



Bi-Objective green vehicle routing problem minimizing carbon emissions and maximizing service level

Özgür Kabadurmuş*^{ID}, Mehmet Serdar Erdoğan^{ID}

International Logistics Management, Faculty of Management, Yasar University, Izmir, 35100, Türkiye

Highlights:

- A novel Bi-objective Green Vehicle Routing Problem was developed.
- A Mixed-Integer Linear Programming model was formulated and the exact ϵ -constraint method was used to solve it.
- The model was tested on six realistically designed hypothetical case studies.

Keywords:

- Green vehicle routing problem
- Carbon emissions
- Service level
- Alternative Fuel Vehicles
- Epsilon Constraint
- Multi-Objective Optimization

Article Info:

Research Article
Received: 15.10.2019
Accepted: 24.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.633583

Correspondence:

Author: Özgür Kabadurmuş
e-mail:
ozgur.kabadurmus@yasar.edu.tr
phone: +90 232-570 8953

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a bi-objective Green Vehicle Routing Problem (GVRP) is presented to minimize total carbon emissions and maximize the service level. Figure A shows the Pareto-optimal solutions for the Turkey scenario. According to Figure A, minimizing carbon emissions and maximizing service level are two conflicting objectives. As carbon emission decreases, service level also decreases.

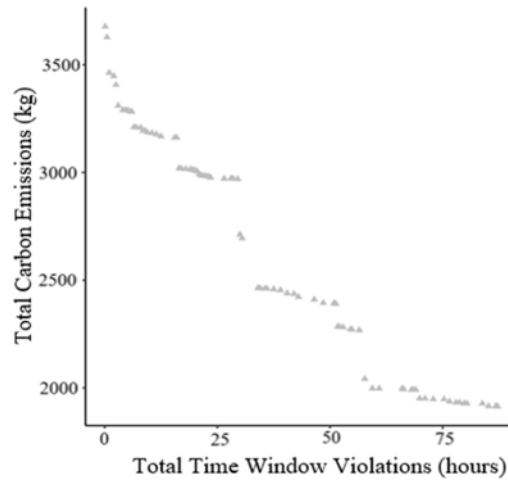


Figure A. Pareto-optimal solutions for the Turkey scenario

Purpose: The aim of the study is to investigate the tradeoffs between carbon emissions and service quality in cargo distribution. Carbon emission is proportional to the total distance traveled, while service quality is estimated by the total violation of the customers' time windows. The study introduces a novel Bi-objective Green Vehicle Routing Problem by developing a mathematical model and solution methodology for the problem. Green Vehicle Routing Problem aims to improve routing decisions of companies using Alternative Fuel Vehicles to reduce carbon emissions. Due to the limited number of Alternative Fuel Stations, the routing decisions of alternative fuel vehicles are more critical and difficult.

Theory and Methods: A Mixed-Integer Linear Programming model is developed for the problem. To solve the problem for carbon emissions and service quality, a heuristic method using k -means clustering and ϵ -constraint is developed to generate all Pareto-optimal solutions. The proposed heuristic method clusters a scenario into k customer groups according to their distances. Then each subproblem is solved with the ϵ -constraint method and the results of each sub scenario are combined at the end to obtain the Pareto-optimal solutions.

Results: Pareto-optimal solutions are obtained for seven case studies. As the service level increases, total carbon emission also increases. In addition, as service level increases, more Alternative Fuel Vehicles and Alternative Fuel Stations are used. Increasing service level by decreasing time windows violation requires not only increasing carbon emissions but also increasing total distance and cost. Also, the number of routes (and vehicles) reduces as the total carbon emission decreases.

Conclusion: Further study should consider improving the proposed heuristic method. In addition, the model can be extended by considering a heterogeneous fleet and multiple depots.



Karbon salınımını azaltan ve hizmet kalitesini arttıran iki amaçlı yeşil araç rotalama problemi

Özgür Kabadurmuş*^{ID}, Mehmet Serdar Erdoğan^{ID}

Yaşar Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Uluslararası Lojistik Yönetimi Bölümü, 35100, İzmir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yeni bir İki Amaçlı Yeşil Araç Yönlendirme Problemi geliştirildi
- Bir Karma Tamsayı Doğrusal Programlama modeli formüle edildi ve bunu çözmek için tam ϵ -kısıtlama yöntemi kullanıldı
- Model, gerçekçi olarak tasarlanmış altı varsayımsal vaka çalışması üzerinde test edildi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.10.2019

Kabul: 24.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.633583

Anahtar Kelimeler:

Yeşil araç rotalama problemi,
karbon salınımı,
hizmet seviyesi,
alternatif yakıtlı araçlar,
epsilon kısıtı,
çok amaçlı optimizasyon

ÖZ

Bu makalede, optimizasyon literatüründe çok çalışılmış olan Araç Rotalama Probleminin bir genişletmesi olarak iki amaçlı Yeşil Araç Rotalama Problemi tasarlanmıştır. Yeşil Araç Rotalama Problemi, karbon salınımını azaltmak amacıyla Alternatif Yakıtlı Araçlar kullanan firmaların rotalama ile ilgili kararlarını en iyilemeyi amaçlar. Geliştirilmiş olan bu problem, karbon salınımını en aza indirmek ve hizmet seviyesini en üst düzeye çıkarmak üzere birbiriyle çelişen iki amaca sahiptir. Karbon salınımı toplam rota mesafesi ile orantılı olarak ele alınırken, kargo teslimlerinde müşterilerin zaman penceresi ihlali bir hizmet seviyesi göstergesi olarak ele alınmıştır. Problem, Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama olarak modellenmiş ve çok amaçlı en iyileme yöntemi olan epsilon-kısıtı (ϵ -kısıtı) yöntemi ile çözülmüştür. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise kümeleme bazlı bir sezgisel geliştirilmiştir. Hazırlanmış olan bu sezgisel yöntem, karışık tamsayı doğrusal programlama modeli ile bulunan Pareto-optimal sonuçlara yakın sonuçlar bularak iyi bir performans ortaya koymuştur. Hazırlanmış olduğumuz matematiksel model ve sezgisel çözüm yöntemi, gerçekçi olarak oluşturduğumuz varsayımsal 7 vaka çalışmasında test edilmiştir. Sonuçlara göre karbon salınımını en aza indirmek ve hizmet seviyesini en üst düzeye çıkarmak çelişmekte olan iki amaçtır. Hizmet seviyesi arttıkça kullanılan araç sayısı ve karbon salınımı da artmaktadır. Karbon salınımı artıp, zaman penceresi ihlali azaldıkça daha çok araç alternatif yakıt istasyonu kullanılmaktadır.

Bi-Objective green vehicle routing problem minimizing carbon emissions and maximizing service level

H I G H L I G H T S

- A novel Bi-objective Green Vehicle Routing Problem was developed
- A Mixed-Integer Linear Programming model was formulated and the exact ϵ -constraint method was used to solve it
- The model was tested on six realistically designed hypothetical case studies

Article Info

Research Article

Received: 15.10.2019

Accepted: 24.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.633583

Keywords:

Green vehicle routing problem,
carbon emission,
service level,
alternative fuel vehicles,
epsilon constraint,
multi-objective optimization

ABSTRACT

In this study, a bi-objective Green Vehicle Routing Problem is presented as an extension of the well-known Vehicle Routing Problem. Green Vehicle Routing Problem aims to improve routing decisions of companies using Alternative Fuel Vehicles to reduce carbon emissions. The presented problem herein has two objectives that are the minimization of total carbon emissions and the maximization of service level. While total carbon emission is assumed to be proportional to total distance, cargo delivery time window violations of customers are considered as an indicator of service level. The problem was modeled as Mixed-Integer Linear Programming and ϵ -constraint method, which is a multi-objective optimization method, is developed to solve it. To effectively solve large problem instances, a clustering-based heuristic method is proposed. The heuristic method achieved a good performance by finding near Pareto-optimal solutions that are found by the MILP model. Our proposed mathematical model and heuristic method are tested on seven realistically designed hypothetical case studies. According to the results, the minimization of carbon emission and maximization of service level are two conflicting objectives. As the service level increases, the number of vehicles and carbon emissions also increase. As carbon emission increases and time windows violation decreases, more vehicles and alternative fuel stations are used.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors: *ozgur.kabadurmus@yasar.edu.tr, mehmet.erdogan@yasar.edu.tr /
Tel: +90 232-570 8953

1. Giriş (Introduction)

Tedarik zinciri, tedarikçiler, üretim fabrikaları, depolar ve müşteriler gibi çeşitli öğeleri içerir. Tedarik zincir yönetimi, bu öğeler arasındaki tüm faaliyetleri (üretim / dağıtım planlaması, tedarikçi seçimi, stok kontrolü, talep tahminlemesi vb.) düzenlemenin sağlanmasıdır [1]. Her bir faaliyet detaylı bir süreç analizi ve etkili bir karar verme işlemi gerektirir. Bunların arasında, dağıtımın maliyetli tedarik zinciri faaliyetlerinden biridir. Dağıtımla ilgili alınan yanlış kararlar, yüksek miktarda finansal kayıplara ve uzun vadede müşteri memnuniyetinin düşmesine sebep olabilir. Bu nedenle, yöneticiler dağıtımla ilgili kararlar alırken, dağıtım ağını ve ağdaki müşterilerin beklentilerini detaylıca analiz etmeli ve sayısal karar verme yöntemlerinden faydalanmalıdırlar. İyi bir dağıtım planlaması yapmak, dağıtım noktalarının sayısına bağlı olarak artan problem karmaşıklığından dolayı zor bir iştir. Firmalar mesai saatleri, nakliye aracı kapasitesi, nakliye aracı trafiğe çıkış yasağı saatleri gibi pek çok kısıt altında dağıtım için en iyi rotaları bulmaya çaba sarf etmektedirler. Ancak pratikte en iyi rotaların bulunması genellikle analitik bir yöntemle dayanmamakta, bunun yerine geçmiş tecrübelerle gerçekleştirilmektedir. Bu durum da beraberinde bir çok maliyet dezavantajı getirmektedir.

Ayrıca, yeni teknolojilere ve global olarak ortaya çıkan yeni gereksinimlere adapte olma gerekliliği firmaların karşısına yeni zorluklar çıkarmaktadır. Örneğin, giderek artan küresel ısınma farkındalığı, firmaların operasyonlarını daha çevre dostu bir şekilde gerçekleştirmeye ve daha çevre dostu teknolojik ekipmanlar kullanmaya yönelmektedir. Firmalar, karbon salınımını azaltmak adına elektrik, etanol ve propan gibi petrol dışı yakıt tüketen Alternatif Yakıtlı Araçlar kullanmaya başlamışlardır [2]. Ancak, bu araçlara hizmet verebilecek Alternatif Yakıt İstasyonlarının sayısı yeterli değildir. Bu durum, araçların mevcut istasyonlara ulaşmak için rotalarından sapmalarına sebep olabileceği için alternatif yakıtlı araçlar ile dağıtım yapma imkanını kısıtlamakta ve en iyileme modelinin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, homojen bir alternatif yakıtlı araç filosu ve alternatif yakıt istasyonlarını içeren yeni bir iki amaçlı Yeşil Araç Rotalama Problemi formüle edilmiştir. Müşterilerin ürünlerin teslimi için talep ettiği zaman penceresi, modelde göz önünde bulundurulmuştur ve hizmet seviyesini düşürmesinden dolayı müşteri memnuniyetsizliğine sebep olan zaman aralığı ihlali modelde ele alınmıştır. Formüle edilmiş olan bu problem, toplam karbon salınımını en aza indirmek ve hizmet seviyesi en yüksek düzeye çıkarmak üzere iki amaca sahiptir. Bu haliyle bu makalede geliştirilen bu yeni model literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Ayrıca, çözüm yöntemi olarak Bérubé vd. [3] tarafından geliştirilen bir çok amaçlı en iyileme yöntemi olan “Kesin ϵ -kısıtı” (Exact ϵ -constraint) yöntemi baz alınmıştır. Bu sayede önerilen çok amaçlı en iyileme modeli değişik karbon salınımı ve hizmet seviyesi düzeylerindeki çözümlerin hepsini oluşturarak karar vericiye seçmesi için bu birbirleriyle çelişen amaç fonksiyonu sonuçlarını sunmaktadır. Önerilen modeli ve çözüm yöntemini test etmek için gerçekçi verilere dayanan iki varsayımsal vaka analizi yapılmıştır. Birinci vaka analizinde İzmir içi dağıtımı ele alınmış, ikincisinde ise Ege Bölgesi dağıtımı planlanmıştır. Her iki vaka analizinde de üç farklı büyüklükte senaryo ele alınmıştır. İki amaç fonksiyonunun birbiri ile olan ilişkisi, bunların rota oluşumlarına olan etkileri ve şehir içi ve şehirler arası dağıtımdaki sonuçların farkları tartışılmıştır. Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde, konuyla ilgili araç rotalama problemleri ve bu problemlerin çözüm yöntemlerine ilişkin kaynak taraması yer almaktadır. Üçüncü bölümde, hazırlanmış olduğumuz matematiksel model sunulmuştur. Dördüncü bölümde, problemin çözümü için kullanılan çok amaçlı optimizasyon yöntemi açıklanmıştır. Geliştirilen modelin test edildiği vaka çalışmaları ve sonuçları beşinci

bölümde sunulmuştur. Son bölümde ise çalışmanın sonuçlarına ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara dair değerlendirmeler yapılmıştır.

2. Kaynak Taraması (Literature Review)

Müşterilerin zaman penceresi, Araç Rotalama Problemi literatüründeki pek çok çalışmada göz önünde bulundurulmuştur. Zaman penceresi mevcut olduğunda, araçlar müşterilere istenen zaman dilimi içerisinde uğramalıdır. Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi, ilk olarak Savelsbergh [4] tarafından ortaya atılmıştır. Dumas vd. [5], bazı müşterilerin toplama bazı müşterilerin ise teslimat hizmeti talep ettiği Zaman Pencereci Topla Dağıt Araç Rotalama Problemini geliştirmişlerdir. Hazırladıkları modelde, hem toplama hem de teslimat operasyonları, belirli bir zaman penceresi içerisinde gerçekleştirilmektedir. Ürünler, önce toplama talep eden müşterilerden teslim alınıp, daha sonra teslimat talep eden müşterilere teslim edilmektedir. Mingyong ve Erbao [6] ve Huang vd. [7] ise yine Zaman Pencereci Topla Dağıt problemini ele almışlardır ancak diğer problemlerden farklı olarak, müşteriler aynı anda hem toplama hem de teslimat hizmeti talep etmektedirler ve bu iki hizmet tek bir ziyarette gerçekleştirilmektedir. Ho ve Haugland [8], müşteri talebinin birden fazla ziyaret ile karşılanabileceği parçalı teslimata izin vererek Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemini genişletmişlerdir. Bir başka çalışmada, Hiermann vd. [9], heterojen elektrikli araç filosu ve araç şarj istasyonlarını göz önünde bulundurarak Zaman Pencereci Araç Rotalama problemini genişletmişlerdir. Macrina vd. [10] modellerinde araç şarj istasyonlarında araç depolarının kısmi dolumuna izin vermiştir. Keskin vd. [11]’nin modellerinde ise araç şarj istasyonları sınırlı kapasiteye sahiptir ve araçlar şarj olmadan önce kuyruğa girmek zorundadır. Bu çalışmalardan farklı olarak, bu makalede geliştirilen modelde ise araçlar tamamen şarj edilmektedir. Niu vd. [12], çalışmalarında araçların depoya geri dönmediği Zaman Pencereci Yeşil Açık Araç Rotalama Problemini formüle etmişlerdir. Tang vd. [13] ise hizmet seviyesinin müşterilerin zaman penceresi ihlaline göre belirlendiği bulanık zaman penceresini çalışmalarında göz önünde bulundurulmuşlardır. Bu çalışmaların hiçbirini birden fazla sayıda amaç fonksiyonunu dikkate almamaktadır.

Literatürdeki çeşitli çalışmalarda, dağıtım operasyonlarından kaynaklanan karbon salınımı modele eklenerek, Araç Rotalama Problemi’nin çevresel boyutu incelenmiştir. Figliozzi [14], Huang vd. [7], Zhang vd. [15], Niu vd. [12], Bektaş ve Laporte [16], Franceschetti vd. [17], Koç vd. [18], Li vd. [19]. ve Li vd. [20], çalışmalarında karbon salınımını bir maliyet unsuru olarak amaç fonksiyonuna eklemişlerdir. Karbon salınımı, Niu vd. [12] ve Zhang vd. [15]’nin modellerinde bu makalede geliştirilen modele benzer şekilde sadece rota mesafesi ile orantılı olarak ele alınmıştır. Figliozzi [14] ve Li vd. [19]’nin geliştirdiği modellerde ise karbon salınımı, toplam seyahat mesafesi ve süresi ile orantılı olarak ele alınırken, Huang vd. [7]’nin modelinde karbon salınımını sadece mesafe ve süre ile değil, araç doluluğu ile de orantılandırmıştır. Koç vd. [18], Franceschetti vd. [17], Bektaş ve Laporte [16] ve Li vd. [20] ise modellerinde karbon salınımını, mesafe, araç doluluğu ve araç hızındaki farklılıklara orantılı olarak ele almışlardır. Ayrıca, Kwon vd. [21] ve Shen vd. [22], kısa süreli karbon ticaretini modellerinde hesaba katmış ve karbon ticaretinden kaynaklanan maliyeti (veya karı) amaç fonksiyonuna eklemişlerdir. Bunlardan başka, Adiba vd. [23], amaç fonksiyonunda homojen bir araç filosunun toplam karbon salınımını en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Adiba vd. [23] tarafından geliştirilen modelde, bu çalışmaya benzer şekilde, karbon salınımı rota mesafesine orantılı olarak ele alınmıştır. Ehmke vd. [24] kentsel bölgelerde trafik sıkışıklığı dolayısıyla değişen araç hızını göz önünde bulundurarak karbon salınımını araç hızı ve doluluğunun bir fonksiyonu olarak ele almıştır. Liu vd. [25] ise heterojen bir araç filosunun toplam karbon salınımını en aza indirgeyen bir amaç

fonksiyonunu modele eklemiş ve karbon salınımını rota mesafesi ve araç doluluğu ile orantılı olarak ele almışlardır. Erdogan ve Hooks [2], bu çalışmaya benzer şekilde alternatif yakıtlı araçları ve alternatif yakıt istasyonlarını içeren ve toplam mesafeyi en aza indiren tek amaçlı Yeşil Araç Rotalama Problemini geliştirmişlerdir. Kabadurmuş vd. [26]'nin çalışmalarında, Erdogan ve Hooks [2]'un Yeşil Araç Rotalama Problemi iki amaçlı hale getirilmiştir. Problemden, karbon salınımı ve maksimum rota süresi en aza indirgenmiştir. Literatürde çok amaçlı Yeşil Araç Rotalama Problemleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Xiao ve Konak [27], modellerinde trafik sıkışıklığı sebebiyle değişiklik gösteren seyahat sürelerini göz önünde bulundurarak toplam karbon salınımını ve ağırlıklı gecikmeyi en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Demir vd. [28]'nin iki amaçlı modeli ise amaç fonksiyonunda yakıt tüketimini ve seyahat hızını en aza indirmeyi hedeflemektedir. Poonthalir ve Nadarajan [29] geliştirdikleri Yakıt Etkin Yeşil Araç Rotalama probleminde rota maliyetini ve yakıt tüketimini en aza indirmişlerdir. Li vd. [30]'nin modelinde ise maliyet, zaman ve emisyon minimizasyonu ve kar maksimizasyonu olmak üzere dört amaç fonksiyonu bulunmaktadır.

Araç rotalama literatüründe, sadece birkaç çalışma amaç fonksiyonunda karbon salınımını en aza indirmeyi hedeflemiştir ve bu çalışmalar da hazırlanmış olan modelde ele alınan müşterilerin zaman penceresini ve zaman penceresi ihlalini ele almamışlardır. Bu nedenle bu çalışmada literatüre yeni bir model sunulmuştur.

Araç rotalama problemlerinin çözümünde kullanılan yöntemleri ele alacak olursak, Xiao ve Konak [27] ve Liu vd. [25] modellerini çözmek için Genetik Algoritma kullanırlarken, Adiba vd. [19], Melez Karınca Koloni Algoritması kullanmışlardır. Kwon vd. [21], Niu vd. [12], Zhong ve Cole [31] ve Ho ve Haugland [8] araç rotalama modellerini çözmek için Tabu Arama algoritması geliştirmişlerdir. Demir vd. [32], Adaptif Geniş Komşuluk Arama sezgisel yöntemi geliştirenlerken, Kececi vd. [33], Clarke-Wright Tasarruf (CWT) algoritmasının bir uyarlaması olan bir kurucu sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Mingyong ve Erbao [6], geliştirilmiş Diferansiyel Gelişim Algoritması kullanırlarken, Hierman vd. [9], Adaptif Geniş Komşuluk Arama Algoritması'yla birleşik bir Dalandırma ve Fiyatlandırma algoritması geliştirmişlerdir. Kabadurmuş vd. [26] ve Demir vd. [28], bu çalışmadaki çözüm yöntemine benzer şekilde, ϵ -kısıtlı yöntemi kullanmışlardır. Ancak, Kabadurmuş vd. [26] bu çalışmadan farklı olarak amaç fonksiyonlarında toplam dağıtım süresi ve karbon emisyonunu en azlamışlardır. Demir vd. [28] ise bu çalışmadaki yöntemden farklı olarak, yöntemi adaptif ağırlıklandırma yöntemiyle birleştirmişlerdir. Leggeri ve Haouari [34] Yeşil Araç Rotalama Problemine kompakt bir karışık tamsayılı doğrusal programlama formülasyonu geliştirerek problemin orta ölçekli örneklerine optimum çözüm getirmiştir. Koç ve Karaoglan [35] ise çalışmalarında Yeşil Araç Rotalama Problemi için Benzetimli Tavlama tabanlı bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Andelmin ve Bartolini [36] de Yeşil Araç Rotalama Problemini bir küme bölümlenme problemi olarak modelleyerek problem için bir kesin çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Vincent vd. [37] ise Yeşil Araç Rotalama probleminin bir genişletmesi olan Melez Araç Rotalama Problemi'nin çözümü için yeniden başlatma stratejisi kullanan bir Benzetimli Tavlama algoritması geliştirmişlerdir. Bu çalışmada ise orta ve büyük ölçekteki gerçekçi problemlerin çözümü için kümeleme analizi temelli bir sezgisel yöntem önerilmiştir.

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

Bu çalışmada geliştirilmiş olan model, Erdogan ve Hooks [2]'un modelini temel alıp, zaman penceresi ve hizmet kalitesi amaç fonksiyonları eklenerek ve iki amaçlı hale getirilerek geliştirilmiştir. Bu eklenen amaç fonksiyonları dışında, modelde farklı kısıtlar ve

varsayımlar da ele alınmıştır. Şöyle ki, problem, tek bir depodan çıkış yapıp aynı depoya geri dönüş yapacak olan homojen bir alternatif yakıtlı araç filosu ile tüm müşterilerin taleplerini karşılamayı hedefler. Depoda bulunan alternatif yakıtlı araç sayısı sınırlıdır ve araçların yakıt depolarını doldurabilecekleri alternatif yakıt istasyonları modelde göz önünde bulundurulmuştur. Modelde, alternatif yakıt istasyonlarını ziyaret eden araçların yakıt depolarını tamamen doldurdukları varsayılmıştır. Bir alternatif yakıtlı araç, bir alternatif yakıt istasyonunu en fazla bir kere ziyaret edebilir. Bu durum bir alternatif yakıt istasyonunun bir rotada en fazla bir kere ziyaret edilebileceği anlamına gelmektedir. Rota süresini kısıtlayan maksimum çalışma süresi kısıtı da modelde mevcuttur. Ayrıca, her müşterinin ziyaret edilmeyi talep ettiği bir zaman penceresi vardır. Ancak bu zaman penceresi ihlal edilebilir şekilde modellenmiştir. İhlal edilen zaman penceresi süresine orantılı olarak hizmet seviyesinin azaldığı varsayılmıştır. Toplam zaman penceresi ihlalini azaltabilmek ve modelde gerçekçiliği sağlayabilmek adına araçların depodan çıkış zamanı kısıtlanmamıştır. Hazırlanmış olduğumuz model, iki amaçlı olarak olarak formüle edilmiştir. İlk amaç fonksiyonu, toplam mesafe ile orantılı olan toplam karbon salınımını en aza indirmeyi hedeflerken, ikinci amaç fonksiyonu, zaman penceresi ihlaline bağlı olan hizmet seviyesini en üst düzeye çıkarmayı hedeflemektedir. Matematiksel model şu şekilde formüle edilmiştir:

Kümeler:

D	: Depo Kümesi
C	: Müşteriler Kümesi
F	: Alternatif Yakıt İstasyonları Kümesi
F_0	: Depo ve Alternatif Yakıt İstasyonları Kümesi: $D \cup F$
K	: Alternatif Yakıtlı Araçlar Kümesi
V	: Tüm Düğüm Kümesi: $D \cup C \cup F$
E	: Kenarlar Kümesi: $(v_i, v_j): v_i, v_j \in V$

Parametreler:

d_{ij}	: düğümünden j düğümüne olan mesafe: $(i, j) \in E$
M	: Yeteri kadar büyük bir sayı
Q	: Araç tank kapasitesi
r	: Bir alternatif yakıtlı aracın kilometre başına yakıt kullanım miktarı (kg)
s_i	: i düğümündeki hizmet süresi: $i \in V$
t_{ij}	: i düğümünden j düğümüne gidiş süresi: $(i, j) \in E$
T_{max}	: Maksimum rota süresi (günlük çalışma süresi)
α	: Bir alternatif yakıtlı aracın kilometre başına yaptığı karbon salınımı miktarı (kg)

Karar Değişkenleri:

x_{ijk}	:
$\begin{cases} 1, & \text{Eğer bir } k \text{ aracı } i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne gidiyorsa;} \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases}$	
y_j	: Araç j düğümüne vardığında aracın deposundaki yakıt miktarı. Araç, alternatif yakıt istasyonuna vardığında Q 'ya eşitlenir.
τ_{jk}	: Bir k aracının j düğümüne varış zamanı.
v_i^e	: i müşterisinin zaman penceresinin, müşteriye erken varış dolayısıyla gerçekleşen ihlal miktarı.
v_i^l	: i müşterisinin zaman penceresinin, müşteriye geç varış dolayısıyla gerçekleşen ihlal miktarı.

Karbon Salınımını En Aza İndirgeme Amaç Fonksiyonu:

Problemin ilk amaç fonksiyonu, dağıtım operasyonundan kaynaklanan karbon salınımını en aza indirmektir. Toplam karbon

salınımı, kilometre başına karbon salınımı miktarı ile araçların katettiği toplam mesafenin çarpımıyla elde edilmiştir. Karbon salınımını en aza indirmeye amaç fonksiyonu, Eş. 1'de gösterilmiştir.

$$\text{Min} \sum_{j \in V: i \neq j} \sum_{k \in K} \alpha d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Hizmet Seviyesini En Üst Düzeye Çıkarma Amaç Fonksiyonu:

Problemin ikinci amaç fonksiyonu zaman penceresi ihlalini en aza indirgeyerek toplam hizmet seviyesini en üst düzeye çıkarmaktır. Hizmet seviyesini en üst düzeye çıkarma amaç fonksiyonu, Eş. 2'de gösterilmiştir.

$$\text{Min} \sum_{i \in V} (v_i^e + v_i^l) \quad (2)$$

Modeldeki kısıtlar aşağıdaki gibidir:
s.t

$$\sum_{j \in V: i \neq j} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V: i \neq j} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in F, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V: i \neq j} x_{ijk} - \sum_{i \in V: i \neq j} x_{jik} = 0 \quad \forall j \in V, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$x_{iik} = 0 \quad \forall i \in V, k \in K \quad (7)$$

$$\tau_{jk} \geq \tau_{ik} + (t_{ij} + p_i)x_{ijk} - T \max(1 - x_{ijk}) \\ \forall i \in V, j \in V \setminus \{0\} \text{ ve } i \neq j, k \in K \quad (8)$$

$$\tau_{jk} \leq \tau_{ik} + (t_{ij} + p_i)x_{ijk} + T \max(1 - x_{ijk}) \\ \forall i \in V, j \in V \setminus \{0\} \text{ ve } i \neq j, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} \tau_{jk} \leq T \max - (t_{j0} + p_j) \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (10)$$

$$\tau_{ik} \leq (\sum_{j \in V} x_{ijk})M \quad \forall i \in V, k \in K \quad (11)$$

$$a_i - v_i^e \leq \sum_{k \in K} \tau_{ik} \leq b_i + v_i^l \quad \forall i \in C \quad (12)$$

$$y_j \leq y_i - r d_{ij} \sum_{k \in K} x_{ijk} + Q(1 - \sum_{k \in K} x_{ijk}) \\ \forall j \in C, i \in V \text{ ve } i \neq j \quad (13)$$

$$y_j = Q \quad \forall j \in F_0 \quad (14)$$

$$y_j \geq \min\{r d_{j0}, r(d_{ji} + d_{i0})\} \quad \forall j \in C, i \in F \quad (15)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (16)$$

$$y_j, \tau_{jk}, v_i^e \text{ ve } v_i^l \geq 0 \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (17)$$

Eş. 3 bir müşterinin, yalnızca bir araç tarafından bir defa ziyaret edilmesini sağlarken, Eş. 4 bir aracın her bir alternatif yakıt istasyonunu en fazla bir kez ziyaret etmesini sağlamaktadır. Eş. 5 numaralı kısıt denge kısıtıdır ve bir düğümü ziyaret eden aracın, o düğümünden çıkış yapmasını garanti ederek turda devamlılığı sağlar. Eş. 6 bir aracın depodan en fazla bir kere çıkış yapmasını sağlar. Eş. 7, bir düğümünden çıkış yapan bir aracın yine aynı düğüme gitmesini engeller. Eş. 8 ve Eş. 9, bir düğüme varış zamanını hesaplar. Eş. 10, bir rotanın süresinin maksimum çalışma süresini aşmasını engeller. Eş. 11, bir araçla ziyaret edilmeyen bir düğüme o araçla varış süresini 0'a eşitler. Eş. 12, müşterilere varış sürelerine göre zaman penceresi ihlal miktarını belirler. Eş. 13, bir düğüme varıldığında aracın deposunda kalan yakıt miktarını hesaplar. Alternatif yakıt istasyonu ziyaret

edildiğinde aracın deposunun tamamının doldurulmasını Eş. 14 sağlar. Rotadaki son müşteriye varıldığında, aracın yakıt deposunda depoya geri dönmeye yetecek yakıt bulunacağı Eş. 15 tarafından garanti edilir. Eş. 16 ve Eş. 17 numaralı kısıtlar karar değişkenlerinin sınırlarını belirler.

4. Yöntem (Methodology)

Optimizasyon problemlerinin pek çoğu tek amaçlıdır. Ancak, gerçek hayatta karar vericilerin ulaşmak istediği birden fazla amaç olabilir. Bu nedenle çok amaçlı en iyileme yöntemlerine olan gereksinim kaçınılmazdır. Çok amaçlı en iyileme problemlerinde, belirli bir sayıda kısıta tabi olan, iki veya daha fazla amaç fonksiyonu aynı anda en iyilenir. Eş. 18 ve Eş. 19 numaralı denklemler, çok amaçlı en iyileme sürecini göstermektedir.

$$\text{En küçük } \{f_1(x), f_2(x)\} \quad (18)$$

$$\text{Kısıtları altında; } x \in S \quad (19)$$

Deb [38]'e göre çok amaçlı iyileme problemlerindeki amaçlar genellikle birbiriyle çelişmektedir. Bu yüzden, bu problemlerde, birden fazla en iyi çözüm bulunmaktadır. Örneğin, iki amaçlı bir en iyileme probleminde, iki en iyi çözüm karşılaştırılacak olursa, bir amaç fonksiyonunun değeri, diğer çözüme göre daha iyiyken, diğer amaç fonksiyonunun değeri daha kötü olacaktır. Bir çok amaçlı en iyileme probleminin birbirlerinden üstün olmayan tüm en iyi sonuçlarını içeren kümeye Pareto-optimal çözüm kümesi denir. Eğer, problemin çözüm kümesi içerisindeki bir 'A' çözümüne bir amaç fonksiyonunda üstün olan ve diğer amaç fonksiyonlarında da en az 'A' kadar iyi olan başka bir çözüm yoksa, 'A' çözümü Pareto-optimal bir çözümdür. Çok amaçlı en iyilemenin temel hedefi, yeterli sayıda Pareto-optimal çözüm bularak karar vericiye çözüm çeşitliliğini sağlamaktır.

Çok amaçlı en iyileme problemlerinin çözümü için Hedef Programlama, Ağırlıklandırma tekniği, ϵ -Kısıtı gibi pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada, iki amaçlı Yeşil Araç Rotalama Probleminin çözümü için diğer yöntemlere göre daha avantajlı yönleri olan ve klasik ϵ -Kısıtı yönteminin değiştirilmiş bir hali olan Kesin ϵ -kısıtı (Bérubé vd. [3]) yöntemi uyarlanmıştır. Bu yöntemin önemli özellikleri ve avantajları şu şekildedir:

- Kesin ϵ -kısıtı yöntemi, gerçek Pareto-optimal çözümleri verir.
- Kesin ϵ -kısıtı yönteminde, her bir iterasyon ayrı bir çözüm verir ve bu yüzden Pareto-optimal çözüm çeşitliliği yüksektir.
- Yöntem Pareto-optimal olmayan sonuçların olacağı iterasyonları atlayarak gereksiz zaman kaybını önler
- Kesin ϵ -kısıtı yönteminde, ϵ değeri değiştirilerek elde edilecek çözüm sayısında ayarlama yapılabilir.

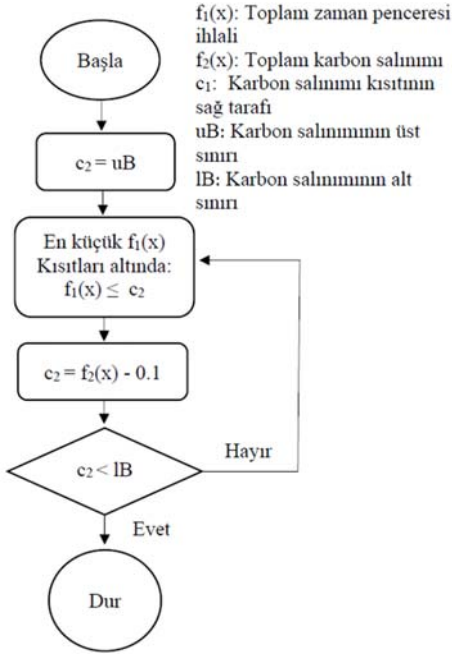
ϵ -kısıtı yönteminde, problemin bir amaç fonksiyonu en iyilenirken, diğer amaç fonksiyonları kısıtlara eklenir [39]. Kısıtlara eklenen amaç fonksiyonlarının alabileceği değerlerin üst ve alt sınırları bulunup, üst sınır değeri kısıtın sağ tarafına eklendikten sonra, her bir çalıştırmada kısıtın sağ tarafındaki değerde ϵ değeri kadar değişiklik yapıp, bu değer alt sınıra ulaşınca kadar çalıştırmaya devam ettirilir. Bu süreç kısıtlara eklenen her bir amaç fonksiyonu için uygulanır. Eş. 20 ve 21, ϵ -kısıtı yönteminin sürecini göstermektedir.

$$\text{En küçük } f_1(x) \quad (20)$$

Kısıtları altında;

$$\begin{aligned} f_2(x) &\leq c_2 - \epsilon_2 \\ f_3(x) &\leq c_3 - \epsilon_3 \\ &\dots \dots \dots \\ f_n(x) &\leq c_n - \epsilon_n \end{aligned} \quad (21)$$

Eş. 19 numaralı denklemde, $f_i(x)$, problemde kısıtlara eklenen amaç fonksiyonlarından birini temsil ederken, c_i değeri, bu fonksiyonun sağ tarafındaki değeri temsil etmektedir. ϵ_i değeri ise her bir çalıştırmada c_i değerinden çıkarılarak yeni bir çözüm elde edilmektedir. Problemin çözümünde kullanılan Kesin ϵ -kısıtı yöntemi ise gerçek Pareto-optimal bir çözüm vermeyecek bir çalıştırmayı atlayarak toplam çözüm süresinde önemli derecede azalma sağlar. Şekil 1, problemin çözümü için kullanılan Kesin ϵ -kısıtı yönteminin adımlarını göstermektedir.



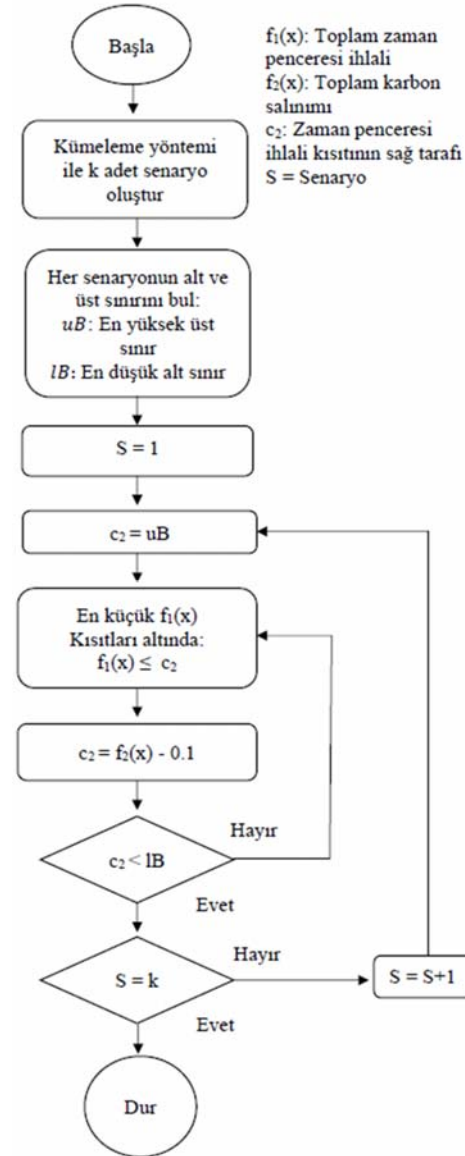
Şekil 1. Kullanmış olduğumuz ϵ -kısıtı yöntemi
 (The ϵ -constraint method used in this study)

Problemin çözümü için kullanılan Kesin ϵ -kısıtı yöntemine göre, toplam karbon salınımını en aza indirme amaç fonksiyonu kısıtlara eklenerek, toplam zaman penceresi ihlali en aza indirgenmiştir. Her bir çalıştırmada elde edilen çözümün toplam karbon salınımı değerinden ϵ değeri çıkartılıp, bu yeni değer bir sonraki çalıştırmada karbon salınımı kısıtının sağ tarafına eklenerek, algoritmanın bu iki çalıştırma arasındaki gerçek Pareto-optimal çözüm elde edilmeyecek adımlarının döngüde atlanması sağlanmıştır.

Problemin çözümünde kullanılan Kesin ϵ -kısıtı yöntemi 20'den fazla düğüm içeren senaryoları çözmekte yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, düğümlerin kümelere ayrıldığı bir sezgisel metod geliştirilmiştir. Bu metoda göre düğümler k-means kümeleme yöntemiyle kümelere ayrılmaktadır. K-means kümeleme yöntemi bir veri kümesini her bir alt kümede en az bir eleman olacak şekilde toplam k adet alt kümeye ayırır. Her bir kümedeki elemanlar birbirine benzer iken diğer kümelereki elemanlara benzememektedirler. Yönteme göre küme sayısı (k) baştan verilmelidir. Her bir kümenin o kümedeki elemanların ortalaması olan bir merkezi vardır. K-means yönteminin amacı her bir kümedeki elemanların o kümenin merkezine olan uzaklığı (toplam küme hatası) en aza indirmektedir. K-means yönteminin aşamaları aşağıda verilmiştir:

- 1-K adet küme merkezi belirle
- 2-Her bir elemanı merkezi en yakın olan kümeye ata
- 3-Küme merkezlerini yeniden belirle
- 4-Kümelereki elemanlar, küme merkezleri veya toplam küme hatası değişmeye kadar ikinci ve üçüncü adımı tekrar et.

Düğüm k-means yöntemiyle kümelendikten sonra kümelene k adet alt problemin ϵ -kısıtı yöntemi için üst ve alt sınırları bulunmakta ve her bir senaryo bulunan en yüksek üst sınır ve en düşük alt sınır değerine göre ϵ -kısıtı yöntemi ile çalıştırılmaktadır. Bu yöntemde toplam zaman penceresi ihlali en aza indirme amaç fonksiyonu kısıtlara eklenerek, toplam karbon salınımı en aza indirgenmiştir. Her bir çalıştırmada elde edilen toplam zaman penceresi ihlali değerinden 0.1 çıkartılıp, yeni bulunan değer bir sonraki çalıştırmada toplam zaman penceresi ihlali kısıtının sağ tarafına eklenmiştir. Daha sonra her bir çalıştırmada bulunan toplam karbon salınımı ve toplam zaman penceresi ihlali değerleri k adet senaryo için toplanarak Pareto-optimal çözümler elde edilmiştir. Şekil 2 problemin çözümü için kullanılan kümeleme tabanlı sezgisel yöntemin adımlarını göstermektedir.



Şekil 2. Bu çalışmada geliştirilen kümeleme bazlı sezgisel yöntem
 (The clustering-based heuristic method developed in this study)

5. Sayısal Analizler (Computational Analysis)

Hazırlanmış olan modeli test etmek için, İzmir şehri için üç tane, Ege bölgesi için üç tane ve tüm Türkiye için bir tane olmak üzere toplamda

yedi farklı gerçekçi varsayımsal veri üretilmiştir. Senaryoların boyutları, müşteri ve alternatif yakıt istasyonu sayılarına göre belirlenmiştir. Hazırlanmış olduğumuz senaryolar, Tablo 1’de açıklanmıştır. Veri üretimi aşamasında, İzmir şehri ve Ege bölgesi haritaları üzerinde, düğümlerin koordinatları belirlendikten sonra “Google Haritalar” üzerinden bu düğümler arasındaki gerçek mesafe ve süre bilgilerine ulaşılmıştır. Müşterilerin hizmet süresi, 15 dakika ile 30 dakika arasında düzgün dağılımdan rastgele üretilirken, alternatif yakıt istasyonlarının hizmet süresi, 5 ile 15 dakika arasında düzgün dağılımdan rastgele üretilmiştir. Maksimum rota süresi, günlük mesai süresi 8 saat olduğu için 8 olarak belirlenmiştir. Depodan çıkış yapabilecek araç miktarı, her bir senaryodaki müşteri sayısına eşitlenmiştir. Böylelikle, modelin her bir müşteriye bir araç gönderebilme kararını verebilmesine imkan sağlanmıştır. Araçların yakıt deposu kapasitesi, İzmir şehri senaryoları için 100 litre olarak belirlenirken, Ege bölgesi senaryoları için 250 litre olarak belirlenmiştir. Son olarak, kilometre başına birim karbon salınımı miktarı 0.45 kg olarak belirlenirken (McKinnon ve Piccyk [40]), kilometre başına yakıt tüketimi miktarı 0.5 litre olarak belirlenmiştir (Erdogan ve Hooks [2]). Hazırlanmış olduğumuz model, IBM OPL CPLEX Optimization Studio programında kodlanmış olup, 8GB RAM, Intel® Core™ i7-4700MQ CPU @2.40GHz 2.40 GHz işlemcili bir bilgisayarda 1500 saniye sınırı ile çalıştırılmıştır. Şekil 3, 4, 5 ve 6 tüm senaryolara ait Pareto-optimal çözümleri karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli ve sezgisel yöntemi karşılaştırarak göstermektedir.

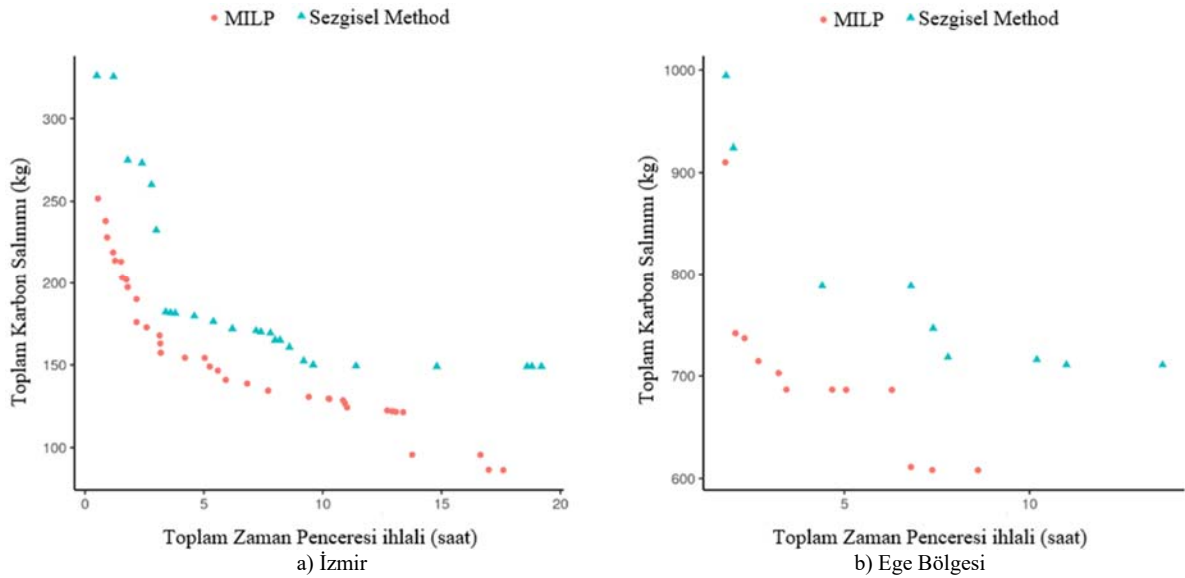
Şekil 3’e göre, İzmir şehri ve Ege bölgesi verisinde hizmet seviyesini en üst seviyeye çıkarma ve karbon salınımını en aza indigeme amaçları birbiriyle çelişmektedir. Karbon salınımı azaldıkça, hizmet

seviyesi azalmaktadır. Ayrıca, İzmir şehri için daha fazla Pareto-optimal çözüm bulunmuştur. Bu, düğümlerin kordinatları birbirine yaklaştıkça oluşabilecek çözüm sayısının arttığını göstermektedir. Ayrıca, geliştirilen sezgisel yöntem, karışık tamsayılı doğrusal programlama modeline yakın sonuçlar sunmaktadır. Şekil 4’de görüldüğü gibi, İzmir şehri ve Ege bölgesi verisinde karbon salınımını en aza indigeme ve hizmet seviyesini en üst seviyeye çıkarma amaçları birbiriyle çelişmektedir. Hizmet seviyesi arttıkça, karbon salınımı da artmaktadır. Bunun dışında, küçük boyuttaki senaryoda olduğu gibi, İzmir şehri için daha fazla Pareto-optimal çözüm bulunmuştur. Şekil 4’den görüldüğü gibi, hazırlanmış olan sezgisel yöntem, karışık tamsayılı doğrusal programlama modeline yakın sonuçlar sunmaktadır. Şekil 5’e göre karbon salınımını en aza indigeme ve hizmet seviyesini en üst düzeye çıkarmak çelişen iki amaçtır. Hizmet seviyesinin artması, karbon salınımının da artmasına sebep olmaktadır. Diğer senaryolarda olduğu gibi, İzmir şehri için bulunan Pareto-optimal çözümler daha fazladır. Sezgisel yöntemin bulduğu Pareto-optimal çözümler karışık tamsayılı doğrusal programlama modelin bulduklarına yakındır.

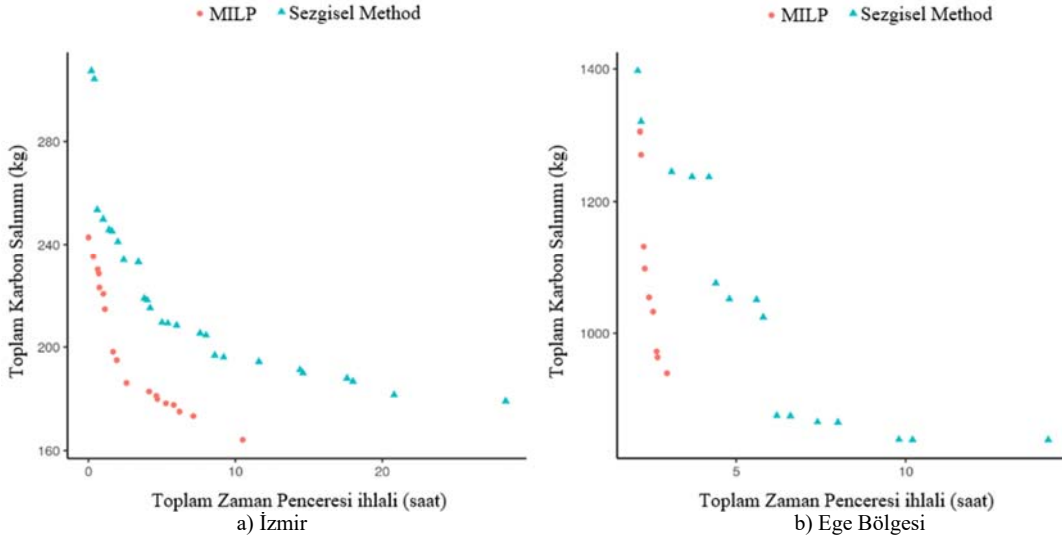
Her üç senaryoda da görülmektedir ki Ege Bölgesi dağıtım beklendiği gibi dağıtım alanının genişliğinden dolayı daha çok emisyonla neden olmaktadır. Şekil 6, 60 düğüm içeren Türkiye senaryosunun sezgisel metot ile elde edilen Pareto-optimal çözümlerini göstermektedir. Karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli 60 düğüm için belirlenmiş olan çözüm süresi içerisinde olurlu çözüm bulamadığı için grafikte verilmemiştir. Şekil 6’ya göre, hizmet seviyesini en üst düzeye çıkarmak ile karbon salınımını en aza indigeme amaçları birbiriyle çelişmektedir. Hizmet seviyesi artarken karbon salınımı da artmaktadır.

Tablo 1. Tüm Senaryolar (All scenarios)

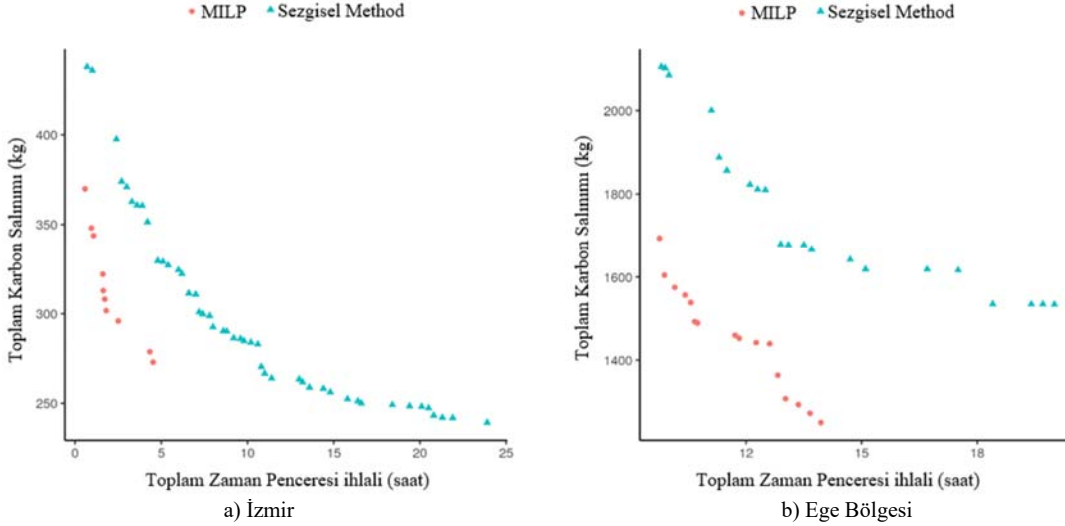
Senaryo	Müşteri Sayısı	Alternatif Yakıt İstasyonu Sayısı
İzmir	Küçük	9
	Orta	13
	Büyük	18
Ege	Küçük	8
	Orta	13
	Büyük	17
Türkiye	55	5



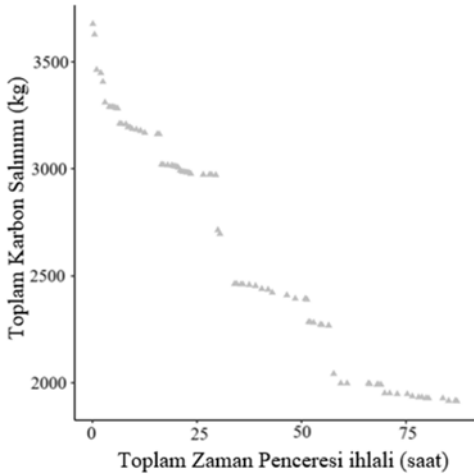
Şekil 3. İzmir şehri ve Ege bölgesi küçük senaryosunun Pareto-optimal çözümleri (Pareto-optimal solutions of İzmir city and Aegean region small scenarios)



Şekil 4. İzmir şehri ve Ege bölgesi orta senaryosunun Pareto-optimal çözümleri (Pareto-optimal solutions of İzmir city and Aegean region medium scenarios)



Şekil 5. İzmir şehri ve Ege bölgesi büyük senaryosunun Pareto-optimal çözümleri (Pareto-optimal solutions of İzmir city and Aegean region large scenarios)



Şekil 6. Türkiye senaryosunun Pareto-optimal çözümleri (Pareto-optimal solutions of Turkey scenario)

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu makalede, Yeşil Araç Rotalama Probleminin bir genişletilmesi olan iki amaçlı Zaman Pencereci Yeşil Araç Rotalama Problemi geliştirilmiştir. Yeşil Araç Rotalama Problemi, Araç Rotalama Probleminin çevresel etkisine odaklanmaktadır. Problemden, homojen bir alternatif yakıtlı araç filosu ve belirli sayıda alternatif yakıt istasyonu ele alınmıştır. Oluşturulan rotaların çevresel etkilerinin yanı sıra hizmet kalitesi de düşünülmüştür. Geliştirilen modelde, müşteriler belirli bir zaman penceresi içerisinde ziyaret edilmeyi beklemektedir fakat bu modelde gerçek dağıtım uygulamaları da dikkate alınarak zaman penceresinin ihlal edilebildiği bir yapı tasarlanmıştır. Ancak, zaman penceresi ihlali hizmet seviyesini düşürmektedir.

Hazırlanmış olduğumuz model, iki amaç fonksiyonuna sahiptir. Birinci amaç fonksiyonu, toplam katedilen mesafeden kaynaklanan karbon salınımını en aza indirirken, diğer amaç fonksiyonu zaman penceresi ihlalini azaltarak hizmet seviyesini en üst düzeye çıkarmaktadır. Problemin bu iki amacı birbiriyle çelişmektedir. Problem Karışık

Tamsayılı Doğrusal Programlama olarak IBM OPL CPLEX Optimization Studio programında modellenmiş ve problemin çözümü için senaryoların k-means kümeleme yöntemiyle kümelendiği ve daha sonra ϵ -kısıtı yöntemiyle çözüldüğü bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan sezgisel yöntem, ϵ -kısıtı yönteminin değiştirilmiş bir hali olan kesin ϵ -kısıtı yöntemi ile çözülen karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanmış olan sezgisel yöntem, matematiksel modele yakın sonuçlar bularak iyi bir performans ortaya koymuştur.

Hazırlanmış olduğumuz model, üç tanesi Ege bölgesi, üç tanesi İzmir şehri ve bir tanesi tüm Türkiye olmak üzere toplam 7 farklı gerçekçi fakat varsayımsal senaryo ile test edilmiştir. Test ettiğimiz tüm senaryolarda, karbon salınımı minimizasyonu ve hizmet seviyesi maksimizasyonunun birbiriyle çeliştiği görülmektedir. Karbon salınımı azaldıkça hizmet seviyesi de azalmaktadır. Bunun sebebi, araçlar karbon salınımını azaltmak için toplam rota mesafesini azalttığına, müşterilerin zaman penceresi içerisinde teslimatı yapamamalarıdır. Bu yüzden, hizmet seviyesi azalmaktadır. Firma yöneticileri, bulunan Pareto-optimal çözümler içerisinde firma çıkarları için en iyi olanı seçerek kendi kriterleri doğrultusunda en iyi rotalama kararını verebilirler. Ayrıca karbon salınımı artıp, zaman penceresi ihlali azaldıkça daha çok rota oluşup daha çok araç kullanılmaktadır ve alternatif yakıt istasyonları daha çok kullanılmaktadır. Bu, zaman penceresi ihlalini azaltarak müşteri memnuniyetini arttırmamanın, karbon salınımı, toplam mesafe ve maliyet gibi amaçlardan feragat etmek anlamına geldiğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda iki amaçlı Yeşil Araç Rotalama Problemi için geliştirilen sezgisel yöntemin geliştirilmesine odaklanacaktır. Bu amaçla meta-sezgisel bir yöntem geliştirilerek optimal sonuçlara ulaşılmasına ve daha büyük problemlerin çözülmesine çalışılacaktır. Ayrıca problemdeki araç filosu homojendir ve araçların çıkış yaptığı tek bir depo mevcuttur. Gelecek çalışmalarda, araç filosu heterojen hale getirilebilir ve birden fazla depo ele alınarak problem geliştirilebilir.

Kaynaklar (References)

1. Beamon, B. M., Supply chain design and analysis: Models and methods, *International Journal of Production Economics*, 55 (3), 281-294, 1998.
2. Erdoğan, S. ve Miller-Hooks, E., A green vehicle routing problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48 (1), 100-114, 2012.
3. Bérubé, J. F., Gendreau, M. ve Potvin, J. Y., An exact ϵ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the traveling salesman problem with profits, *European Journal of Operational Research*, 194 (1), 39-50, 2009.
4. Savelsbergh, M. W., The Vehicle Routing Problem with Time Windows: Minimizing Route Duration, *ORSA Journal on Computing*, 4 (2), 146-154, 1992.
5. Dumas, Y., Desrosiers, J. ve Soumis, F., The pickup and delivery problem with time windows, *European Journal of Operational Research*, 54 (1), 7-22, 1991.
6. Mingyong, L. ve Erbao, C., An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23 (2), 188-195, 2010.
7. Huang, Y., Shi, C., Zhao, L. ve Van Woensel, T., A study on carbon reduction in the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries, *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, 302-307, July, 2012.
8. Ho, S. C. ve Haugland, D., A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries, *Computers & Operations Research*, 31 (12), 1947-1964, 2004.
9. Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S. ve Hartl, R. F., The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations, *European Journal of Operational Research*, 252 (3), 995-1018, 2016.
10. Macrina, G., Laporte, G., Guerriero, F. ve Pugliese, L. D. P., An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows, *European Journal of Operational Research*, 276 (3), 971-982, 2019.
11. Keskin, M., Laporte, G., ve Çatay, B., Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations, *Computers & Operations Research*, 107, 77-94, 2019.
12. Niu, Y., Yang, Z., Chen, P., ve Xiao, J., Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost, *Journal of Cleaner Production*, 171, 962-971, 2018.
13. Tang, J., Pan, Z., Fung, R. Y. ve Lau, H., Vehicle routing problem with fuzzy time windows, *Fuzzy Sets and Systems*, 160 (5), 683-695, 2009.
14. Figliozzi, M., Vehicle routing problem for emissions minimization, *Transportation Research Record*, 2197 (1), 1-7, 2010.
15. Zhang, J., Zhao, Y., Xue, W. ve Li, J., Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission, *International Journal of Production Economics*, 170, 234-242, 2015.
16. Bektaş, T. ve Laporte, G., The pollution-routing problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 45 (8), 1232-1250, 2011.
17. Franceschetti, A., Honhon, D., Van Woensel, T., Bektaş, T. ve Laporte, G., The time-dependent pollution-routing problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 56, 265-293, 2013.
18. Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O. ve Laporte, G., The fleet size and mix pollution-routing problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239-254, 2014.
19. Li, Y., Lim, M. K., ve Tseng, M. L., A green vehicle routing model based on modified particle swarm optimization for cold chain logistics, *Industrial Management & Data Systems*, 119 (3), 473-494, 2019.
20. Li, J., Wang, D., ve Zhang, J., Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions, *Journal of Cleaner Production*, 201, 896-908, 2018.
21. Kwon, Y. J., Choi, Y. J. ve Lee, D. H., Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, 81-89, 2013.
22. Shen, L., Tao, F., ve Wang, S., Multi-depot open vehicle routing problem with time windows based on carbon trading, *International journal of environmental research and public health*, 15 (9), 2025, 2018.
23. Adiba, E.B.E.I., Messaoud, E. ve Ahemd, E.H.A., A hybrid ant colony system for green capacitated vehicle routing problem in sustainable transport, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 54 (2), 2013.
24. Ehmke, J. F., Campbell, A. M. ve Thomas, B. W., Vehicle routing to minimize time-dependent emissions in urban areas, *European Journal of Operational Research*, 251 (2), 478-494, 2016.
25. Liu, W. Y., Lin, C. C., Chiu, C. R., Tsao, Y. S. ve Wang, Q., Minimizing the carbon footprint for the time-dependent heterogeneous-fleet vehicle routing problem with alternative paths, *Sustainability*, 6 (7), 4658-4684, 2014.
26. Kabadurmuş, Ö., Erdoğan, M. S., Özkan, Y., ve Köseoğlu, M., A Multi-Objective solution of green vehicle routing problem, *Logistics & Sustainable Transport*, 10 (1), 31-44, 2019.
27. Xiao, Y. ve Konak, A., The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 88, 146-166, 2016.
28. Demir, E., Bektaş, T. ve Laporte, G., The bi-objective pollution-routing problem, *European Journal of Operational Research*, 232 (3), 464-478, 2014.
29. Poonthaler, G. ve Nadarajan, R., A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (F-GVRP), *Expert Systems with Applications*, 100, 131-144, 2018.
30. Li, Y., Soleimani, H., ve Zohal, M., An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives, *Journal of Cleaner Production*, 227, 1161-1172, 2019.
31. Zhong, Y. ve Cole, M. H., A vehicle routing problem with backhauls and time windows: a guided local search solution, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41 (2), 131-144, 2005.

32. Demir, E., Bektaş, T. ve Laporte, G., An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem, *European Journal of Operational Research*, 223 (2), 346-359, 2012.
33. Keçeci, B., Altıparmak, F. ve Kara, İ., Heterojen eş-zamanlı topla-dağıt araç rotalama problemi: Matematiksel modeller ve sezgisel bir algoritma, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (2), 2015.
34. Leggieri, V. ve Haouari, M., A practical solution approach for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 97-112, 2017.
35. Koç, Ç. ve Karaoglan, I., The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach. *Applied Soft Computing*, 39, 154-164, 2016.
36. Andelmin, J. ve Bartolini, E., An exact algorithm for the green vehicle routing problem. *Transportation Science*, 51(4), 1288-1303, 2017.
37. Vincent, F. Y., Redi, A. P., Hidayat, Y. A., ve Wibowo, O. J., A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, 53, 119-132, 2017.
38. Deb, K., *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Cilt 16, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 2001.
39. Mavrotas, G., Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems, *Applied Mathematics and Computation*, 213 (2), 455-465, 2009.
40. McKinnon, A. C. ve Piecyk, M., *Measuring and managing CO² emissions in European chemical transport*, CEFIC, 2010.