. Amaç fonksiyonu Z_1 dikkate alınarak elde edilen sayısal uygulama sonuçları

Problem No	Toplam Uzaklık (mil)	Kullanılan Araç Sayısı	Toplam Enerji Tüketim Miktarı (kWh)	Çözüm Süresi (sn)
1	570,84	3	1058,72	0,06
2	693,76	3	1305,61	0,19
3	999,24	3	1877,22	0,81
4	879,32	3	1683,41	0,59
5	950,64	3	1818,56	0,64
6	1047,36	4	1979,66	2,96
7	1401,92	3	2744,12	3,47
8	1206,20	5	2301,01	3,89
9	1178,32	3	2274,36	4,09
10	1192,60	3	2327,14	4,58
11	1399,64	5	2697,83	10,84
12	1395,48	4	2719,76	22,62
13	1550,84	4	3004,44	12,89
14	1324,44	4	2569,45	33,94
15	1362,80	4	2634,91	13,91

Tablo 4. Amaç fonksiyonu Z_2 dikkate alınarak elde edilen sayısal uygulama sonuçları

Problem No	Toplam Uzaklık (mil)	Kullanılan Araç Sayısı	Toplam Enerji Tüketim Miktarı (kWh)	Çözüm Süresi (sn)
1	579,80	2	1083,93	0,02
2	734,40	2	1410,13	0,02
3	1074,28	2	2052,62	14,36
4	898,60	2	1746,03	1,38
5	1091,16	2	2114,26	1,36
6	1114,68	2	2167,44	3,28
7	1401,92	3	2744,12	3,29
8	1254,52	3	2456,60	6,34
9	1178,32	3	2274,36	1,73
10	1192,60	3	2327,14	4,30
11	1476,04	3	2929,62	57,43
12	1395,48	4	2719,76	5,22
13	1550,84	4	3004,44	1,60
14	1339,88	3	2625,09	12,77
15	1408,96	3	2781,37	16,99

Z_1 ve Z_2 amaç fonksiyonlarının dikkate alındığı model çözümleri incelendiğinde, elektrikli araçların servis vereceği nokta sayısının 5-25 aralığında değiştiği her bir test problemi için bir dakikadan kısa bir sürede optimum sonuca ulaşılmıştır. Özellikle nokta sayısının 20'den az olduğu problemlerin birçoğu için 10 saniyeden kısa bir sürede çözüm elde edilmiştir. Toplam enerji tüketim miktarını minimize etmeyi hedefleyen Z_3 amaç fonksiyonunun kullanıldığı model çözümlerinde ise iki problem dışında bir saatlik süre kısıtı içerisinde optimum sonuca ulaşılmıştır. Tablo 3 ve Tablo 4'de verilen çözüm sürelerinden farklı olarak Z_3 amaç fonksiyonu dikkate alındığında problemlere ait çözüm sürelerinin arttığı tespit edilmiştir. Fakat elektrikli kamyonların uzun menzilli dolaşımları gözönüne alındığında, bir saatten kısa çözüm süreleri rota planlaması açısından kabul edilebilir değerlerdir.

Tablo 5. Amaç fonksiyonu Z_3 dikkate alınarak elde edilen sayısal uygulama sonuçları

Problem No	Toplam Uzaklık (mil)	Kullanılan Araç Sayısı	Toplam Enerji Tüketim Miktarı (kWh)	Çözüm Süresi (sn)
1	570,84	3	1058,72	0,33
2	694,20	4	1296,11	240,00
3	999,24	3	1877,22	2,90
4	879,32	3	1683,41	4,59
5	950,64	3	1818,56	3,50
6	1047,36	4	1979,66	5,78
7	1413,00	4	2721,13	387,00
8	1206,20	5	2301,01	608,00
9	1178,32	3	2274,36	23,59
10	1198,08	4	2315,22	74,00
11	1402,24	5	2696,56	2025,00
12	1395,48	4	2719,76	2315,00
13	1550,84	4	3004,44	3600,00
14	1325,44	4	2569,45	3600,00
15	1362,15	4	2634,91	1404,00

Tablo 3-5'de verilmiş olan model çözümlerine ek olarak Tablo 6'da, her bir amaç fonksiyonu için elde edilen çözümlerin ortalamaları verilmiştir. Toplam uzaklıklar dikkate alındığında Z_1 ve Z_3 amaç fonksiyonu ile çözülen modellerin sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Z_2 amaç fonksiyonu kullanıldığında ise toplam uzaklıklarda artış olmuştur. Benzer durum, toplam enerji tüketim değerleri dikkate alındığında da görülmektedir. Z_1 ve Z_3 amaç fonksiyonları ile elde edilen çözümler birbirlerine oldukça yakınken, Z_2 amaç fonksiyonu ile elde edilen çözümlerde toplam enerji tüketim değerleri artmıştır. Z_2 amaç fonksiyonu ile elde edilen çözümlerde, sadece kullanılan araç sayısında belirgin bir iyileşme sağlanabilmiştir. Son olarak çözüm süreleri incelendiğinde, Z_3 amaç fonksiyonu ile elde edilen çözüm sürelerinin, Z_1 ve Z_2 amaç fonksiyonları ile elde edilen çözüm sürelerinden oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 6. Dikkate alınan amaç fonksiyon tipine göre elde edilen ortalama sonuçlar

Dikkate Alınan Amaç Fonksiyonu	Uzaklık (mil)	Kullanılan Araç Sayısı	Enerji Tüketim Miktarı (kWh)	Çözüm Süresi (sn)
Z_1	1143,63	3,60	2199,75	7,70
Z_2	1179,43	2,73	2295,79	8,67
Z_3	1144,89	3,80	2196,70	952,91

Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, AUEARP için geliştirilmiş olan karışık tamsayılı matematiksel model ile küçük boyutlu gerçek hayat uygulamalarında kısa işlem süreleri ile optimum sonuçların elde edilebileceği görülmüştür. Önerilmiş olan üç farklı amaç fonksiyonu ile geliştirilmiş olan matematiksel model, elektrikli kamyonların lojistik faaliyetlerde farklı stratejiler ile etkin kullanımına imkan sağlamaktadır.

6. SONUÇ

Hızla gelişen, değişen rekabet ortamında işletmeler varlığını sürdürebilmek, rekabetçi gücünü koruyabilmek, pazar payını genişletebilmek için, toplam maliyetleri içinde büyük bir paya sahip olan lojistik faaliyetleri ile ilgili maliyetleri en aza indirmeye çalışmaktadır. İşletmelerin üretim ve hizmet performansını olumsuz yönde etkilemeyecek uygun maliyetli dağıtım rotalarının belirlenmesi, işletmeler için önemli konulardan bir tanesidir. Uygun dağıtım rotalarının belirlenmesi ile araç kapasitesi ile uyumlu olacak şekilde, ürünlerin müşterilere en

kısa mesafede ulaşmasıyla işletmelerin hizmet performansı artarken, dağıtım maliyetleri azalır. Bu durum da, işletmelerin rekabetçi gücünün artmasına katkı yapabilir.

Günümüzde çevresel kaygılar nedeniyle işletmelerin tüm faaliyetlerinde çevreye verilen zararın en aza indirilmesiyle ilgili çalışmalar önem kazanmıştır. Resmi kurumlar ve özel kuruluşlar son yıllarda elektrik enerjisiyle çalışan araçlar ile ilişkili Ar-Ge çalışmalarına ağırlık vermektedirler. Bunun en temel nedenlerinden bir tanesinin fosil yakıt tüketen araçların çevreye verdikleri zarar ve sınırlı kaynak kapasitesi olduğu bilinmektedir. İşletmelerin tedarik zinciri boyunca lojistik faaliyetlerinde kullandığı fosil yakıt tüketen araçlarla çevreye verdikleri zararı en aza indirmek için uygulanabilecek alternatiflerden bir tanesi de, lojistik faaliyetlerinde elektrikli araçların tercih edilmesidir. Elektrikli araçlarla ilgili tanımlanan en büyük sorunlardan olan uzun şarj süresi ve düşük menzil ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde şarj süresi ve menzildeki iyileşmeler elektrikli araçların lojistik sektöründe taşıma amaçlı daha sık kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak, elektrikli araç rotalama ve açık uçlu araç rotalama problemlerini birlikte dikkate alan AUEARP incelenmiştir. AUEARP için geliştirilen tamsayılı matematiksel model, her elektrikli araç için araç kapasitesini ve elektrikli araç batarya seviyesini dikkate alarak, araçların katedeceği toplam mesafeyi, kullanılan toplam elektrikli araç sayısını veya tüketilen toplam enerji miktarını minimize etmeye çalışan, elektrikli araçların tek şarjla tamamlayabileceği rotalar oluşturmaya çalışmaktadır. AUEARP için geliştirilmiş olan karışık tamsayılı matematiksel modelin geçerliliği ve etkinliği, küçük boyutlu problemler ile test edilmiş, test örneklerinin çoğunda optimum çözüm kısa sürelerde elde edilebilmiştir. Ayrıca tanımlanan farklı amaç fonksiyonları için karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

Geliştirilen model ve yapılan çalışmalar ile sunulan çözüm önerileri neticesinde, işletmelerin tedarik zinciri boyunca lojistik faaliyetlerinde kullanılabilecek elektrikli araçlar için, farklı stratejiler ile daha az dağıtım maliyetli ve çevreye daha az zarar verecek rotaların oluşturulabileceği ortaya konmuştur. Gelecek çalışmalarda daha büyük boyutlu problemler için model performansı test edilerek, ihtiyaç durumunda sezgisel algoritmalar uygulanarak farklı çözümler ve kazanımlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Afroditi, A., Boile, M., Theofanis, S., Sdoukopoulos, E. ve Margaritis, D. (2014) Electric vehicle routing problem with industry constraints: Trends and insights for future research, *Transportation Research Procedia*, 3, 452-459. doi: 10.1016/j.trpro.2014.10.026

2. Atefi, R., Salari, M.Coelhoi, L.C. ve Renaud, J. (2018) The open vehicle routing problem with decoupling points, *European Journal of Operational Research*, 265(1), 316-327. doi:10.1016/j.ejor.2017.07.033

3. Bozyer, Z., Alkan, A. ve Fığlalı, A. (2014) Kapasite kısıtlı araç rotalama probleminin çözümü için önce grupla sonra rotala merkezli sezgisel algoritma önerisi, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 7(2), 29-37. doi: 10.12973/bid.2018

4. Erbao, C., Mingyong, L. ve Hongming, Y. (2014) Open vehicle routing problem with demand uncertainty and its robust strategies, *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3569-3575. doi:10.1016/j.eswa.2013.11.004

5. Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S. ve Hartl, R.F. (2016) The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations, *European Journal of Operational Research*, 252(3), 995-1018. doi: 10.1016/j.ejor.2016.01.038

6. Hung, Y.C. ve Michailidis, G. (2015) Optimal routing for electric vehicle service systems, *European Journal of Operational Research*, 247(2), 515-524. doi:10.1016/j.ejor.2015.06.013

7. Karmakar, M., ve Nandi, A.K., (2016) Trip planning for electric vehicle through optimal driving using genetic algorithm, 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2016). doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853336

8. Keskin, M. ve Çatay, B. (2016) Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 65, 111-127. doi: 10.1016/j.trc.2016.01.013

9. Lin, J., Zhou, W. ve Wolfson, O. (2016) Electric vehicle routing problem, *Transportation Research Procedia*, 12, 508-521. doi: 10.1016/j.trpro.2016.02.007

10. Mancini, S. (2017) The hybrid vehicle routing problem, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, 1-12. doi:10.1016/j.trc.2017.02.004

11. MirHassani, S.A. ve Abolghasemi, N. (2011) A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problem, *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11547-11551. doi:10.1016/j.eswa.2011.03.032

12. Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J.E. ve Villegas, J.G. (2017) The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function, *Transportation Research Part B: Methodological*, 103, 87-110. doi:10.1016/j.trb.2017.02.004

13. Murakami, K. (2017) A new model and approach to electric and diesel-powered vehicle routing, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 107, 23-37. doi:10.1016/j.tre.2017.09.004

14. Niu, Y., Yang, Z., Chen, P. ve Xiao, J. (2018) Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost, *Journal of Cleaner Production*, 171, 962-971. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.001

15. Roberti, R. ve Wen, M. (2016) The electric traveling salesman problem with time windows, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 32-52. doi: 10.1016/j.tre.2016.01.010

16. Schiffer, M., Schneider, M. ve Laporte, G. (2018) Designing sustainable mid-haul logistics networks with intra-route multi-resource facilities, *European Journal of Operational Research*, 265(2), 517-532. doi: 10.1016/j.ejor.2017.07.067

17. Schneider, M., Stenger, A. ve Goeke, D. (2014) The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations, *Transportation Science*, 48(4), 500-520. doi: 10.1287/trsc.2013.0490

18. Vaz, W., Nandi, A.K.R., Landers, R.G., Koylu, U.O., (2015) Electric vehicle range prediction for constant speed trip using multi-objective optimization, *Journal of Power Sources*, 275, 435–446. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.11.043

19. Wang, Y., Bi, J., Guan, W. ve Zhao, X. (2017) Optimising route choices for the travelling and charging of battery electric vehicles by considering multiple objectives, *Transportation Research Part* D, in press. doi: 10.1016/j.trd.2017.08.022

20. Yu, V.F., Jewpanya, P. ve Redi, A.A.N.P. (2016) Open vehicle routing problem with cross-docking, *Computers and Industrial Engineering*, 94, 6-17. doi:10.1016/j.cie.2016.01.018

21. Zhang, S., Luo, Y., ve Li, K. (2016). Multi-objective route search for electric vehicles using ant colony optimization, Proceedings of the American Control Conference, 2016 American Control Conference, ACC 2016. doi: 10.1109/ACC.2016.7524985