

Yeşil ve Elektrikli Araç Rotalama Problemleri Üzerine bir Literatür Taraması ve Araştırma Öngörülleri

A Literature Review on Green and Electric Vehicle Routing Problems and Research Perspectives

Çağrı KOÇ*
Eren ÖZCEYLAN**

Öz

Karayolu taşımacılığında son yıllarda üzerinde önemle durulan konulardan birisi yeşil lojistik kavramıdır. Konvansiyonel araçların çevreye olan zararlarını, bir diğer deyişle karbondioksit salınımlarının azaltılması için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Elektrikli araçların dağıtım faaliyetlerinde kullanılmaya başlanması ise yeni bir problemin, Elektrikli Araç Rotalama Probleminin (E-ARP) ortaya çıkmasına sebep olmuştur. E-ARP'de amaç en küçük maliyetli rotaların tespiti problemidir. Bu problemde, her müşteriye kesinlikle bir kez uğranmalı, bir rota depodan başlamalı ve tekrar depoda son bulmalı ve gerektiği takdirde şarj istasyonlarından aküleri şarj edilmeli. Bu literatür taramasında, öncelikle yeşil lojistik çerçevesinde çalışılan yeşil Araç Rotalama Problemleri incelenecek, daha sonrasında ise E-ARP üzerine yapılan çalışmalar detaylı olarak incelenecektir. Ayrıca çalışmada, gelecek için çeşitli araştırma öngörülleri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Araç rotalama problemi, Yeşil lojistik, Elektrikli araçlar, Literatür taraması.

Abstract

In recent years, green logistics has been a popular topic in road freight distribution. Many papers considered the reduction of environmental effects, i.e., CO₂ emissions, of conventional vehicles. Electric vehicles are commonly used in distribution problems which naturally introduced a new problem called as Electric Vehicle Routing Problem (E-VRP). The aim of this problem is to minimize the total distribution cost. In the E-VRP, each customer is visited once by one vehicle, each route starts and ends at the depot, vehicles can charge their batteries at charging stations, and some side constraints are satisfied. This survey paper first reviews studies on green Vehicle Routing Problem, and then on the E-VRP. The paper also proposes a number of promising research directions.

Keywords: Vehicle routing problem, Green logistics, Electric vehicles, Literature review.

Giriş

Ürün hayat çevrimlerinin kısılması ve artan müşteri beklentileri ile birlikte küresel pazarlardaki katı rekabet, firmaların kendi tedarik zincirlerine yoğunlaşmalarını ve buna daha fazla yatırım yapmalarını zorunlu hale getirmiştir. Bilgisayar, iletişim ve ulaşım teknolojisindeki gelişmeler, örneğin cep telefonu, internet, aynı gün içinde teslimat, rota belirlenmesi, tedarik zinciri ve lojistik faaliyetlerin daha etkin bir şekilde yönetilmesinde kullanılan tekniklerin evrimleşme sürecini hızlandırmıştır (Özceylan vd., 2017).

Özellikle son 30 yıl içinde hem akademisyenler hem de pratikte çalışan araştırmacılar, tedarik zinciri yönetimi üzerine yoğunlaşmış ve bununla ilgili çok sayıda kitap ve makale yayımlanmıştır. Tedarik zincirinin popüleritesini halen korumasındaki en önemli nedenlerden birisi sivil lojistik maliyetlerin oldukça yüksek olmasıdır. Council of Supply Chain Management Professionals tarafından yayımlanan bilgilere göre 2015'de ABD'deki lojistik harcamalar ABD'nin gayri safi milli hasılasının yaklaşık %8,5'ine ulaşmıştır.

Klasik tedarik zincirinde hammaddeler tedarikçilerden satın alınır ve nihai ürünler bir veya daha fazla üretim tesisinde üretilirler. Nihai ürünler buradan araç/dağıtım filosuyla için depolara taşınır ve buradan da perakendecilere ya da müşterilere dağıtılır. Böylece tedarik zinciri yönetimi tedarikçiler, üreticiler, depolar ve müşteriler arasındaki malzeme, bilgi ve para akışını etkin olarak yönetmek ve koordine etmek için kullanılan teknikler seti olarak

* Dr. Öğr. Üyesi, Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi, İşletme Bölümü, cagri.koc@asbu.edu.tr.

** Doç. Dr. Gaziantep Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, erenozceylan@gmail.com.

düşünülebilir. İyi yönetilen bir tedarik zincirinde minimum sistem maliyeti ile gerekli servis seviyesi sağlanarak doğru ürünler doğru yerde üretilir ve bu ürünler doğru araçla müşteriye/tedarikçiye ulaştırılır (Çetinkaya ve Özceylan, 2017; Demirel, 2017).

Lojistik sistemleri üzerinde yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda taşımacılık sistemlerinin en iyilenmesi üzerinde dikkatle durulduğu görülmektedir. Bunun en önemli sebeplerinden birisi taşımacılık maliyet kalemlerinin oldukça yüksek olmasıdır.

İşletmelerin, kuruluşların ve organizasyonların dağıtım sistemlerindeki süreçlerini optimize etmek ve etkin bir şekilde yönetmek amacıyla çeşitli kararlar alması gerekmektedir. Dağıtım sürecindeki en önemli kararlardan birisi de tesislerden müşterilere gerçekleştirilen olan rotalama kararlarıdır. İlk olarak Dantzig ve Ramser tarafından 1959 yılında bilimsel olarak tanımlanan Araç Rotalama Problemi (ARP), müşteri taleplerini karşılamak için bir araç filosu ile minimum maliyetli rotaların belirlenmesi problemidir. NP-zor sınıfındaki problemlerden olan ARP, sahip olduğu kısıtlara göre birçok farklı çeşide sahiptir (Toth ve Vigo, 2014).

Lojistik maliyetleri içerisinde oldukça önemli bir paya sahip olan dağıtım sistemlerinin önemli bir bileşeni olan ARP, fiziksel üretimin gerçekleştiği otomotiv, gıda, tekstil gibi bütün sektörlerde ve hizmet sektörünün kargo taşımacılığı gibi farklı alanlarında ortaya çıkmaktadır.

ARP'nin temel varsayımları şunlardır;

- Her bir müşterinin talepleri önceden bilinmektedir, belirlidir ve bölünemez;
- Müşteriler arasındaki ve depo ile müşteriler arasındaki uzaklıklar sabittir ve önceden bilinmektedir;
- Her bir araçlar aynı kapasiteye sahiptir ve depoda servis için hazır beklemektedirler.

Yukarıda belirtilen bu temel varsayımlar altında, ARP'nin amacı bütün müşterilerin taleplerini karşılayan minimum maliyetle rotaların belirlenmesidir. Yaklaşık 60 yıldır üzerinde çalışılan ARP ve birçok çeşidi üzerine oldukça zengin bir bilimsel literatür bulunmaktadır (Cordeau vd., 2007; Golden vd., 2008; Laporte, 2009; Toth ve Vigo, 2014).

Bu çalışma, literatürde son yıllarda sıklıkla üzerinde durulan ve birçok araştırmacı tarafından göz önüne alınan Yeşil ARP ve Elektrikli ARP çalışmalarını genel olarak tanıtacak, sınıflandıracak ve inceleyecektir.

Çalışmanın bundan sonraki kısımları şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci kısımda Yeşil Araç Rotalama Problemleri incelenecek, üçüncü kısımda Elektrikli Araç Rotalama Problemleri incelenecek, son kısımda ise sonuçlar ve araştırma önerileri sunulacaktır.

Yeşil Araç Rotalama Problemleri

Şirketlerin, işletmelerin, kuruluşların ve organizasyonların gelecek nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakmak için bilimsel literatürde yeşil lojistik kavramı yaygınlaşmaya başlamıştır. Doğal kaynakların tükendiği, yaşam alanlarının kısıtlandığı ve insanlar tarafından doğaya verilen zararın her gün katlanarak arttığı dünyada bu oldukça önem arz etmektedir.

Yeşil lojistik kavramı, son yıllarda üzerinde önemle durulan konulardan birisi haline gelmiştir. Araç emisyonunu optimize etmeyi amaçlayan modellerin dağıtım problemlerinde kullanılması ise özellikle son 10 yılda ortaya çıkmıştır. Bu modellerin kullanılabileceği yerlere fiziksel üretimin gerçekleştiği bütün sektörler ve kargo taşımacılığı gibi hizmet sektörünün değişik alanlarından, internet üzerinden alışverişe kadar çok geniş bir yelpazede örnekler verilebilir. Tüm bu uygulama alanlarında müşteri noktalarına dağıtımın zamanında ve etkili bir biçimde yapılması gerekmektedir.

McKinnon (2007) ve Sbihi ve Eglese (2007) karbondioksit salınımının azaltılmasının geleneksel ARP amaçlarının genişletilerek, ekonomik maliyetlerin yanında çevresel ve sosyal etkilerinin azaltılmasına da katkı sağlayacak birçok çalışmanın olabileceğini belirtmektedir. Ulaştırmanın çevre üzerinde tehlikeli etkileri vardır. Örneğin, kaynak tüketimi, alan kullanımı, toksik etkiler ekosistem üzerine önemli derecelerde zararlar verir (Knörr, 2008).

Petrol temelli yakıtların çevreye verdiği zararları engellemek ve daha yaşanabilir bir dünya için, kamu kurum ve kuruluşlarının öncülüğünde çeşitli girişimlerde bulunmaktadır. Son on yıl içerisinde çevresel etkilerin azaltılmasının, ARP ve çeşitlerinde oldukça yoğun bir şekilde göz önüne alındığını ve bu konuda birçok bilimsel çalışmanın yapıldığını gözlemlemekteyiz (Koç, 2015).

Bu konudaki ilklerden sayabileceğimiz önemli bir çalışma Erdoğan ve Miller-Hooks (Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yazarlar alternatif yakıtlı araçlar ile ARP'yi birleştiren bir problem üzerinde çalışmışlardır. Önerilen problem Yeşil ARP olarak tanımlanmıştır. Problem, en fazla rota süresini ve yakıt kısıtını göz önüne almaktadır ve çalışmada tanımlanan problemin çözümü için iki sezgisel algoritma önerilmektedir. Birinci sezgisel algoritma, Uyarlanmış Clarke ve Wright (1964) Kazanç Algoritması, ikinci sezgisel algoritma ise Yoğunluk Tabanlı Kümelenme Algoritmasıdır. Yazarlar, nümerik çalışmalarda iki test problemi kümesi belirlemişlerdir. İlk küme 40 küçük boyutlu problemden oluşan 20 müşterilik test kümesi, ikinci küme 12 büyük boyutlu problemden oluşan 500 müşteriye kadarlık olan kümedir.

Demir vd. (2011) karayolu taşımacılığında yakıt tüketimi ve sera gazı emisyonu optimizasyonu için kullanılan altı modeli analiz etmişlerdir. Bu modeller göstermektedir ki yakıt tüketimi çeşitli faktörlere bağlıdır ve bu faktörler dört ana kısımda gruplanabilir; araç, sürücü, çevre ve trafik.

Bektaş ve Laporte (2011) Çevre Kirliliği Rotalama Problemi'ni (ÇKRP) tanımlamışlardır. Bu problem, Zaman Pencereci ARP'nin farklı bir çeşididir. Araç yükünün ve hızının yol kısımları arasında değişebileceği, fakat diğer bütün parametrelerin sabit olduğu varsayılmıştır. Problemin amacı her bir yol kısmında tüketilen toplam enerji miktarını yaklaşık olarak tahmin etmektir. Tahmin edilen bu enerji miktarı doğrudan yakıt tüketimi ve sera gazı emisyonuna dönüştürülmektedir.

Demir vd. (2012), ÇKRP için bir Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama Sezgiseli (UBKAS) algoritmasını önermişlerdir. Bu metasezgisel ilk olarak klasik UBKAS algoritmasını araç rotalarını oluşturmak için kullanmış, daha sonrasında hız optimizasyonu algoritmasını her bir yol kısmındaki araç hızını optimize etmek için kullanmıştır. Daha sonraki bir çalışmada, Demir vd. (2014a) iki amaçlı ÇKRP'yi tanımlamışlardır. Bu problem eşzamanlı olarak yakıt tüketimini ve araç rota süresini en küçüklemektedir. Yazarlar, UBKAS algoritmasının modifiye edilmiş bir çeşidini geliştirmiş ve dört farklı metodu karşılaştırmışlardır. Bu metotlar; ağırlıklandırma metodu, normalizasyonlu ağırlıklandırma metodu, epsilon kısıtlı metod, ve hibrid metottur.

Zaman bağımlı ARP, pratik önemi dolayısıyla son yıllarda artan bir popülerite kazanmıştır (2015). Zaman Bağımlı ÇKRP ilk olarak Franceschetti vd. (2013) tarafından iki aşamalı planlama görüşü kapsamında önerilmiştir. Yazarlar ÇKRP amaçlarına ilave olarak trafik sıklığını dikkate alan bir modellemeyi göz önüne almış ve problem için bir matematiksel model önermişlerdir. Bu modelde, araç hızları çeşitli kesikli hız değerleri arasından optimal olarak seçilmektedir.

Koç vd. (2014), heterojen filolu ÇKRP'yi tanımlamışlardır. Problemde amaç fonksiyonu araç sabit maliyetini, yakıt-emisyon maliyetini ve sürücü maliyetini optimize

etmektedir. Yazarlar problemi matematiksel olarak tanımladıktan sonra, çözümü için çeşitli yenilikçi özellikler içeren bir genetik algoritma önermişlerdir. Kramer vd. (2015) ÇKRP, yakıt tüketimli ARP ve enerji minimizasyonlu ARP için bir matematiksel metasezgisel geliştirmişlerdir. Yazarlar, tekrarlayan yerel arama algoritmasını, küme ayrıştırma prosedürünü ve hız optimizasyonu algoritmasını birleştirmişlerdir.

Koç vd. (2016a), uzun yol araç rotalama ve çizelgeleme probleminin araç motorunun boşa çalışmasını engelleme seçeneklerinin olduğu çeşidini göz önüne almıştır. Problem, sürücü, rotalamaya bağlı olarak yakıt ve bekleme maliyetinin en küçüklenmesini amaçlamaktadır. Elektrikli Park Tesisleri ve Yardımcı Güç Ünitesi problemde göz önüne alınmıştır. Problem karma tamsayı doğrusal programlama modeli olarak tanımlanmış ve geniş kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Koç vd. (2016b), çeşitli hız bölgelerine ayrılmış olan şehir içi yük taşımacılığındaki depo yerinin, araç filosunun ve rotalama kararlarının, araç emisyon salınımı üzerindeki bütünleşik etkisini analiz etmişlerdir. Probleme, ürünlerin şehir içinde bulunan depolardan, yine şehir içinde yer alan müşterilere ulaştırılması amaçlanmaktadır. Problemi çözmek için UBKAS metasezgiseli geliştirilmiş ve çeşitli yeni test problemleri üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Depo yeri ve maliyeti, müşteri dağılımı ve heterojen araç filosu gibi problem parametrelerinin, yakıt tüketimi, emisyon salınımı ve operasyonel maliyetler gibi performans göstergeleri üzerindeki değişimlerinin etkisini analiz etmek için, geniş kapsamlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, depoların şehir içi yerine banliyölere yerleştirilmesinin ve homojen araç filosu yerine heterojen araç filosu kullanımının faydaları nümerik sonuçlarla gösterilmiştir.

Dabia vd. (2017), ÇKRP'nin farklı bir çeşidi için bir dal-fiyat algoritması önermişlerdir. Yazarlar ana problemi bir küme ayrıştırma problemi olarak, fiyatlandırma problemini ise bir hız ve başlangıç zamanlı kaynak kısıtlı en kısa yol problemi olarak göz önüne almışlardır. Sütün üretimi ve etiketlendirme algoritmaları, ana ve fiyatlandırmış problemlerin çözümleri için sırasıyla uygulanmıştır.

Eshtehadi vd. (2017), talep ve seyahat süresi belirsizliğini yeşil ulaştırma planlaması çerçevesinde incelemişlerdir. Yazarlar çeşitli gürbüz optimizasyon tekniklerini önermişlerdir. Franceschetti vd. (2017), zaman bağımlı ÇKRP için bir uyarlanabilir büyük komşuluk arama algoritması önermişlerdir. Yazarlar algoritmada çeşitli yeni bozma ve düzeltme operatörleri önermiş, geniş kapsamlı deneysel analizler gerçekleştirmiş ve önerilen yöntemin etkinliğini kanıtlamışlardır.

Yeşil karayolu taşımacılığı hakkında gerçekleştirilen çalışmalar hakkında daha ayrıntılı bilgi için; Eglese ve Bektaş (2014), Bektaş vd. (2016), Demir vd. (2014b), ve Lin vd. (2014) çalışmaları incelenebilir.

Elektrikli Araç Rotalama Problemleri

Petrol temelli yakıtların çevreye verdiği zararları engellemek ve daha yaşanabilir bir dünya için, kamu kurum ve kuruluşlarının öncülüğünde çeşitli girişimlerde bulunmaktadır. Hizmet filolarında kullanılan fosil yakıt kullanan araçların yerine, çevreye daha az zarar veren, sera gazı salınımını azaltan doğalgaz, biyodizel gibi yakıtlarla çalışan araçlar kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin, lojistik faaliyetlerinde öncü bir kuruluş olan FedEx, denizasıırı operasyonlarında biyodizel, sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) ve sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) gibi yakıtlarla çalışan Alternatif Yakıtlı Araçlar (AYA) kullanmaktadır (FedEx, 2018).

2000'li yılları ortalarından itibaren elektrikli araçların kullanımı da popülerlik kazanmaya başlamıştır. Özellikle "yeşil lojistik" kavramının dünya çapında yaygınlaşması ile birlikte elektrikli araçlara olan rağbet de artış göstermiştir (Lin vd. 2014). Günümüz

teknolojisinde kısıtlı bir akü ömrü, yüksek maliyetler, çeşitli şarj özellikleri gibi kısıtlamalara sahip olan elektrikli araçların dağıtım problemlerinde kullanılmaya başlanması filo büyüklüğü ve rotalama kararlarında klasik araçlardan farklılıklara neden olmaktadır. Özellikle akü şarj istasyonlarının klasik benzin istasyonlarına nazaran oldukça az sayıda olması, ve aküdeki şarj miktarının kısıtlı mesafelere izin vermesi elektrikli araçların rotalama kararlarının ayrı bir hususiyetle yapılmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte elektrikli araçlar birçok farklı yönden de cazip hale gelmektedir.

Çeşitli kuruluşlar tarafından yapılan birçok girişim neticesinde, gelecekte fosil yakıtların kullanımının kısıtlanacağı ve bunun yerine çevreye duyarlı olan doğayı koruyan elektrikli araçların gün geçtikçe yaygınlaşacağı beklenilmektedir. Bu yüzden elektrikli araçların kullanılması gelecek için bu hususta bir altyapı oluşturulmasını ve gün geçtikçe toplumda yaygınlaşmasını sağlayacaktır (Pelletier vd. 2016; Taefi vd. 2015).

Özellikle Avrupa ülkelerinde yapılan çeşitli çalışmalar, elektrikli araçların yük taşımacılığında kullanımı hakkında bizlere bilgi vermektedir. Kuzey Amerika'da faaliyet gösteren FedEx, General Electric, Coca-Cola, UPS, Frito-Lay, Staples, Enterprise ve Hertz gibi büyük ölçekli şirketler elektrikli araçları dağıtım ağlarında kullanmaktadırlar (Electrification Coalition, 2013). Bu araçları kullanan birçok Amerikan şirketi ABD hükûmetinden finansal açıdan destek almaktadır (US DOE, 2013).

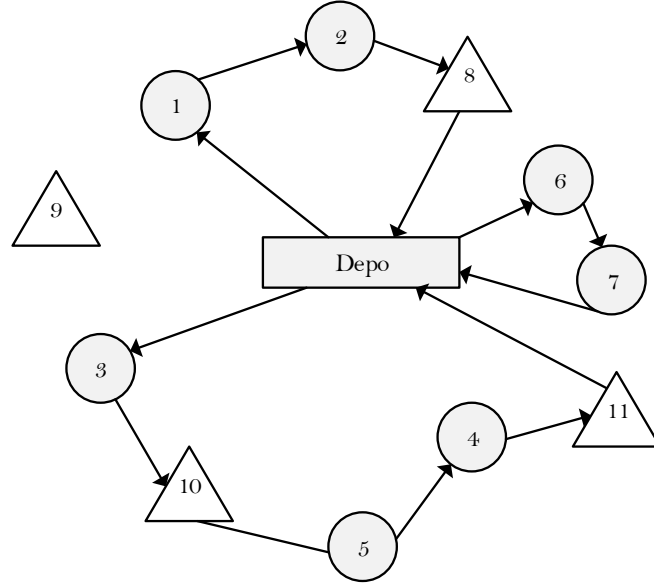
Avrupa'da faaliyet gösteren birkaç şirket üzerinde yapılan incelemeler, bu araçların günümüzde yük dağıtımında nasıl kullanıldıkları hakkında bizlere bilgi vermektedir. Bu şirketler iki aşamalı bir plan uygulamaktadırlar. İlk aşamada şehir dışında yer alan lojistik depo merkezlerine fosil yakıt kullanan araçlarla taşınan yükler, ikinci aşamada şehir içerisinde müşterilere elektrikli araçlar kullanılarak dağıtılmaktadır (Nesterova vd., 2013).

Problem Tanımı

Elektrikli Araç Rotalama Problemi (E-ARP) notasyonel olarak şu şekilde tanımlanabilir. $G = (V, A)$ bir şebeke olsun, V tüm düğümlerin kümesini ($V = "0" \cup I \cup F$), "0" depo düğümünü, I müşteri kümesini, F şarj istasyonu kümesini göstermektedir. $A = \{(i, j): i, j \in V, i \neq j\}$ düğümler arasındaki hatları tanımlamaktadır. E-ARP tanımlanan bu şebeke üzerinde aşağıdaki varsayımlar altında enküçük maliyetli rotaların tespiti problemidir:

- Her müşteriye her bir araç kesinlikle bir kez uğramalı.
- Her bir araç rotası depodan başlamalı ve tekrar depoda son bulmalı.
- Gerektiği takdirde şarj istasyonlarından doğrusal olmayan şarj fonksiyonu kullanarak araç aküleri şarj edilmeli.

Şekil 1'de yukarıda tanımlanan E-ARP için örnek bir rotalama planı sunulmuştur. Şekildeki daireler müşterileri, üçgenler ise şarj istasyonlarını göstermektedir.



Şekil 1: E-ARP için örnek bir rotalama planı

Her bir şarj istasyonunda kullanılan doğrusal olmayan şarj fonksiyonu adimsal doğrusal yaklaşımı ile modellenmiştir. Bu yaklaşım B kesme noktasından oluşan küme ile tanımlanmıştır. Her bir kesme noktası $k \in B$ şarj zamanını c_{ik} ve şarj seviyesini a_{ik} içermektedir. Müşteri talebi p_i ($i \in I$) ile ifade edilmektedir. Her bir serim üzerinde ($i, j \in A$) seyahat süresi t_{ij} ve enerji tüketimi e_{ij} mevcuttur. Müşterilere sınırsız sayıda olduğu varsayılan homojen elektrikli araçlar ile hizmet verilmektedir. Her bir elektrikli aracın Q değerinde akü kapasitesi (kWh) ve en fazla tur süre kısıtı T_{max} vardır. Her bir şarj istasyonunda sınırsız sayıda elektrikli aracın aynı anda şarj edilebileceği varsayılmaktadır. F' kümesi, F sayıda kopya kümesini ve her bir şarj istasyonunun β sayıda kopya kümesini içermektedir ($|F'| = |F| \times (1 + \beta)$), burada $1 + \beta$ değeri her bir şarj istasyonunun ziyaret edilebileceği sayıyı ifade etmektedir. Yukarıdaki tanımlanan E-ARP için karar değişkenleri aşağıda verilmiştir:

$$x_{ij} : \begin{cases} 1 & \text{eğer araç } i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne geçiyorsa } (i, j \in V) \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

τ_i : Araç $i \in V$ düğümünden ayrıldığındaki zaman.

y_i : Araç $i \in V$ düğümünden ayrıldığındaki şarj seviyesi.

q_i : Araç şarj istasyonuna $i \in F'$ ulaştığı andaki şarj seviyesi.

o_i : Araç şarj istasyonundan $i \in F'$ ayrıldığı andaki şarj seviyesi.

s_i : Araç şarj istasyonuna $i \in F'$ ulaştığı andaki şarj zamanı.

d_i : Araç şarj istasyonundan $i \in F'$ ayrıldığı andaki şarj zamanı.

Δ_i : şarj istasyonunda $i \in F'$ geçirilen zaman ($d_i - s_i$).

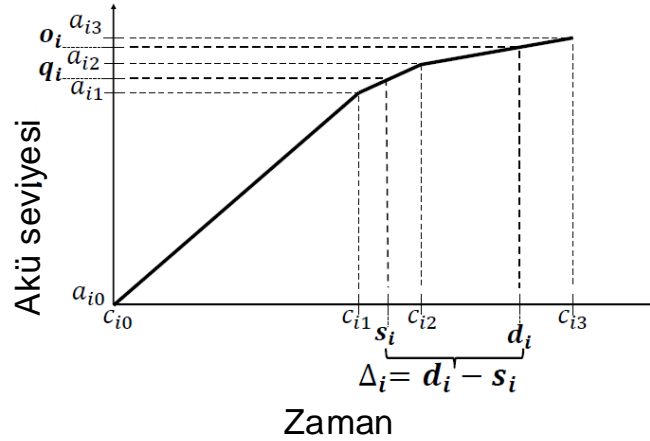
$$z_{ik} : \begin{cases} 1 & \text{eğer araç şarj istasyonuna } (i \in F') \text{ ulaştığı anda} \\ & \text{şarj seviyesi } a_{i,k-1} \text{ ve } a_{ik} \text{ arasında ise } (k \in B \setminus \{0\}) \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$w_{ik} : \begin{cases} 1 & \text{eğer araç şarj istasyonundan } (i \in F') \text{ ayrıldığı anda} \\ & \text{şarj seviyesi } a_{i,k-1} \text{ ve } a_{ik} \text{ arasında ise } (k \in B \setminus \{0\}) \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

α_{ik} : Araç şarj istasyonuna $i \in F'$ ulaştığı andaki adimsal doğrusal yaklaşım içerisinde bulunan kesme noktasının ($k \in B$) katsayısı.

λ_{ik} : Araç şarj istasyonundan $i \in F'$ ayrıldığı andaki adimsal doğrusal yaklaşım içerisinde bulunan kesme noktasının ($k \in B$) katsayısı.

Şekil 2'de, yukarıda tanımlanan rotasyonların adimsal doğrusal yaklaşımı ile kullanımına bir örnek sunulmuştur.



Şekil 2: Akü şarj seviyeleri ve şarj zamanları

E-ARP'nin, karma tamsayı doğrusal matematiksel programlama formülasyonu şu şekildedir:

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Enküçük } Z = \sum_{j \in V, i \neq j} t_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in F'} \Delta_i \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j \in V, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V, i \neq j} x_{ij} \leq 1 \quad i \in F' \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V, i \neq j} x_{ji} - \sum_{j \in V, i \neq j} x_{ij} = 0 \quad i \in V \quad (4)$$

$$e_{ij} x_{ij} - (1 - x_{ij})Q \leq y_i - y_j \leq e_{ij} x_{ij} + (1 - x_{ij})Q \quad i \in V, j \in I \quad (5)$$

$$e_{ij} x_{ij} - (1 - x_{ij})Q \leq y_i - q_j \leq e_{ij} x_{ij} + (1 - x_{ij})Q \quad i \in V, j \in F' \quad (6)$$

$$y_i \geq e_{i0} x_{i0} \quad i \in V \quad (7)$$

$$y_i = o_i \quad i \in F' \quad (8)$$

$$y_0 = Q \quad (9)$$

$$q_i \leq o_i \quad i \in F' \quad (10)$$

$$q_i = \sum_{k \in B} \alpha_{ik} a_{ik} \quad i \in F' \quad (11)$$

$$s_i = \sum_{k \in B} \alpha_{ik} c_{ik} \quad i \in F' \quad (12)$$

$$\sum_{k \in B} \alpha_{ik} = \sum_{k \in B} z_{ik} \quad i \in F' \quad (13)$$

$$\sum_{k \in B} z_{ik} = \sum_{j \in V} x_{ij} \quad i \in F' \quad (14)$$

$$\alpha_{ik} \leq z_{ik} + z_{i,k+1} \quad i \in F', k \in B \setminus \{b\} \quad (15)$$

$$\alpha_{ib} \leq z_{ib} \quad i \in F' \quad (16)$$

$$o_i = \sum_{k \in B} \lambda_{ik} a_{ik} \quad i \in F' \quad (17)$$

$$d_i = \sum_{k \in B} \lambda_{ik} c_{ik} \quad i \in F' \quad (18)$$

$$\sum_{k \in B} \lambda_{ik} = \sum_{k \in B} w_{ik} \quad i \in F' \quad (19)$$

$$\sum_{k \in B} w_{ik} = \sum_{j \in V} x_{ij} \quad i \in F' \quad (20)$$

$$\lambda_{ik} \leq w_{ik} + w_{i,k+1} \quad i \in F', k \in B \setminus \{b\} \quad (21)$$

$$\lambda_{ib} \leq w_{ib} \quad i \in F' \quad (22)$$

$$\Delta_i = d_i - s_i \quad i \in F' \quad (23)$$

$$\tau_i + (t_{ij} + p_j)x_{ij} - T_{max}(1 - x_{ij}) \leq \tau_j \quad i \in V, j \in I \quad (24)$$

$$\tau_i + \Delta_j + t_{ij}x_{ij} - (S_{max} + T_{max})(1 - x_{ij}) \leq \tau_j \quad i \in V, j \in F' \quad (25)$$

$$\tau_j + \tau_{j0} \leq T_{max} \quad j \in V \quad (26)$$

$$\tau_0 \leq T_{max} \quad (27)$$

$$x_{ij} = 0 \quad i, j \in F': m_{ij} = 1 \quad (28)$$

$$\tau_i \leq \tau_j \quad i, j \in F': m_{ij} = 1, j \leq i \quad (29)$$

$$\tau_j \leq T_{max} \sum_{i \in V} x_{ij} \quad j \in F' \quad (30)$$

$$\sum_{i \in V} x_{in} \geq \sum_{j \in V} x_{jf} \quad n, f \in F': m_{hf} = 1, n \leq i \quad (31)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i, j \in V \quad (32)$$

$$\tau_i \geq 0, y_i \geq 0 \quad i \in V \quad (33)$$

$$z_{ik} \in \{0,1\}, w_{ik} \in \{0,1\}, \alpha_{ik} \geq 0, z_{ik} \geq 0 \quad i \in F', k \in B \quad (34)$$

$$q_i \geq 0, o_i \geq 0, s_i \geq 0, d_i \geq 0, \Delta_i \geq 0 \quad i \in F'. \quad (35)$$

Matematiksel modelde (1) numaralı eşitlik ile belirtilen amaç fonksiyonu, seyahat süresi ve şarj süresini içeren toplam rota süresini en küçükmektir. (2) numaralı kısıtlar, her müşterinin bir kere ziyaret edilmesini sağlamaktadır. (3) numaralı kısıtlar, her bir şarj istasyonu kopyasının en fazla bir kere ziyaret edilmesini sağlamaktadır. (4) numaralı kısıtlar, akış kısıtlarıdır. (5) ve (6) numaralı kısıtlar, her bir düğümdeki akü şarj değerini hesaplamaktadır. (7) numaralı kısıtlar, aracın düğümde depoya döndüğü durumlarda, depoya ulaşacak kadar şarja sahip olmasını garantilemektedir. (8) numaralı kısıtlar, aracın şarj istasyonundan ayrıldığı andaki şarj durumu ile alakalıdır. (9) numaralı kısıtlar, aracın tam şarj ile depodan ayrılmasını sağlamaktadır. (10) numaralı kısıtlar, aracın herhangi bir şarj istasyonuna ulaştığı ve ayrıldığı andaki şarj değerlerini hesaplamaktadır. (11–16) numaralı kısıtlar, aracın şarj istasyonuna ulaştığı andaki şarj seviyesini ve ilgili şarj zamanını adimsal doğrusal yaklaşım fonksiyonunu göz önüne alarak hesaplamaktadır. Benzer şekilde, (17–22) numaralı kısıtlar, aracın şarj istasyonundan ayrıldığı andaki şarj seviyesini ve ilgili şarj zamanını adimsal doğrusal yaklaşım fonksiyonunu göz önüne alarak hesaplamaktadır. (23) numaralı kısıtlar, şarj istasyonunda harcanan zamanı tanımlamaktadır. (24) ve (25) numaralı kısıtlar, her bir düğümde ayrılma zamanını hesaplamaktadır. (26) ve (27) numaralı kısıtlar, aracın depoya en fazla tur süresi değerinden sonra gelmesini engellemektedir. (28–31) numaralı kısıtlar, şarj istasyonlarının kopyalarından oluşabilecek simetri sorununu ortadan kaldırmaktadır. Son olarak, (32–35) numaralı kısıtlar, işaret kısıtlarıdır. Modelde $S_{max} = \max_{i \in F'} \{c_{ib}\}$ ve m_{ij} parametresi $i \in F'$ ve $j \in F'$ aynı şarj istasyonunu ifade ediyorsa 1 değerini almaktadır.

Elektrikli Araç Rotalama Problemi Literatür Taraması

Son on yıl içerisinde çevresel etkilerin azaltılmasının, ARP ve çeşitlerinde oldukça yoğun bir şekilde göz önüne alındığını ve bu konuda birçok bilimsel çalışmanın yapıldığını gözlemlemekteyiz. Örnek olarak, Bektaş ve Laporte (2011), Demir vd. (2011, 2012, 2014a, 2014b), Koç (2015), Koç vd. (2014, 2016a, 2016b)'nin çalışmaları incelenebilir.

Bu konudaki ilklerden sayabileceğimiz önemli bir çalışma Erdoğan ve Miller-Hooks (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yazarlar alternatif yakıtlı araçlar ile ARP'yi birleştiren bir problem üzerinde çalışmışlardır. Önerilen problem Yeşil ARP (YARP), en fazla rota süresini ve yakıt kısıtını göz önüne almaktadır. Çalışmada problemin çözümü için iki sezgisel algoritma önerilmiştir. İlk sezgisel Uyarlanmış Clarke ve Wright (1964) Kazanç Algoritması, ikinci sezgisel ise Yoğunluk Tabanlı Kümelenme Algoritmasıdır. Deneysel çalışmalarında iki test problemi kümesi belirlemişlerdir. İlk küme 40 küçük boyutlu problemde oluşan 20 müşteri test kümesi, ikinci küme 12 büyük boyutlu problemde oluşan 500 müşteriye kadarlık olan kümedir.

Daha sonrasında Montoya vd. (2016) YARP'nin çözümü için çokyüzlü örneklem tabanlı bir metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama rassal tabanlı rota ilk yoğunluk ikinci sezgiselini, ikinci aşama ise küme ayrıştırma formülasyonunu kullanmaktadır.

Koç ve Karaođlan (2016), YARP'nin çözümü için bir dal-kesme algoritması geliştirmişlerdir. Çözüm yöntemi, çeşitli geçerli eşitsizlikleri kullanmakta ve tavlama benzetimi algoritması ile sonuçları iyileştirmektedir. 20 müşteriden oluşan 40 test probleminin 22'sinde optimal sonuçlar elde edilmiştir.

Felipe vd. (2014) YARP'yi elektrikli araçların kullanıldığı, parçalı şarj özelliğinin ve birden fazla şarj teknolojisinin göz önüne alındığı çeşidi üzerinde çalışmışlardır. Yazarlar problemin çözümü için yapıcı ve deterministik yerel arama algoritmaları ve tavlama benzetimi tabanlı bir metasezgisel algoritma önermişlerdir.

Schneider vd. (2014), Zaman Pencereci ve Şarj İstasyonlu EARP'ni (ZPSIEARP) tanımlamış ve bir melez metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Önerilen çözüm yönteminin temel mantığı değişken komşuluk arama ve tabu arama sezgisellerine dayanmaktadır. Yazarlar, algoritmanın etkinliğini Erdoğan ve Miller-Hooks (2012)'un test seti üzerinde denemiş ve daha sonrasında tanımladıkları problem için yeni test seti geliştirmişlerdir. Daha sonrasında, Goeke ve Schneider (2015), ZPSIEARP'nin heterojen filolu araçları göz önüne alan çeşidini tanımlamışlardır. Problem kapsamında elektrikli araçlar ve klasik içten yanmalı motora sahip araçlar birlikte kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu, hız, yol eğimi ve araç yüküne bağlı olan enerji tüketimini en küçükmektedir. Yazarlar problemin çözümü için uyarlanabilir büyük komşuluk arama tabanlı sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Hiermann vd. (2016), ZPSIEARP'nin heterojen filolu çeşidini tanımlamışlardır. Tanımlanan problemde araç filoları Goeke ve Schneider (2015)'dan farklı olarak tamamıyla elektrikli araçlara dayanmaktadır. Yazarlar çözüm yöntemi olarak bir dal-fiyat algoritması ve melez metasezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Son olarak, Desaulniers vd. (2016) Zaman Pencereci EARP için çeşitli dal-kesme-fiyat algoritmaları geliştirmişlerdir. Problemin dört farklı şarj edilebilir çeşidi aynı zamanda göz önüne alınmıştır.

Keskin ve Çatay (2016), Zaman Pencereci EARP'nin parçalı şarj özelliğini göz önüne alan çeşidini önermiş ve matematiksel olarak tanımlamışlardır. Problemin çözümü için Uyarlanabilir Büyük Komşuluk Tabanlı Yerel Arama metasezgiseli geliştirmişlerdir. Literatürde bulunan deney setleri üzerinde algoritmanın etkinliğini test etmiş ve tam şarj

çeşidini gözönüne alan problemlerde 4 yeni çözüm elde etmişlerdir. Yazarlar parçalı şarj özelliğinin çözümleri önemli oranda iyileştirebileceğini göstermişlerdir.

EARP ile alakalı yukarıda anlatılan bütün çalışmalar, problemler gerçekçi bir yaklaşım olmayan doğrusal şarj fonksiyonunu kullanmaktadırlar. Literatürde ilk olarak Montoya vd. (2017), EARP'nin doğrusal olmayan şarj fonksiyonunu kullanan çeşidini önermiş ve çalışmışlardır. Bu makalede, hibrid bir metasezgisel algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma literatürde daha önceden kullanılan çeşitli metotları ve yeni çalışılan probleme özgü prosedürleri içermektedir. Doğrusal olmayan şarj fonksiyonunun etkinliğinin anlaşılması için geniş kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, kullandıkları fonksiyonun daha gerçekçi sonuçlar sunduğunu göstermişlerdir. Yeni türetilen 120 test problemi üzerinde algoritmanın etkinliği test edilmiş, problem için önerilen matematiksel modelin optimizasyon çözücüsü ile elde edilen sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve oldukça etkili sonuçlar elde edilmiştir.

Elektrikli araçlar, EARP ve şarj teknolojileri gibi konularda daha detaylı bilgi için Juan vd. (2016), Margaritis vd. (2016) ve Pelletier vd. (2016)'nin çalışmaları incelenebilir.

Sonuçlar ve Araştırma Önerileri

Karayolu taşımacılığında dolayı oluşan karbondioksit salınımının azaltılması açısından optimizasyon konularında Yeşil ARP ile ilgili literatürde son yıllarda oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır. Özellikle Çevre Kirliliği Rotalama Problemi olarak adlandırılan problemle amaç fonksiyonu birçok farklı parametre ve değişkeni göz önüne alacak şekilde genişletilmiş ve gerçek hayatta karşılaşılan problemleri daha fazla benzerlik göstermiştir.

Bu konuyla alakalı birçok farklı versiyon çalışılabilir. Literatür incelendiği zaman genellikle metasezgisel çözüm algoritmalarının geliştirildiği görülmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda optimal çözümü bulabilecek dal-kesme, dal-kesme-fiyat gibi çeşitli kesin çözüm yöntemleri geliştirilebilir. Bunlara ilave olarak problemin stokastik versiyonu ve uygun çözüm yöntemleri çalışılabilir.

Elektrikli ARP, bilimsel literatürde özellikle son 5 yılda çalışılmaya başlanmış ve bu konudaki literatür hala olgunlaşmamıştır. Bu hususta incelenmesi gereken önemli potansiyel noktalar vardır. Problem, NP-zor yapıda olduğu ispatlanan ARP'yi içerdiği için oldukça fazla çeşidi olabilecek çok zengin bir konudur. EARP oldukça fazla potansiyel araştırma konusuna sahiptir ve bu anlamda oldukça zengindir. Literatürde şu ana kadar araştırma konularının sadece kısıtlı bir kısmına değinilmiştir.

EARP için geliştirilecek bütün modeller deterministik yapıdadır. Yani probleme ilişkin bütün parametrelerin önceden bilindiği kabul edilmiştir. Bu detaylı rotalama seviyesindeki kararların genellikle kısa bir planlama dönemi içerdiği gerçeğini yansıtmaktadır. Kısacası, planlama ufğunun başında problemin NP-zor yapıda olmasından dolayı problemle ilgili bütün bilgilerin neredeyse bilindiği kabul edilmiştir. Dolayısıyla probleme ilişkin stokastik unsurlar (örn., kesin olmayan müşteri talepleri, araç hızları, müşteriler arası seyahat zamanları vb.) ihmal edilmiştir.

EARP için potansiyel araştırma soruları aşağıdaki gibi belirlenebilir:

- i. Tek bir depodan müşteri taleplerinin karşılanması yerine, birden fazla deponun ve her bir depoya ait müşterilerin olduğu, bir başka deyişle birden fazla şirketin bir araya gelerek şarj istasyonlarını ortak olarak kullandıkları durumun problem ve çözüm yöntemi üzerindeki etkileri nelerdir?
- ii. Şarj istasyonlarının nerelere yerleştirileceğinin belli olmadığı durumda, şarj istasyonu yer seçimi kararlarının problem ve çözüm yöntemi üzerindeki etkileri nelerdir?

- iii. Homojen veya heterojen araç filosu kullanımının uygulanacak problem ve çözüm yöntemi üzerindeki etkileri nelerdir?
- iv. Birden fazla şirketin şarj istasyonlarına birlikte yatırım yaptığı durumlarda, şarj istasyonlarının kapasitelerinin göz önüne alınmasından dolayı ortaya çıkabilecek araçların senkronize bir şekilde akülerini şarj etmeleri durumunun problem ve çözüm yöntemi üzerindeki etkileri nelerdir?

Yukarıdaki araştırma sorularının ve zaman içerisinde ortaya çıkabilecek çeşitli diğer soruların cevaplarının aranmasıyla EARP'nin çeşitli versiyonları çalışılabilir ve literatüre bilimsel katkı sağlanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri SHD-2018-170 numaralı Hızlı Destek Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynakça

- Bektaş, T. & Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B*, 45, 1232–1250.
- Bektaş, T., Demir, E. & Laporte, G. (2016). Green vehicle routing, In H.N. Psaraftis (Eds), *Green Transportation Logistics: In Search of Win-Win Solutions*, 243–265: Springer, Switzerland.
- Clarke, G. & Wright, J.W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568–581.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., Savelsbergh, M.W.P. & Vigo, D. (2007). Vehicle routing. C. Barnhart & Laporte, G. (Eds), *Transportation, Handbooks in Operations Research and Management Science*, 367–428: Elsevier, Amsterdam.
- Çetinkaya, C. & Özceylan, E. (2017). Üniversite öğrencilerinin yeşil satın alma tutumlarının incelenmesine yönelik bir araştırma: Gaziantep Üniversitesi örneği. *Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 16, 289–302.
- Dabia, S., Demir, E. & Woensel, T.V. (2017). An exact approach for a variant of the pollution routing problem. *Transportation Science*, 51, 607–628.
- Dantzig, G.B. & Ramser, J. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6, 80–88.
- Demir, E., Bektaş, T. & Laporte, G. (2011). A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation. *Transportation Research Part D*, 6, 347–357.
- Demir, E., Bektaş, T. & Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 223, 346–359.
- Demir, E., Bektaş, T. & Laporte, G. (2014a). The bi-objective pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 232, 464–478.
- Demir, E., Bektaş, T. & Laporte, G. (2014b). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237, 775–793.
- Demirel, N. (2017). Ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümünde yükseltilmiş yönetmelik hedeflerini karşılamak için ağ tasarımı ve modellenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5, 223–236.
- Desaulniers, G., Errico, F., Irnich, S. & Schneider, M. (2016). Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Operations Research*, 64, 1388–1405.

- Eglese, R. & Bektaş, T. (2014). Green vehicle routing. In P. Toth & D. Vigo (Eds), *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, 437–458: MOS-SIAM Series on Optimization, Philadelphia.
- Electrification Coalition. (2013). *State of the plug-in electric vehicle market*. http://www.electrificationcoalition.org/sites/default/files/EC_State_of_PEV_Market_0_Final_1.pdf.
- Erdoğan, S. & Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E*, 48, 100–114.
- Eshtehadi, R., Fathian, M. & Demir, E. (2017). Robust solutions to the pollution-routing problem with demand and travel time uncertainty. *Transportation Research Part D*, 51, 351–363.
- FedEx. (2018). *Environmental sustainability*. <http://www.fedex.com/bt/about/sustainability/>.
- Felipe, A., Ortuno, M.T., Righini, G. & Tirado, G. (2014). A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E*, 71, 111–128.
- Franceschetti, A., Honhon, D., Van Woensel, T., Bektaş, T. & Laporte, G. (2013). The time-dependent pollution-routing problem. *Transportation Research Part B*, 56, 265–293.
- Franceschetti, A., Demir, E., Honhon, D., Van Woensel, T., Laporte, G. & Stobbe, M. (2017). A metaheuristic for the time-dependent pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 259, 972–991.
- Gendreau, M., Ghiani, G. & Guerriero, E. (2015). Time-dependent routing problems: A review. *Computers & Operations Research*, 64, 189–197.
- Goeke, D. & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245, 81–99.
- Golden, B.L., Raghavan, S. & Wasil, E.A. (2008). *The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges*, Springer, New York.
- Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S. & 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, 995–1018.
- Juan, A.A., Mendez, C.A., Faulin, J., Armas, J. & Grasman, S.E. (2016). Electric vehicles in logistics and transportation: A survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges. *Energies*, 9, 1–21.
- Knörr, W. (2008). *EcoTransIT: Ecological transport information tool – environmental methodology and data*, Technical report, Institut für Energie (ifeu) und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Germany.
- Keskin, M., & Çatay, B., (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C*, 65, 111–127.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O. & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B*, 70, 239–254.
- Koç, Ç. (2015). *Heterogeneous location- and pollution-routing problems*, Ph.D. Thesis, University of Southampton, Southampton.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O. & Laporte, G. (2016a). A comparison of three idling options in long-haul truck scheduling. *Transportation Research Part B*, 93, 631–647.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O. & Laporte, G. (2016b). The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics. *Transportation Research Part B*, 84, 81–102.
- Koç, Ç. & Karaoglan, I. (2016). The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach. *Applied Soft Computing*, 39, 154–164.

- Kramer, R., Subramanian, A., Vidal, T. & Lucídio dos Anjos, F.C. (2015). A matheuristic approach for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 243, 523–539.
- Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43, 408–416.
- Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Chung, S.H. & Lam, H.Y. (2014). Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41, 1118–1138.
- Margaritis, D., Anagnostopoulou, A., Tromaras, A. & Boile, M. (2016). Electric commercial vehicles: Practical perspectives and future research directions. *Research in Transportation Business & Management*, 18, 4–10.
- McKinnon, A. (2007). *CO₂ Emissions from freight transport in the UK*. Technical Report, Prepared for the Climate Change Working Group of the Commission for Integrated Transport, London.
- Mock, P. & Yang, Z. (2014). *Driving electrification: A global comparison of fiscal incentive policy for electric vehicles*, The International Council on Clean Transportation, Washington DC.
- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J.E. & Villegas, J.G. (2016). A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part C*, 70, 113–128.
- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J.E. & Villegas, J.G. (2017). A hybrid metaheuristic for the electric vehicle routing problem with partial charging and nonlinear charging function. *Transportation Research Part B*, 103, 87–110.
- Nesterova, N., Quak, H., Balm, S., Roche-Cerasi, I. & Tretvik, T. (2013). *State of the art of the electric freight vehicles implementation in city logistics*. TNO, Delft, Netherlands.
- Özceylan, E., Demirel, N., Çetinkaya, C. & Demirel, E. (2017). A closed-loop supply chain network design for automotive industry in Turkey. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 727–745.
- Pelletier, S., Jabali, O. & Laporte, G. (2016). Goods distribution with electric vehicles: Review and research perspectives. *Transportation Science*, 50, 3–22.
- Sbihi, A. & Eglese, R.W. (2007). Combinatorial optimization and green logistics. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 5, 99–116.
- Schneider, M., Stenger, A. & Goetze, D. (2014). The electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, 48, 500–520.
- Taefi, T.T., Kreutzfeldt, J., Held, T., Konings, R., Kotter, R., Lilley, S. & Baster, H. (2015). *Comparative analysis of European examples of freight electric vehicles schemes: A systematic case study approach with examples from Denmark, Germany, the Netherlands, Sweden and the UK*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Toth, P. & Vigo, D. (2014). *Vehicle routing: Problems, methods, and applications*, MOS-SIAM Series on Optimization, Philadelphia.
- U.S. DOE. (2013). *The United States of America Department of Energy, Smith and Navistar electric and plug-in hybrid electric vehicle testing*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, National Renewable Energy Laboratory.