

YEŞİL LOJİSTİK YÖNETİMİNDE ARAÇ ROTALAMA OPTİMİZASYONU İÇİN BİR MODEL ÖNERİSİ

FURKAN DIŞKAYA³, S. ERDAL DİNÇER⁴

ÖZET

Günümüzde doğal kaynakların azalması, sera gazlarının küresel ısınmaya sebep olması ile tüketicilerin çevre ve sağlık konusunda daha duyarlı hale gelmeleri, işletmeleri çevreci stratejiler ile sürdürülebilir olmaya zorlamıştır. Etkin ve sürdürülebilir işletmeler, ekonomik faaliyetlerini yüksek kar ve çevreye en az zarar ile gerçekleştirmek ile ayakta kalabileceklerdir. Bu amaçla, işletmelerin mal ve hizmet üretiminde çevreye karşı duyarlı ekonomik faaliyetler gerçekleştirmek temeline dayanan yeşil lojistik kavramı büyük önem kazanmıştır. Lojistik faaliyetlerinin en temel maliyet kalemleri taşıma ve depolama faaliyetleridir. Taşımacılık faaliyetleri, tüketilen fosil yakıtlar ve ortaya çıkan sera gazları sebebiyle, yeşil lojistik stratejisinin en önemli hedefi olmaktadır. Dağıtım ağlarını optimize ederek kat edilen mesafenin ve dolayısıyla tüketilecek yakıtın olabilecek en düşük seviyeye düşürülmesi, kıt olan doğal enerji kaynaklarının daha az tüketilmesi ve küresel ısınma sorununun temel sebebi olan karbon emisyonu miktarının düşürülmesini sağlayacaktır. Dağıtım ağının optimize edilmesi, araç rotalarının ve filolarının en iyi şekilde organize edilmesi ile mümkün olabilecektir. Bu çalışmada, dağıtım ağlarının optimize edilmesi için kullanılan araç rotama problemlerinin bir türü olan yeşil araç rotalama problemi için bir matematiksel model

³ Öğr. Gör., İstanbul Beykent Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Lojistik Programı,
furkandiskaya@beykent.edu.tr

⁴ Doç. Dr., Marmara Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri Bölümü, edincer@marmara.edu.tr

önerilmiştir. Burada amaç, yeşil lojistik yönetimi stratejisi ile çevreci hizmetler üretme amacıyla olan işletmelere ve konu ile ilgili yapılan araştırmalara katkıda bulunmaktır.

Anahtar Kelimeler: Araç Rotalama Problemi, Yeşil Araç Rotalama Problemi, Yeşil Lojistik

JEL Kodları: C44, C61, L92

A MODEL PROPOSAL FOR GREEN LOGISTICS MANAGEMENT VEHICLE ROUTING OPTIMIZATION

ABSTRACT

Today, the decline of natural resources has forced the greenhouse gases to cause global warming, making consumers more sensitive to the environment and health, and making the businesses sustainable through environmental strategies. Effective and sustainable enterprises will survive by carrying out their economic activities with the least profit and high profit. For this purpose, the concept of green logistics based on the economic activities sensitive to environment in the production of goods and services has gained importance. The most basic cost items of logistics activities are transportation and storage activities. Transportation activities are the most important goal of the green logistics strategy due to the consumed fossil fuels and the emerging greenhouse gases. Optimizing the distribution networks to reduce the distance covered and thus the consumption of fuel to the lowest possible level will result in less consumption of scarce natural energy resources and lower carbon emissions, the main cause of global warming. Optimizing the distribution network may be the best way to organize vehicle routes and fleets. In this study, a mathematical model for the green vehicle routing problem, which is a kind of vehicle routing problems used to optimize distribution networks, is proposed. The aim here is to contribute to the green logistics management strategy and to the enterprises that are aiming to produce environmental services and to the researches related to the subject.

Key Words: Vehicle Routing Problem, Green Vehicle Routing Problem, Green Logistics

JEL Codes: C44, C61, L92

1. GİRİŞ

Hızla büyüyen uluslararası ticaret ve ekonomik faaliyetler, lojistik yönetimi faaliyetlerini stratejik bir karar haline getirmiştir. Lojistik işletmeler rekabet ortamında kar elde edebilmek ve varlıklarını sürdürebilmek için, ürettikleri hizmetleri en etkin ve verimli bir şekilde gerçekleştirmek zorundadırlar. 1980' li yılların başında, endüstriyel üretimin artması ve tedarik zinciri yönetiminin küresel ekonomi içinde kazandığı önem sebebiyle, tedarik zinciri ağ tasarımı, araç rotalama problemi optimizasyonu, lojistik yönetimi ve organizasyonu gibi konularda bilimsel ve akademik çalışmalara hız kazandırmıştır. İşletmeler lojistik ağlarını optimize ederek, üretim maliyetleri düşürmekte ve karlılıklarını arttırarak sürdürülebilir işletmeler olabilmektedirler. Optimize edilmiş bir dağıtım ağı, akaryakıt tüketimi ve dolayısıyla ortaya çıkan karbon emisyonu miktarını düşürecektir. Bu durum, lojistik sektöründe faaliyet gösteren işletmeler için çevresel sürdürülebilirlik sağlayacaktır. Bu amaçla, lojistik yönetimi faaliyetleri içerisinde en yüksek maliyetlere sahip operasyon durumundaki taşımacılık faaliyetinin optimize edilmesi konusu, geçtiğimiz yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Tedarik zinciri ve lojistik yönetimi alanlarında en sık görülen optimizasyon problemleri ise; araç rotalama, tesis yeri seçimi, lojistik ağ tasarımı, lojistik faaliyetleri performans analizi ve bunun gibi çözümü zor optimizasyon problemleridir.

Konu ile ilgili literatür incelendiğinde, klasik araç rotalama problemleri üzerinde yapılan optimizasyon uygulamalarının yakıt tüketimi gibi taşımacılık maliyetlerini doğrudan etkilediği bilinen birçok unsuru dikkate almadığı görülmüştür. Klasik araç rotalama problemi, kat edilen seyahat uzunluğunu optimize ederek bir taşıma maliyeti minimizasyonu yaparken, son yıllarda küresel ekonomide büyük bir maliyet kalemi haline gelen akaryakıt maliyetlerini çok yönlü olarak dikkate almamaktadır. Ancak yeşil lojistik yönetimde yapılan araç rotalama optimizasyonunda temel prensip, birçok farklı sebebe bağlı olarak artan akaryakıt tüketimini azaltarak karbon emisyonu oranının düşürülmesidir. Araç rotalama probleminin yeni bir türü olarak literatürde yer almaya başlayan yeşil kısıtlı araç rotalama problemi, araçların türü ve kapasitesi, yol durumu, trafik sıklığı, uygun sevkiyat rotasının belirlenmesi gibi birçok değişkeni dikkate alarak akaryakıt tüketimini ve karbon emisyonunu minimize etmeyi hedeflemektedir.

Bu çalışmada, araç rotalama problemlerinin yeşil lojistik stratejisi ile bütünleştiği yeşil araç rotalama problemi hakkında bir matematiksel model önerilecektir. Öncelikle yeşil lojistik kavramı ve araç rotalama problemleri hakkında bilgi verilecek, yeşil kısıtlı araç rotalama

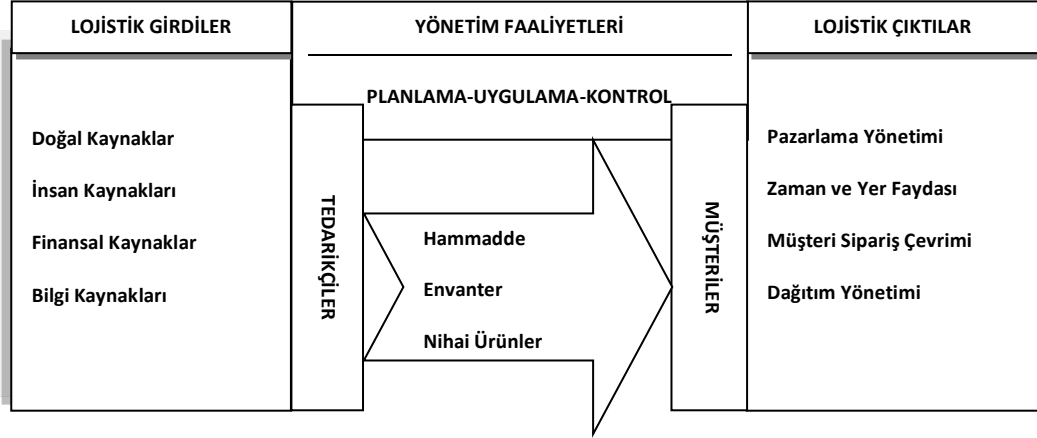
problemleri ve çözüm yöntemlerinden bahsedildikten sonra önerilen model ve örnek uygulamasına yer verilecektir.

2. YEŞİL LOJİSTİK YÖNETİMİ

Tedarik zinciri yönetiminin temel aşamalarında yer alan lojistik yönetimi, ham madde ve malzemelerin, depolanması, üretilmesi, dağıtılması vb. faaliyetler sonunda nihai tüketiciye kadar ulaştırılması süreçlerinin tamamını ifade etmektedir. Bu sistem içerisinde yer alan tüm faaliyetlerin çevreyi koruma amacına yönelik olarak tasarlanması ve idare edilmesi ise yeşil lojistik yönetimi olarak ifade edilmektedir (Srivastara, 2007: 57). Yeşil lojistik, lojistik faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi sırasında, kaynakların doğaya en az zarar verecek biçimde kullanılması amacıyla, yürütülen faaliyetlerin çevre üzerinde oluşturduğu etkilerini ölçmek ve en düşük seviyeye düşürmek için yapılan tüm faaliyetlerdir. Bu amaçla işletmeler, temel lojistik faaliyetlerine ek olarak, yenilenemez doğal kaynaklarının tüketimi, gürültü kirliliğinin engellenmesi, gaz emisyonu değerlerinin düşürülmesi, zehirli ve zehirsiz atıkların imha edilebilmesi gibi işlemler ile çevresel etkileri en düşük seviyeye düşürmeye yönelik işlemleri yapmaktadırlar. İşletmeler kaynaklarını verimli kullanarak, müşterilerine doğru zamanda ve düşük maliyetle hizmet sunmak, doğaya en az zarar ile sürdürülebilir bir yapıda olmak zorundadırlar. Yüksek rekabet ve hızla artan teknolojik gelişmeler ile lojistik işletmeleri için büyük öneme sahip olan sürdürülebilirlik, ancak işletme kaynaklarının doğru sevk ve idaresi ile mümkün olabilecektir. Böylece işletmeler, optimum kaynak kullanımı, düşük maliyet, yüksek kaliteli hizmet üretimi ile doğaya en az zarar ile sürdürülebilir bir organizasyon haline alabileceklerdir (Wu ve Dunn, 1995: 20).

a. Lojistik Yönetimi ve Sürdürülebilirlik

Lojistik ve lojistik faaliyetleri ile ele alınan kavramlar ile birlikte değerlendirilmesi gereken temel unsur lojistik yönetimi kavramıdır. Lojistik yönetimi, işletmelerin tüm lojistik faaliyetleri kapsamında ele alınan operasyonları sevk ve idare etmesi, yani yönetmesi anlamına gelecektir. Etkin bir lojistik yönetimi ile kalitenin yükselmesi, üretimin artması, müşteri memnuniyeti ve iş akışı maliyetlerinin düşürülmesi gibi sonuçlar elde edilecektir. Günümüzde lojistik yönetimi, daha çok dışa dönük bir stratejik fonksiyon haline dönüşmüştür. Buna göre lojistik yönetimi, firmalar arasındaki ilişkileri lojistik sistemi ile düzenleyerek, piyasada rekabet avantajları elde etme çabası olarak nitelenebilir (Bowersox, 1996: 134). Şekil 1'de sözü edilen lojistik yönetiminin bileşenleri bulunmaktadır. Lojistik girdiler, planlama ve üretim faaliyetleri ve lojistik çıktılar olarak ifade edilen lojistik yönetiminin, etkin ve verimli olarak organize edilmesi ile işletmenin rekabet avantajını sağlaması mümkün olacaktır.



Şekil 1: Lojistik Yönetimi Bileşenleri

Kaynak: Grant et al., 2006: 3.

Lojistik faaliyetleri de birçok ekonomik faaliyet gibi sürdürülebilir olmalıdır. Çünkü hızla artan tüketim ve paralelinde azalan doğal kaynaklar, ekonomik ve sosyal bir olgu olarak sürdürülebilirlik çalışmalarını zorunlu hale getirmiştir. Sürdürülebilirlik stratejisinin temelinde ekolojik dengenin korunması, doğal çeşitliliğin korunması ve ekosistemin sağlıklı şekilde çalışması yatmaktadır. Üreticiden nihai tüketicisine uzanan zincir içinde ürünün ekonomik hareketi, lojistik yönetimi faaliyetlerinin sürdürülebilirlik için önemini ortaya koymaktadır (Christopher, 2011: 11). Sürdürülebilirlik kavramı, herhangi bir şeyin varlığını sürdürmesi ve yarına kalabilme yeteneği olarak ifade edilebilir. 1987 yılında yayınlanan Bruntland Raporu'nda sürdürülebilir kalkınma, gelecek nesillerin varlıklarını sürdürebilme yeteneklerine imkân sağlamak için şuan var olan nesillerin ihtiyaçlarının karşılanabilmesi olarak tanımlanmaktadır (Sharma et al., 2010: 2). Birleşmiş Milletler tarafından yapılan araştırmanın 2010 yılında yayınlanan raporunda çevresel sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi amacıyla benimsenen hedef ve göstergeler Tablo 1'de ifade edilmiştir.

Tablo 1. Çevresel Sürdürülebilirlik İçin Hedef ve Göstergeler

Hedefler	Göstergeler
<p>7a. Ülkelerin politikalarına ve programlarına sürdürülebilir kalkınma ilkelerini dâhil etmek; çevresel kaynakların yok edilmesini tersine çevirmek.</p> <p>7b. Biyolojik çeşitliliğin kayıp oranında yüksek seviyede azalma sağlamak.</p>	<p>7.1. Ormanlık alan miktarı</p> <p>7.2. Karbondioksit emisyonu miktarı</p> <p>7.3. Ozon tabakasına zararlı madde tüketimi</p> <p>7.4. Güvenli biyosistem içinde balık stok oranı</p> <p>7.5. Su kaynaklarının kullanım oranı</p> <p>7.6. Korunan deniz ve kara alanlarının oranı</p> <p>7.7. Yok olma tehlikesi olan türlerin oranı</p>

Kaynak: United Nations, 2015.

[http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20\(July%201\).pdf](http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20(July%201).pdf) (19.04.2018)

b. Karbon Emisyonu Kavramı

Karbon emisyonu genel anlamı ile atmosfere salınan karbon gazı anlamına gelmektedir. Son yıllarda etkisini daha hızlı olarak hissettiğimiz iklimsel değişiklikler açısından bakıldığında ise, sera gazı emisyonu ya da salınımı olarak ifade edilebilir. Sera gazı, atmosfer üzerinde sera etkisi oluşturmak için var olan kimyasal gaz bileşenlerinin tamamı olarak ifade edilebilir. Sera gazı bileşenleri; karbon dioksit, metan, nitroz oksit, hidroflorür karbonlar, perfloro karbonlar, sülfürhekza florid olarak sıralanan gazlardır. Bu gazlardan en yoğun olanı karbon dioksit gazıdır. Bu gazlar, atmosferde bir sera etkisi meydana getirerek yeryüzünde oluşan doğal ve yaşanabilir seviyede sıcaklık değerlerini sağlamaktadır. Lojistik yönetiminde, özellikle taşıma faaliyetleri sırasında ortaya çıkan yakıt tüketimi, organik yakıt atıklarının oluşmasına neden olmaktadır. Akaryakıt tüketimi esnasında yüksek yoğunlukta ortaya çıkan gaz ise karbon dioksittir. Bu durum doğal olmayan bir sera gazı etkisi oluşturmakta ve yaşanabilir sıcaklık ortamına büyük ölçüde zarar vermektedir. Karbon gazı emisyonlarının yaklaşık % 90' lık kısmı taşıma faaliyetleri ve % 10'luk kısmı ise depo, tesis, liman vb. operasyonlardan kaynaklanmaktadır (Sönmez ve Tanıdır, 2016: 39). Lojistik işletmelerinin taşımacılık faaliyetleri için kullandıkları araçlar ile tükettikleri yakıt miktarları taşıma maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Bu durum çevreye salınan karbondioksit gazının salınım miktarını arttıracaktır (Kirby et al., 2000: 265). Literatürde konu hakkında yapılmış araştırmalara göre, çeşitli faktörlerin karbon emisyonu ve yakıt tüketimi miktarını etkilediği ifade edilmiştir. Bu

faktörler; aracın yükü, aracın hızı, zamana bağlı hız, yolun eğimi, seyahat uzunluğu ve araç filosudur (Chen ve Zhang, 2010: 224). Ayrıca, kullanılan aracın marka, model, kapasite, motor yapısı gibi unsurlarda ortaya çıkaracağı karbon gazı miktarını etkileyecektir.

3. YEŞİL KISITLI ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Lojistik yönetiminde tasarlanan bir taşımacılık faaliyeti için, taşımada kullanılan araçlar, teslimat işlemleri, müşterilere dağıtım ya da servis bakım gibi hizmet kalemlerini coğrafi olarak farklı lokasyonlarda yer alan müşterilere sunarlar. Birçok gerçek lojistik vaka incelemesi yapıldığında, lojistik hizmet üreten işletmelerin temel problemi olan toplam dağıtım maliyetlerini azaltmak, çeşitli kısıtlar dikkate alınarak yapılan en uygun araç rotasının belirlenmesi işlemine araç rotalama problemi denilmiştir. Araç rotalama problemlerinin temel prensibi, toplam seyahat süresi ve uzaklıklarını minimize ederek toplam dağıtım maliyetlerini ve sürelerini düşürmektir. Araç rotalama problemlerinde yeni bir yaklaşım olarak ortaya çıkan yeşil kısıtlı araç rotalama problemi, klasik yaklaşımlardan farklı bir şekilde, sadece toplam seyahat mesafesini değil, aynı anda ortaya çıkan gaz emisyonu, yakıt tüketimi, filo seçimi, araç kapasiteleri vb. değişkenlerin ilişkilerini de dikkate alarak çevreye en az zarar verecek dağıtım planı için rota tasarlamayı hedeflemektedir. Burada amaç, gaz emisyonu ve yakıt tüketiminin doğrudan ve dolaylı olarak etkilendiği, araç yükü miktarı, aracın hızı, toplam seyahat uzunluğu, yol eğimi, aracın marka, model, kapasite, motor yapısı gibi kısıtları da göz önüne alarak toplam dağıtım maliyetlerini minimize etmeye çalışmaktır. Bu suretle, dağıtım yönetimini daha az yakıt kullanımı ile organize ederek, çevreci bir misyonla maliyetlerini düşürüp karlılığı arttırarak sektörde sürdürülebilir bir işletme olmak mümkün olabilecektir (Figliozi, 2010: 2).

a. Literatür Taraması

Araç rotalama probleminin temeli 1759 yılında İsviçreli bilim insanı Leonhard Euler tarafından ortaya konulmuş olan şövalye turu problemine dayanmaktadır. Euler şövalye turuna göre, her bir şövalyenin $m \times m$ 'lik bir satranç tahtasındaki tüm karelerden net olarak bir kez geçmek şartıyla meydana getirdiği bir döngüsel durum söz konusu olacaktır. Bu döngüsel süreç araç rotalama problemlerinin türediği bilinen gezgin satıcı probleminin temelini oluşturmuştur. Gezgin satıcı problemi, aralarındaki uzaklıkları bilinen m adet nokta için her birinden yalnız bir defa geçmek suretiyle en az maliyetli olacak ve en kısa turu oluşturacak bir planı temsil eden problemdir. Araç rotalama probleminin genel literatürü incelendiğinde; 1959 yılında Dantzig ve Ramser ilk olarak matematik bir model ortaya koymuş, 1964 yılında Clarke ve Wright ise sezgisel bir tasarruf algoritması vermiştir (Parberry, 1996: 19). Yeşil lojistik prensiplerine dayanan yeşil kısıtlı araç rotalama problemleri ise son yıllarda literatürde yer almaya başlamıştır. Yeşil kısıtlı araç rotalama probleminin temeli, 1985 yılında Laporte ve arkadaşları tarafından ilk defa sunulan klasik mesafe kısıtlı araç rotalama problemine dayanmaktadır. Ancak bu problem aracın dağıtım sırasında seyahat mesafesini çeşitli

sebepler dolayısıyla uzatabilme ihtimalini dikkate almaz. Crevier ve arkadaşları tarafından 2007 yılındaki çalışmada, yeşil kısıtlı araç rotalama prensiplerine dayanan bir model önerilmiştir. Çalışmada, çoklu depolu araç rotalama yapısında ara depolar arasında kurulan bir rotalama uygulaması olarak hazırlanmıştır. Çözüm için uyarlamalı bellek yapısında bir programlama ve yasaklı arama algoritması kullanılmıştır (Crevier et al., 2007: 757). Çalışmaların 2007 yılından önce, karbon emisyonunu düşürmek için yapılan akaryakıt miktarı minimizasyonu problemi olarak şekillenen literatürde, yeşil kısıtlı araç rotalama problemi adı altında ilk uygulama 2012 yılında Erdoğan ve Miller-Hooks tarafından hazırlanmıştır. Karbon emisyonundan kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması amacıyla yapılan çalışmada, yeşil kısıtlı araç rotalama problemi modelini kurmak amacıyla karma tamsayılı programlama tekniği kullanılmıştır. 2013 yılında Franceschetti ve arkadaşları, zamana bağlı olarak kirlilik kısıtlı rotalama problemi adında maliyet tabanlı bir rotalama modeli önermişlerdir. 2014 yılında Schneider ve arkadaşları, zaman pencereli bir araç rotalama problemi için şarj istasyonu yollarının rotaya dâhil edilmiş olduğu elektrikli araçların kullanıldığı bir model önermişlerdir. 2017 yılında Xiao ve Konak, zaman pencereli bir araç rotalama probleminde karbon emisyonu optimizasyonu yapmıştır. 30 küçük ve 14 büyük kapasiteli araçtan oluşan filo için yapılan çözümlemede genetik algoritma ve dinamik programlama tabanlı olan bir melez algoritma önerilmiştir. Melez algoritmadan oldukça etkin sonuçlar elde edilmiş ve yakıt tüketimi düşürülmek suretiyle karbon emisyonu miktarı optimize edilmiştir (Xiao ve Konak, 2017: 1453).

b. Araç Rotalama Problemi Çözüm Yöntemleri

Yöneylem araştırmacıları araç rotalama problemlerine birçok farklı teknik geliştirmişlerdir. Araç rotalama problemleri için geliştirilen çözüm yaklaşımları kesin, sezgisel ve metasezgisel çözüm yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Kesin çözüm yaklaşımlarında problemdeki tüm kısıtların göz önüne alınarak en uygun çözümün bulunması hedeflenir. Ancak çok değişkenli ve kısıtlı büyük problemlerde çözüme kesin yaklaşımlar ile ulaşmak oldukça zordur. Çünkü araç rotalama problemleri kombinatoriyel NP-zor problem sınıfında olan ve çözümü oldukça zor problemlerdendir. Kesin çözüm küçük çaplı ve çözümü kolay problemler için kullanışlı olacaktır. Kesin çözüm için genel olarak dal sınır, kesim düzlemi, dal kesim ve dinamik programlama olmak üzere dört temel çözüm yaklaşımı önerilmiştir (Toth ve Vigo, 2002: 455). Gerçek hayat problemleri ise oldukça karmaşık kısıtlar ve büyük ölçekli olmaları nedeniyle bu yaklaşımlar yerine sezgisel yapıdaki yaklaşımlar daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Çünkü sezgisel yöntemler daha kısa zamanda ve en uygun sonuca en yakın olacak değerdeki çözümleri verebilmektedir. Yani, sezgisel yaklaşımlarda en uygun çözüm sonuçları yerine en iyi çözüme en yakın olan çözümler söz konusudur. Burada temel amaç çözümlenme zamanını kısaltmaktır (Murty ve Djang, 1999: 179). Araç rotalama problemlerinin çözümünde kullanılan temel sezgisel çözüm yaklaşımları ise; rota oluşturma yöntemleri, iki aşamalı yöntemler ve rota iyileştirme yöntemleri olarak sıralanabilir. Meta sezgisel yaklaşımlar ise,

klasik sezgisel yaklaşımların aksi olarak alt seviyelerde ve uygun olmayan bazı hareketlere izin vermesi sebebiyle çözüm uzayı içerisinde en verimli çözüme imkân sağlarlar. Literatürde farklı amaçlarla ve farklı problem türleri için kullanılan birçok metasezgisel çözüm yaklaşımı olmakla birlikte, araç rotalama problemleri için kullanılan temel bazı teknikler ön plana çıkmaktadır. Bu çözüm yaklaşımları; genetik algoritmalar, yasaklı arama algoritması, tavlama benzetimi algoritması, tepe tırmanma algoritması, karınca kolonisi algoritması, yapay arı kolonisi algoritması, parçacık sürü algoritması, yapay sinir ağları algoritması ve melez algoritmalar olarak ifade edilebilir.

4. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL VE ÖRNEK UYGULAMA

Çalışmanın bu bölümünde, literatürde geçtiğimiz yıllarda yer bulmaya başlamış yeşil kısıtlı araç rotalama problemi için bir matematiksel model önerisi ve uygulamaya yer verilmiştir. Yeşil kısıtlı araç rotalama problemleri, çevresel sürdürülebilirlik hedefi ile akaryakıt sarfiyatını minimize etmek, karbon emisyonu miktarını düşürmek ve toplam dağıtım maliyetlerini minimize etmek temeline dayanan optimizasyon problemleridir. Yapılan araştırmalara göre, birçok faktörün karbon emisyonu ve yakıt tüketimi miktarını etkilediği ifade edilmiştir. Bu faktörler; aracın yük miktarı, aracın hızı, zamana bağlı hız, yolun eğimi, seyahat uzunluğu, araç filosu, araçların marka, model, kapasite ve motor yapısı gibi unsurlardır. Ancak, araçların genel olarak standart tam yüklü olması ve yük ağırlıklarının sabit olması, değişken trafik durumları, yolların yapısının belirsizliği gibi durumlar dolayısıyla lojistik taşımacılar için araç yükü miktarı, hız ve yol eğimi kısıtları yüksek öneme sahip olmamaktadır. Lojistik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin kullandıkları araçların heterojen kapasitede olmaları ve araç marka, model ve motor yapılarının da farklılık göstermesi sebebiyle, araçların kapasiteleri, marka ve modeline göre sınıfları gibi kısıtlara göre tükettiği yakıt ve ortaya çıkardığı karbon emisyonu miktarları dikkate alınmıştır. Çalışmada kullanılan optimizasyon modelinde, araçların kapasite, harcadığı birim yakıt miktarları dikkate alınarak toplam sevkiyat mesafesinin optimize edilmesi ile harcanan akaryakıt miktarının düşürülmesi ve karbon emisyonunun minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, kapasite kısıtlı ve heterojen araçlı filo yapıda problemler için, yeşil kısıtlı araç rotalama problemi optimizasyonu modeli önerilmiştir. Burada temel amaç, lojistik sektöründe farklı kapasitelere sahip araçların dağıtım ağı içerisinde en uygun şekilde yüke atanması ve en uygun rota ile en az mesafeyi kat ederek yakıt tasarrufuna ulaşmasıdır. Bu sonuç, çevreye yayılan karbon emisyonu miktarını düşürecek ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunacaktır. Bu bölümde ilk olarak önerilen matematiksel model ifade edilecek ve basit klasik bir araç rotalama problemi için örnek uygulamaya yer verilecektir.

a. Matematiksel Model

Bu bölümde yeşil araç rotalama problemleri için çok amaçlı bir matematiksel model önerilmiştir. Modelin parametreleri ve karar değişkenleri açıklanmış, amaç fonksiyonları ve kısıt denklemleri ifade edilmiştir.

i) Parameterler

Z = Tüm araçlar için geçerli olan, günlük toplam çalışma süresi. (saat)

M = Trafikte bir saatte gidilen ortalama yol. (km)

$K_v = v \in V$ aracının taşıma kapasitesi. (desi)

$B_v = v \in V$ aracının km'de yaktığı yakıt miktarı. (litre)

$E_v = v \in V$ aracının km'de ürettiği karbon emisyon miktarı. (CO₂e)

$T_{ij} = i$ ve j düğümleri arasındaki uzaklık. (km)

$Q_i = i \in N \setminus \{0\}$ müşterisinin siparişlerinin toplamı. (desi)

a = Depoda araçlara yapılan yüklemelerin sabit süresi. (saat)

b = Müşterilere yapılan teslimat işleminin sabit süresi. (saat)

ii) Karar Değişkenleri

$x_{ijvr} =$ Eğer araç $v \in V$, tur $r \in R$ de, ij arkından geçiyorsa 1, geçmiyorsa 0

$y_{ivr} =$ Eğer araç $v \in V$, tur $r \in R$ de, i müşterisine uğruyorsa 1, uğramıyorsa 0

$q_{ijvr} =$ Araç $v \in V$, tur $r \in R$ de, ij arkında üzerinde taşıdığı toplam yük miktarı (desi)

iii) Setler

$N = \{0,1,\dots,N\}$ düğüm seti (0 numaralı düğüm depoyu temsil etmekte, diğer düğümler müşteriler için kullanılmaktadır)

$A = \{(i,j) \mid i,j \in N\}$ arklar. (iki düğümü birbirine bağlayan yollar)

$V = \{1,\dots,V\}$ araç seti.

$R = \{0,1,\dots,N-1\}$ bir aracın atabileceği tur seti.

iv) Amaç fonksiyonu:

Amaç fonksiyon 1.

$$\text{Min} \quad \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N T_{ij} \sum_{v=1}^V \sum_{r=0}^{N-1} B_v \cdot X_{ijvr} \quad (4.1)$$

Amaç fonksiyon 2.

$$\text{Min} \quad \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N T_{ij} \sum_{v=1}^V \sum_{r=0}^{N-1} E_v \cdot X_{ijvr} \quad (4.2)$$

v) Kısıtlar:

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^V \sum_{r=0}^{N-1} Y_{ivr} &= 1 \\ \forall i \in N \setminus \{0\} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^N X_{ijvr} &= \sum_{j=0}^N X_{jivr} = Y_{ivr} \\ \forall i \in N, v \in V, r \in R \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\sum_{j=0}^N q_{jivr} - \sum_{j=0}^N q_{ijvr} = Q_i \cdot Y_{ivr} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, v \in V, r \in R \quad (4.5)$$

$$q_{ijvr} \leq K_v \cdot X_{ijvr} \quad \forall (i,j) \in A, v \in V, r \in R \quad (4.6)$$

$$\sum_{r=0}^{N-1} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N T_{ij} \cdot X_{ijvr} / M + \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{i=1}^N Y_{ivr} \cdot b + \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{j=1}^N X_{0jvr} \cdot a \leq Z \quad \forall v \in V \quad (4.7)$$

$$x_{ijvr} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A, v \in V, r \in R \quad (4.8)$$

$$y_{ivr} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, v \in V, r \in R \quad (4.9)$$

$$q_{ijvr} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, v \in V, r \in R \quad (4.10)$$

Birinci amaç fonksiyonu (4.1) toplam harcanan yakıt miktarını minimize etmeye çalışmaktadır. İkinci amaç fonksiyonu (4.2) toplam üretilen karbon emisyonu miktarını minimize etmeyi hedeflemektedir. Kısıt (4.3) bir müşteriye sadece bir kez gidilmesi gerektiğini, kısıt (4.4) giriş olan her düğümden aynı zamanda bir çıkışta olması gerektiğini, kısıt (4.5) müşterilere teslim edilen sipariş miktarının onların talebi kadar olması gerektiğini, kısıt (4.6) aracın herhangi bir zamanda üzerinde taşıdığı yükün kapasitesinden fazla olmaması gerektiğini, kısıt (4.7) bir aracın yolda geçirdiği toplam zaman, aracın toplam teslimat süresi ve aracın depoda harcadığı toplam yükleme süresi toplamının aracın günlük mesai süresin

aşmaması gerektiğini, kısıt (4.8) ve (4.9) x_{ijvr} ve y_{ivr} değişkenlerinin 1 veya 0 değerini alabileceğini ifade etmektedir. Kısıt (4.10) ise her aracın taşıdığı toplam yük miktarının 0'dan büyük veya eşit olması gerektiğini göstermektedir.

b. Örnek Uygulama

Önerilen matematik model web üzerinden elde edilmiş basit klasik bir araç rotalama problemi örneği üzerinde uygulanacaktır. Örnek için ilk çözüm, herhangi bir yöntem olmaksızın lojistik işletmelerin kullandığı el yordamıyla geliştirilen çözümdür. Matematik model ile çözüm için ise Matlab programı kullanılmıştır. Burada amaç, gerçek hayat problemlerinde herhangi bir yöntem kullanılmadan oluşturulan çözüm ile matematiksel model yordamıyla yapılan çözüm arasındaki farkı ortaya koymaktır.

i) *Problemin Tanımı:* Merkez deposundan 3 heterojen kısıtlı araç ile dağıtım yapan ABC işletmesi günlük 9 müşteriye siparişleri için hizmet vermektedir. Trafikte gidilen ortalama araç hızı 40 km/saattir. Depodaki yükleme işlemleri ortalama 15 dk, müşterilere teslimat süresi ortalama 10 dk olarak verilmiştir. Maliyet dolayısıyla her araç için günde 2 tur atma ve toplam 3 saat çalışma kısıtları bulunmaktadır.

ii) *Veri Seti:*

Tablo 2. Araç Bilgileri

Araçlar	Kapasite(Desi)	Yakıt Tüketimi (lt/km)	Karbon Emisyonu Miktarı (gr/km)
A1	500	0,05	110
A2	1000	0,08	119
A3	4000	0,12	166

Tablo 3. Müşteri Siparişleri(desi)

M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
1000	1500	1800	1700	300	500	900	400	600

Tablo 4. Mesafe Matrisi(km)

	Depo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Depo	0	12	11	7	10	10	9	8	6	12
M1	12	0	8	5	9	12	14	16	17	22
M2	11	8	0	9	15	17	8	18	14	22
M3	7	5	9	0	7	9	11	12	12	17
M4	10	9	15	7	0	3	17	7	15	18
M5	10	12	17	9	3	0	18	6	15	15
M6	9	14	8	11	17	18	0	16	8	16
M7	8	16	18	12	7	6	16	0	11	11
M8	6	17	14	12	15	15	8	11	0	10
M9	12	22	22	17	18	15	16	11	10	0

iii) Çözüm 1: Herhangi bir yöntem kullanılmadan mevcut durumda sezgisel olarak yapılan çözüm için kabuller:

- En az mazot yakan aracı seç,
- Seçilen aracın kapasitesi kadar yükleme yap ve rastgele sırayla dağıtımına başla.

Tablo 5. Mevcut Çözüm Sonuçları

A1(Seçim1)		A2(Seçim2)		A3(Seçim3)	
Kapasite: 500 desi		Kapasite: 1.000 desi		Kapasite: 4.000 desi	
Tüketim		Tüketim		Tüketim	
Yakıt(lt/km)	CO ₂ (g/km)	Yakıt(lt/km)	CO ₂ (g/km)	Yakıt(lt/km)	CO ₂ (g/km)
0,05	110	0,08	119	0,12	166
Turlar		Turlar		Turlar	
1.tur	2.tur	1.tur	2.tur	1.tur	2.tur
D=>M6=>D	D=>M8=>D	D=>M5=>M9=>D	D=>M7=>D	D=>M1=>M3=>D	D=>M2=>M4=>D
Sonuçlar		Sonuçlar		Sonuçlar	
Süre(dk):	95	Süre(dk):	149,5	Süre(dk):	160
Yol(km):	30	Yol(km):	53	Yol(km):	60
Yakıt(lt):	1,5	Yakıt(lt):	4,24	Yakıt(lt):	7,2
CO ₂ (g):	3300	CO ₂ (g):	6307	CO ₂ (g):	9960

Mevcut çözüm sonuçlarına göre toplam yakıt miktarı:

$$A1 + A2 + A3 = 1,5 + 4,24 + 7,2 = 12,92 \text{ lt}$$

Mevcut çözüm sonuçlarına göre toplam karbon emisyonu miktarı:

$$A1 + A2 + A3 = 3300 + 6307 + 9960 = 19.567 \text{ gr}$$

iv) Çözüm 2: Önerilen matematiksel model ile Matlab programında gerçekleştirilen çözümdür. Model, 1. aracı optimizasyonu bozması gerekçesi ile kullanmamıştır.

Tablo 6. Matematiksel Çözüm Sonuçları

A1(Seçim yok)		A2(Seçim1)		A3(Seçim2)	
Kapasite: 500 desİ		Kapasite: 1.000 desİ		Kapasite: 4.000 desİ	
Tüketim		Tüketim		Tüketim	
Yakıt(lt/km)	CO ₂ (g/km)	Yakıt(lt/km)	CO ₂ (g/km)	Yakıt(lt/km)	CO ₂ (g/km)
0,05	110	0,08	119	0,12	166
Turlar		Turlar		Turlar	
1.tur	2.tur	1.tur	2.tur	1.tur	2.tur
-	-	D=>M8=>M9=>D	D=>M1=>D	D=>M6=>M2=>M3=>D	D=>M7=>M5=>M4=>D
Sonuçlar		Sonuçlar		Sonuçlar	
Süre(dk):	0	Süre(dk):	138	Süre(dk):	180
Yol(km):	0	Yol(km):	52	Yol(km):	60
Yakıt(lt):	0	Yakıt(lt):	4,16	Yakıt(lt):	7,2
CO ₂ (g):	0	CO ₂ (g):	6188	CO ₂ (g):	9960

Matematiksel model ile çözüm sonuçlarına göre toplam yakıt miktarı:

$$A1 + A2 + A3 = 0 + 4,16 + 7,2 = 11,36 \text{ lt}$$

Matematiksel model ile sonuçlarına göre toplam karbon emisyonu miktarı:

$$A1 + A2 + A3 = 0 + 6188 + 9960 = 16.148 \text{ gr}$$

Çözüm 1 ve çözüm 2 sonuçları incelendiğinde, araçların modele uygun rotalamalar sonucu yakıt ve karbon emisyonu miktarlarında düşüş sağlanmıştır. Sezgisel olarak herhangi bir yöntem olmadan yapılan çözüm 1’de, tüm araçlar sadece yakıt tüketim miktarları dikkate alınarak rastgele rotalanmış ve kapasiteleri dikkate alınmamıştır. Ancak önerilen matematiksel model yordamıyla gerçekleştirilen çözüm 2, araçları yakıt tüketimi, karbon emisyonları, kapasiteleri, mesafeler, talep miktarları gibi modelde ifade edilen kısıtlara göre

değerlendirmiştir. Çözüm 2 yeşil kısıtlı araç rotalama prensipleri gereği, en az aracı kullanarak sevkiyat planı oluşturma kuralı sebebiyle 1. aracı modele dahil etmemiştir.

5. SONUÇ

Lojistik yönetimi, mal veya hizmetlerin üretim kaynaklarından nihai tüketiciye ulaşana kadar geçirdiği tüm sürecin içerisinde yer alması ile sosyal ve ekonomik hayatın en önemli unsuru durumundadır. Ülke ekonomilerini büyük ölçüde etkileyen ve refah seviyesi ile doğrudan ilişkisi bulunan lojistik faaliyetleri, yüksek maliyetli ve çevreye zararlı etkileri bulunabilen operasyonlar içerir. Bu maliyetlerin başında karayolu taşımacılığı gelmektedir. Karayolu taşımacılığı tükettiği yüksek yakıt ve çevreye saldırdığı karbon gazı dolayısıyla, önemli bir maliyet kalemi ve çevresel bir tehdit olabilmektedir. Dolayısıyla, lojistik hizmet üreten işletmeler, maliyetleri düşürmek ve çevreye en az zararlı faaliyetlerini organize etmek ile sürdürülebilir kurumlar olabileceklerdir.

Bu çalışmada, sürdürülebilir lojistik yönetimi stratejisi olan yeşil lojistik kavramı ve yeşil kısıtlı araç rotalama problemi üzerinde durulmuştur. Yeşil kısıtlı araç rotalama problemi hakkında bir optimizasyon modeli sunulmuş ve örnek bir uygulama ile sonuçlar incelenmiştir. Önerilen matematisel model, klasik araç rotalama problemlerinin dikkate almadığı yakıt tüketimi ve karbon emisyonu kısıtlarını çok yönlü olarak içermektedir. Yeşil lojistik prensiplerine göre hazırlanan model, bu yönüyle literatüre katkı sağlayacaktır. Model büyük çaplı problemlerin çözümünde metasezgisel teknikler ile uygulanabilir. Deneysel olarak modelin etkinliği basit bir problem üzerinde gösterilmiştir. Çalışma sonuçları göstermiştir ki, herhangi bir yöntem kullanılmadan organize edilen dağıtım ağları tüketilen yakıt miktarı ve karbon emisyonunu arttıracaktır. İşletmeler dağıtım yönetimi organizasyonlarını planlarken, sistemlerine en uygun araç rotalama modeli ile tüketilen yakıt miktarı ve karbon emisyonu miktarlarını önemli ölçüde düşürebileceklerdir. Ancak, bilimsel teknikler ile yapılan optimizasyonlar için harcanan altyapı ve personel maliyetleri dolayısıyla işletmeler kısa vadede bu tür çalışmalardan kaçınmaktadır. İşletmeler ve ülke yönetimleri, konu hakkında kısa vadeli maliyet değerlendirmeleri yapmak yerine geleceğe yönelik yatırımlar yapmaları, sosyal ve ekonomik hayatın sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir.

KAYNAKÇA

Bowersox, Donald J. (1996) *Logistical Management-The Integrated Supply Chain Process*, McGraw Hill, New York.

Chen, Xin ve Yuanyuan Zhang (2010) "Study On The Modes And Means Of Green Logistics Transportation" International Conference of Logistics Engineering and Management (ICLEM), American Society of Civil Engineers, 8-10 Ekim 2010, Chengdu, China.

Christopher, Martin (2011) *Logistics, the supply chain and competitive strategy. In Logistics and Supply Chain Management (4th ed.)*. Prentice Hall. London.

Crevier, B., Cordeau, J-F. ve G. Laporte (2007) "The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes", *European Journal of Operational Research*, 176(2), s. 756-773.

Figliozzi, Miguel (2010) "Vehicle routing problem for emissions minimization". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1(2197), s. 1-6.

Grant, David B., Lambert, Douglas M. ve Lisa M. Ellram (2006) *Fundamentals of Logistics Management*, McGraw Hill, New York.
[http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20\(July%201\).pdf](http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20(July%201).pdf)

Kirby, Howard R., Hutton B., McQuaid, R. W., Raeside R. ve X. Zhang (2000) "Modelling the effects of transport policy levers on fuel efficiency and national fuel consumption", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 5(4), s. 265-282.
Murty, Katta G. ve Philipp A. Djang (1999) "The US Army National Guard's Mobile Training Simulators And Routing Problem", *Operations Research*, 47(2), s. 179.

Parberry, Ian (1996) "Scalability of a neural network for the knight's tour problem", *Neuro computing*, 12(1), s. 19-20.

Sharma, A., R. Iyer G., Mehrotra A., ve R. Krishnan (2010) "Sustainability and business-to-business marketing: A framework and implications", *Industrial Marketing Management*, 39(2), s. 2.

Sönmez, A. ve B. Tanıdır (2016) *Müsiad Araştırma Raporları: 2015 Lojistik Sektör Raporu, Lojistik Sektöründe Sürdürülebilirlik Yeşil Lojistik*, Mavi Ofset, İstanbul.

Srivastara, Samir (2007) "Green Supply-Chain Management: A State-Of-The-Art Literature Review", *International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management*, 7(1), s. 53-80.

Toth, Paolo ve Daniele Vigo (2002) "Models, Relaxations And Exact Approaches For The Capacitated Vehicle Routing Problem", *Discrete Applied Mathematics*, 123(1-3), s. 451-495.

Wu, Haw-Jan ve Steven C. Dunn (1995) *“Environmentally responsible logistics systems”*, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 25(2), s. 20-38.

Xiao, Yiyong & Abdullah Konak (2017) *“A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem”*, Journal of Cleaner Production, 167 (1), s. 1450-1463.