

KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİNDE YEŞİL LOJİSTİK VE YER SEÇİMİ İÇİN BİR KARMA TAMSAYILI PROGRAMLAMA MODELİ ÖNERİSİ¹

Araştırma Makalesi

Hasan GÖRGÜLÜ²
Turan PAKSOY³
Ahmet ÇALIK⁴

GÖRGÜLÜ, H., PAKSOY, T., ÇALIK, A., (2020), **Kapalı Döngü Tedarik Zincirinde Yeşil Lojistik ve Yer Seçimi İçin Bir Karma Tamsayılı Programlama Modeli Önerisi**, Verimlilik Dergisi, Yıl: 2020, Sayı: 3, T. C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Yayını.

ÖZET

Günümüzde, iklim değişikliği ve küresel ısınma öneminin artmasıyla, dünyada tedarik zincirlerinin çevresel etkilerini azaltmayı amaçlayan birçok mevzuat ve düzenleme yayınlanmıştır. Bu nedenle, Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi (YTZY) şirketler için önemli bir paradigma olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, çevresel hususlar yeni bir Kapalı Döngü Tedarik Zinciri (KDTZ) Modeli ile incelenmiştir. Potansiyel tesislerin teknoloji seviyelerine (düşük, orta, yüksek) ilişkin toplam tedarik zinciri maliyeti ve karbondioksit emisyonunu minimize etmek amacıyla yeni ve kullanılmış ürünler için tesisler, toplama merkezleri ve yenileme merkezlerinin optimal yerleşimine karar vermek üzere yeşil veya sürdürülebilir yer seçimi ve ulaşım konuları ele alınmıştır. Burada, düşük teknoloji seviyesi, tesislerde daha düşük tesis sabit maliyeti, ancak daha yüksek karbondioksit emisyon seviyesini; yüksek teknoloji seviyesi ise tesislerde daha yüksek tesis sabit maliyeti ancak daha düşük çevresel maliyetleri ifade etmektedir. Önerilen model, yeşil ulaşım vasıtasıyla taşıma maliyeti ve karbondioksit emisyon maliyeti arasında bir denge oluşturmaktadır. Şebekedeki tüm ulaşımın, taşıma için üç farklı tipte taşıtın kullanıldığı bir lojistik firmasından sağlandığı kabul edilmiştir. Bu araç tiplerinin her biri ile taşınabilen yük aralıkları önceden belirlenmiştir. Büyük boyutlu kamyonlar seçilerek taşıma masrafları azaltılabilmektedir ancak bu durum küçük boyutlu

¹ Bu makale, KTO Karatay Üniversitesi İşletme Anabilim Dalı Doktora Öğrencisi Hasan GÖRGÜLÜ'nün doktora tez çalışmasının bir parçasıdır.

² **Hasan GÖRGÜLÜ**, KTO Karatay Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme ABD, Doktora Öğrencisi. ORCID: 0000-0002-5842-0898

³ **Turan PAKSOY**, Prof. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü. ORCID: 0000-0001-8051-8560

⁴ **Ahmet ÇALIK**, Dr. Öğr. Üyesi, KTO Karatay Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü. ORCID: 0000-0002-6796-0052

* Makale Gönderim Tarihi: 21.01.2019 Kabul Tarihi: 08.08.2019

kamyonlarla karşılaştırıldığında olumsuz çevresel etkilere neden olmaktadır. Bu tür çatışmalarla başa çıkmak için bir Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) Modeli önerilmiştir. Geliştirilen modelin etkinliğini göstermek için sayısal bir örnek uygulanmış ve analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi, Karbondioksit Emisyonu, Yeşil Yer Seçimi, Yeşil Ulaşım, Yük Aralığı.

A MIXED-INTEGER PROGRAMMING MODEL FOR GREEN LOCATION AND TRANSPORTATION IN A CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN

ABSTRACT

Nowadays, due to increasing importance of climate change and global warming, numerous legislations and regulations aiming to reduce environmental impact of supply chains have been published throughout the world. Therefore, Green Supply Chain Management (GSCM) has emerged as an important paradigm for the companies. In this paper, we investigate the environmental subjects by the help of a new Closed-Loop Supply Chain (CLSC) model. Green or sustainable location and transportation issues are discussed while deciding on the optimal locations of plants, collection centers and refurbishing centers for new and used products in order to minimize the total supply chain cost and carbon-dioxide emission considering the technology levels (low, medium, high) of potential plants. Herein, low technology level refers to lower fixed facility costs but higher carbon-dioxide emission levels at plants. Contrarily, high technology refers to higher fixed facility costs but lower environmental costs at plants. By the means of green transportation, the proposed model includes a trade-off between transportation cost and carbon-dioxide emission cost. It is assumed that all transportation in the network is out-sourced to a logistics firm where three different types of vehicles are used. Load ranges that can be transported with each of these vehicle types are pre-determined. Transportation costs can be reduced by choosing large-sized trucks but it causes negative environmental effects compared to small-sized ones. To handle these kinds of conflicts, a mixed-integer linear programming (MILP) model is proposed. A numerical example is implemented and analysed in order to demonstrate the efficiency of the developed model.

Keywords: Green Supply Chain Management; Carbon Dioxide Emission; Green Location, Green Transportation, Load Ranges.

1. GİRİŞ

Tedarik zinciri yönetimi ve ilgili konular, uygulamacılardan araştırmacılara çok popüler bir araştırma konusudur. Devlet yasaları ve toplum bilinci nedeniyle yalın, yeşil ve esnek gibi yeni paradigmlar ortaya çıkmıştır. Şirketler kendi pazarlarında daha rekabetçi olmak için bu paradigmları tedarik zinciri ağlarına entegre etmeye başlamışlardır. Bu nedenle, bu çalışmada, geliştirilen model kullanılarak yeşil veya sürdürülebilir yer seçimi ve ulaşım konuları incelenmiştir (Govindan vd., 2016; Tahirov vd., 2016).

Çevresel konulardaki artan endişeler, üreticileri bu sorunları geleneksel tedarik zinciri yönetimine entegre etmeye zorlamaktadır. Tedarik zinciri yönetiminde, ulaşım ve yer seçimi stratejileri ile ilgili kararlar, tedarik zincirinin giderek daha karmaşık hale gelmesi münasebetiyle önemli bir rol oynamaktadır. Tedarik zinciri yönetiminde dört ana karar alanı olmasına rağmen, üreticiler genellikle yeşil konulara göre yer seçimi kararları vermeyi düşünmemektedir. Bu yüzden, optimal araç tipleri aracılığıyla tesislerin, toplama merkezlerinin ve yenileme merkezlerinin optimal lokasyonlarını belirlemeye odaklanılmıştır.

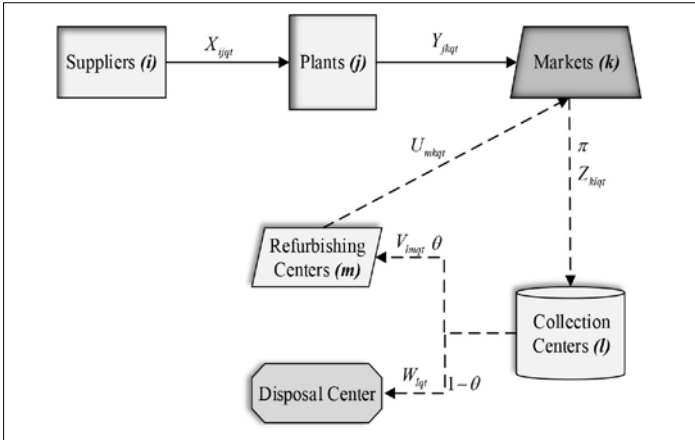
KDTZ; tasarım ve planlama (Demirel ve Gökçen, 2008; Pishvae vd., 2011), fiyat ve koordinasyon (Toktay ve Wei, 2011; Wei vd., 2013), envanter yönetimi (Topcu vd., 2013; Mitra, 2013) gibi çeşitli alanlarda çalışılmıştır. Ayrıca, yeşil, yalın ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde bazı çalışmalar bulunabilir. Ugarte vd. (2016) mevcut yalın lojistik uygulamalarının çevreye etkisini araştırmak için farklı hipotezler oluşturmuş ve bu hipotezleri Simülasyon Modeli ile test etmişlerdir. Dües vd. (2013), yalın ve yeşil tedarik zinciri yönetimi uygulamaları arasındaki ilişkiye odaklanarak önceki çalışmalarını değerlendiren bir çalışma sağlamıştır. Fahimnia vd. (2015), araştırmacılar için daha az ilgi çeken ileri tedarik zinciri için, atık üretimi, enerji tüketimi ve karbon emisyonları maliyeti ile çevresel bozulma arasında bir ödünleşimi içeren bir model oluşturmuşlardır.

Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde, üzerinde çalışılan problem açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, geliştirilen KDTZ Modeli ile varsayım ve notasyonların listeleri tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde, KDTZ Modelinin varsayımsal bir veri aracılığıyla uygulanabilirliği tartışılmıştır. Beşinci bölümde, gelecekteki araştırmalara yönelik zorluklarla birlikte sonuçlara değinilmiştir.

2. PROBLEMİN TANIMI

Bu çalışmada tedarikçiler (i), tesisler (j), marketler (k), toplama merkezleri (l), yenileme merkezleri (m) ve bertaraf merkezi içeren bir KDTZ ağı ele

alınmıştır. Şekil 1'de ileri akış düz çizgi, ters akış ise kesikli çizgi okları ile gösterilmiştir. İleriye doğru akış, tedarikçilerle başlar, tesislerde parçaların montajı ile devam eder ve marketlerle biter. Ters akış, piyasadan kullanılmış ürünlerin toplanması ile başlar ve yenileme merkezleri veya bertaraf merkezi ile biter. Üretim süreci sonrasında bitmiş ürünler taleplere göre marketlere aktarılır. Kullanılan ürünler, bir dönem kullanıldıktan sonra, toplama merkezlerinde toplanır ve durumlarına göre yenileme merkezlerine veya bertaraf merkezine gönderilir. Karar vericiler, tedarik zinciri ağındaki tüm arklardaki taşıma modlarını optimize etmek için, kamyon seçeneklerinin küçük boy kamyonlar, orta boy kamyonlar ve büyük boy kamyonlardan oluştuğunu göz önüne almalıdır. Burada kamyon seçenekleri, bu tip araçların kapasitelerine göre yük aralıkları anlamına gelir. Önerilen modelde, parçalı doğrusal fonksiyonlar olarak verilen yük aralıkları önceden belirlenmiştir. Taşıma masrafları büyük boy kamyonlar seçilerek azaltılabilir, ancak küçük boy kamyonlarla karşılaştırıldığında olumsuz çevresel etkilere neden olur. Çevreye duyarlı bir KDTZ tasarlamak için, taşıma maliyeti ve tesis sabit maliyeti düşük tutulurken karar vericilerin, taşımaları, küçük gruplar (yük aralıkları) halinde sağlaması ve tesislerin de düşük karbondioksit emisyonlu yüksek teknoloji seviyesiyle donatılması gerekir. Fakat bu çelişkili bir amaçtır. Çünkü taşıma için küçük boy kamyonları ve tesislerde yüksek teknoloji seviyeleri tercih ettiğimizde, bu karar daha yüksek taşıma ve tesis sabit maliyetine neden olur. Önerilen model, bu çelişkili iki bakış açısı arasında uzlaşık bir çözüm bulmaya çalışmaktadır. Ürün kalitesi ve satış fiyatının, fabrikalarda seçilen teknoloji seviyesine bağlı olmadığı varsayılmaktadır.



Şekil 1. Geliştirilen Modelin Yapısı

3. MODEL FORMÜLASYONU

3.1. İndisler

- I Tedarikçiler kümesi $i \in I$
 J Tesisler kümesi $j \in J$
 K Marketler kümesi $k \in K$
 L Toplama merkezleri kümesi $l \in L$
 M Yenileme merkezleri kümesi $m \in M$
 N Tesislerin teknoloji seviyeleri kümesi $n \in N$
 Q Yük seviyesi aralığı kümesi $q \in Q$ (araç tipleri)
 T Periyotlar kümesi $t \in T$

3.2. Parametreler

Mesafeler ve birim taşıma maliyeti

- d_{ij} 'i' tedarikçisi ile 'j' tesisi arasındaki mesafe (km)
 d_{jk} 'j' tesisi ile 'k' marketi arasındaki mesafe (km)
 d_{kl} 'k' marketi ile 'l' toplama merkezi arasındaki mesafe (km)
 d_{lm} 'l' toplama merkezi ve 'm' yenileme merkezi arasındaki mesafe (km)
 d_l 'l' toplama merkezi ile bertaraf merkezi arasındaki mesafe (km)
 d_{mk} 'm' yenileme merkezi ile 'k' marketi arasındaki mesafe (km)
 d_{qt} 't' zaman periyodunda 'q' yük seviyesiyle birim taşıma maliyeti (\$/ton.km)

Kapasiteler

- $caps_{it}$ 't' zaman periyodunda 'i' tedarikçisinin kapasitesi (ton)
 $capp_{jnt}$ 't' zaman periyodunda 'n' teknoloji seviyesine sahip 'j' tesisinin kapasitesi (ton)
 $capcc_{lt}$ 't' zaman periyodunda 'l' toplama merkezinin kapasitesi (ton)
 $caprf_{mt}$ 't' zaman periyodunda 'm' yenileme merkezinin kapasitesi (ton)

Talepler

- dem_k 't' zaman periyodunda 'k' marketinin talebi (ton)

Sabit maliyetler

- fcp_{jnt} 't' zaman periyodunda 'n' teknoloji seviyesine sahip 'j' tesisinin tesis sabit maliyeti (\$)
 fcc_{lt} 't' zaman periyodunda 'l' toplama merkezinin tesis sabit maliyeti (\$)
 frc_{mt} 't' zaman periyodunda 'm' yenileme merkezinin tesis sabit maliyeti (\$)

Satın alma ve işletme maliyetleri

pc_i 'i' tedarikçisinden birim satın alma maliyeti (\$/ton)

pr_j 'j' tesisindeki bitmiş ürünün birim üretim maliyeti (\$/ton)

$colc_{kl}$ 'l' toplama merkezi tarafından 'k' marketinden birim ürün toplama maliyeti (\$/ton)

rfc_m 'm' yenileme merkezinde birim ürün yenileme maliyeti (\$/ton)

dc Bertaraf merkezinde birim ürün bertaraf maliyeti (\$/ton)

cos_m 'm' yenileme merkezinde birim ürün maliyet tasarrufu (\$/ton)

CO₂ emisyonu ve ilgili parametreler

cep_{jn} 'n' teknoloji seviyesine sahip 'j' tesisinde bir ton ürünün üretilmesiyle açığa çıkan CO₂ emisyon miktarı (gr/ton)

C_{CO_2} CO₂ emisyonunun birim maliyeti (\$/gr)

cet_q 'q' yük seviyesi aralığı ile bir kilometre boyunca bir ton yük taşımayla açığa çıkan CO₂ emisyon miktarı (gr/ton.km)

Oranlar ve yüzdeler

π Toplama merkezleri tarafından toplanan ürün yüzdesi (%)

θ Toplama merkezlerinden yenileme merkezlerine gönderilen ürün yüzdesi (%)

$1 - \theta$ Toplama merkezlerinden bertaraf merkezine gönderilen ürün yüzdesi (%)

u_q 'q' yük seviyesi aralığının alt sınırı (ton)

M Büyük bir sayı

3.3. Değişkenler

X_{ijqt} 't' zaman periyodunda 'i' tedarikçisinden 'q' yük seviyesi ile 'j' tesisine tedarik edilen parça miktarı (ton)

Y_{jkqt} 't' zaman periyodunda 'j' tesisinden 'q' yük seviyesi ile 'k' marketine teslim edilen ürün miktarı (ton)

Z_{klqt} 't' zaman periyodunda 'l' toplama merkezi tarafından 'q' yük seviyesi ile 'k' marketinden toplanan ürün miktarı (ton)

V_{lmqt} 't' zaman periyodunda 'l' toplama merkezinden 'q' yük seviyesi ile 'm' yenileme merkezine sevk edilen ürün miktarı (ton)

W_{lqt} 't' zaman periyodunda 'l' toplama merkezinden 'q' yük seviyesi ile bertaraf merkezine sevk edilen ürün miktarı (ton)

U_{mkqt} 't' zaman periyodunda 'm' yenileme merkezinden 'q' yük seviyesi ile 'k' marketine sevk edilen ürün miktarı (ton)

XX_{ijqt} Parçalar 't' zaman periyodunda 'i' tedarikçisinden 'q' yük seviyesi ile 'j' tesisine taşınırsa 1; aksi halde, 0

YY_{jkqt} Parçalar 't' zaman periyodunda 'j' tesisinden 'q' yük seviyesi ile 'k' marketine taşınırsa 1; aksi halde, 0

ZZ_{klqt} Parçalar 't' zaman periyodunda 'k' marketinden 'q' yük seviyesi ile 'l' toplama merkezine taşınırsa 1; aksi halde, 0

VV_{lmqt} Parçalar 't' zaman periyodunda 'l' toplama merkezinden 'q' yük seviyesi ile 'm' yenileme merkezine taşınırsa 1; aksi halde, 0

WW_{lqt} Parçalar 't' zaman periyodunda 'l' toplama merkezinden 'q' yük seviyesi ile bertaraf merkezine taşınırsa 1; aksi halde, 0

UU_{mkqt} Parçalar 't' zaman periyodunda 'm' yenileme merkezinden 'q' yük seviyesi ile 'k' marketine taşınırsa 1; aksi halde, 0

OP_{jnt} 't' zaman periyodunda 'j' tesisi 'n' teknoloji seviyesi ile açılırsa, 1; aksi halde, 0

OC_{lt} 't' zaman periyodunda 'l' toplama merkezi açılırsa 1; aksi halde, 0

OR_{mt} 't' zaman periyodunda 'm' yenileme merkezi açılırsa 1; aksi halde, 0

3.4. Amaç fonksiyonları

Amaç fonksiyonu (Z), tesislerin bakış açısına göre formüle edilir ve aşağıdaki gibi dört bölümden oluşur:

TC : Taşıma maliyeti

POC : Satın alma ve işletme maliyetleri

FFC : Tesis sabit maliyeti

EC : Çevresel maliyet

$$\text{Min } Z = TC + POC + FFC + EC \quad (1)$$

Tesisler arasındaki taşıma maliyeti, birim taşıma maliyetiyle çarpılarak hesaplanmaktadır:

$$TC = c_{qt} \cdot (\sum_i \sum_j \sum_q \sum_t d_{ij} \cdot X_{ijqt} + \sum_j \sum_k \sum_q \sum_t d_{jk} \cdot Y_{jkqt} + \sum_k \sum_l \sum_q \sum_t d_{kl} \cdot Z_{klqt} + \sum_l \sum_m \sum_q \sum_t d_{lm} \cdot V_{lmqt} + \sum_l \sum_q \sum_t W_{lqt} \cdot d_l + \sum_m \sum_k \sum_q \sum_t d_{mk} \cdot U_{mkqt}) \quad (2)$$

Satın alma, üretim, toplama, yenileme, bertaraf maliyetleri ve yenilenmiş ürünler kaynaklı maliyet tasarrufu, ilgili tüm maliyetlerin toplanmasıyla hesaplanabilir ve aşağıdaki gibi verilebilir:

$$POC = \sum_i \sum_j \sum_q \sum_t pc_i \cdot X_{ijqt} + \sum_j \sum_k \sum_q \sum_t pr_j \cdot Y_{jkqt} + \sum_k \sum_l \sum_q \sum_t colc_{kl} \cdot Z_{klqt} + \sum_l \sum_m \sum_q \sum_t rfc_m \cdot V_{lmqt} + \sum_l \sum_q \sum_t dc \cdot W_{lqt} - \sum_m \sum_k \sum_q \sum_t cos_m \cdot U_{mkqt} \quad (3)$$

'j' tesisi, 'l' toplama merkezi ve 'm' yenileme merkezinin tesis sabit maliyetleri toplamı aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$FFC = \sum_j \sum_n \sum_t fcp_{jnt} \cdot OP_{jnt} + \sum_l \sum_t fcc_{lt} \cdot OC_{lt} + \sum_m \sum_t fcr_{cmt} \cdot OR_{mt} \quad (4)$$

Tesislerde kullanılan teknolojinin ve taşımanın yol açtığı çevre maliyetleri şu şekilde hesaplanabilir:

$$EC = C_{CO_2} \cdot [cet_q \cdot (\sum_i \sum_j \sum_q \sum_t d_{ij} \cdot X_{ijqt} + \sum_j \sum_k \sum_q \sum_t d_{jk} \cdot Y_{jkqt} + \sum_k \sum_l \sum_q \sum_t d_{kl} \cdot Z_{klqt} + \sum_l \sum_m \sum_q \sum_t d_{lm} \cdot V_{lmqt} + \sum_l \sum_q \sum_t W_{lqt} \cdot d_l + \sum_m \sum_k \sum_q \sum_t d_{mk} \cdot U_{mkqt}) + \sum_j \sum_n \sum_k \sum_q \sum_t cep_{jkn} \cdot Y_{jkqt}] \quad (5)$$

3.5. Kısıtlar

Kapasite kısıtları

Herhangi bir zaman periyodunda tedarikçilerden tesislere gönderilen toplam malzeme miktarı, bu tedarikçilerin kapasitesinden daha az veya eşit olmalıdır.

$$\sum_j \sum_q X_{ijqt} \leq caps_{it} \quad \forall_{i,t} \quad (6)$$

Herhangi bir zaman periyodunda 'n' teknoloji seviyesine sahip tesislerden marketlere gönderilen toplam ürün miktarı, bu tesislerin kapasitesinden daha az veya eşit olmalıdır.

$$\sum_k \sum_q Y_{jkqt} \leq \sum_n capp_{jnt} \cdot OP_{jnt} \quad \forall_{j,t} \quad (7)$$

Herhangi bir zaman periyodunda marketlerden toplama merkezlerine gönderilen toplam geri dönmüş ürün miktarı, toplama merkezlerinin kapasitesinden daha az veya eşit olmalıdır.

$$\sum_k \sum_q Z_{klqt} \leq capcc_{lt} \cdot OC_{lt} \quad \forall_{l,t} \quad (8)$$

Herhangi bir zaman periyodunda yenileme merkezlerinden marketlere gönderilen toplam ürün miktarı, yenileme merkezlerinin kapasitesinden daha az veya eşit olmalıdır.

$$\sum_k \sum_q U_{mkqt} \leq caprf_{mt} \cdot OR_{mt} \quad \forall_{m,t} \quad (9)$$

Talep kısıtları

Herhangi bir zaman periyodunda tüm market talepleri tam olarak karşılanmakta ve toplam ürün miktarı, marketlerin talebinden daha büyük veya eşit olmalıdır.

$$\sum_j \sum_q Y_{jkqt} + \sum_m \sum_q U_{mkqt} \geq dem_{kt} \quad \forall_{k,t} \quad (10)$$

Fiyat odaklı doğrusal taşıma kısıtları

Aşağıdaki kısıtlar, her bir ark için minimum yük seviyesi aralığı sağlar.

$$X_{ij1t} - M \cdot XX_{ij1t} \leq 0 \quad \forall_{i,j,t} \quad (11)$$

$$X_{ij1t} - M \cdot XX_{ij1t} \geq u_1 - M \quad \forall_{i,j,t} \quad (12)$$

$$X_{ij2t} - M \cdot XX_{ij2t} \leq 0 \quad \forall_{i,j,t} \quad (13)$$

$$X_{ij2t} - M \cdot XX_{ij2t} \geq u_2 - M \quad \forall_{i,j,t} \quad (14)$$

$$X_{ij3t} - M \cdot XX_{ij3t} \leq 0 \quad \forall_{i,j,t} \quad (15)$$

$$X_{ij3t} - M \cdot XX_{ij3t} \geq u_3 - M \quad \forall_{i,j,t} \quad (16)$$

$$Y_{jk1t} - M \cdot YY_{jk1t} \leq 0 \quad \forall_{j,k,t} \quad (17)$$

$$Y_{jk1t} - M \cdot YY_{jk1t} \geq u_1 - M \quad \forall_{j,k,t} \quad (18)$$

$$Y_{jk2t} - M \cdot YY_{jk2t} \leq 0 \quad \forall_{j,k,t} \quad (19)$$

$$Y_{jk2t} - M \cdot YY_{jk2t} \geq u_2 - M \quad \forall_{j,k,t} \quad (20)$$

$$Y_{jk3t} - M \cdot YY_{jk3t} \leq 0 \quad \forall_{j,k,t} \quad (21)$$

$$Y_{jk3t} - M \cdot YY_{jk3t} \geq u_3 - M \quad \forall_{j,k,t} \quad (22)$$

$$Z_{kl1t} - M \cdot ZZ_{kl1t} \leq 0 \quad \forall_{k,l,t} \quad (23)$$

$$Z_{kl1t} - M \cdot ZZ_{kl1t} \geq u_1 - M \quad \forall_{k,l,t} \quad (24)$$

$$Z_{kl2t} - M \cdot ZZ_{kl2t} \leq 0 \quad \forall_{k,l,t} \quad (25)$$

$$Z_{kl2t} - M \cdot ZZ_{kl2t} \geq u_2 - M \quad \forall_{k,l,t} \quad (26)$$

$$Z_{kl3t} - M \cdot ZZ_{kl3t} \leq 0 \quad \forall_{k,l,t} \quad (27)$$

$$Z_{kl3t} - M \cdot ZZ_{kl3t} \geq u_3 - M \quad \forall_{k,l,t} \quad (28)$$

$$V_{lm1t} - M \cdot VV_{lm1t} \leq 0 \quad \forall_{l,m,t} \quad (29)$$

$$V_{lm1t} - M \cdot VV_{lm1t} \geq u_1 - M \quad \forall_{l,m,t} \quad (30)$$

$$V_{lm2t} - M \cdot VV_{lm2t} \leq 0 \quad \forall_{l,m,t} \quad (31)$$

$$V_{lm2t} - M \cdot VV_{lm2t} \geq u_2 - M \quad \forall_{l,m,t} \quad (32)$$

$$V_{lm3t} - M \cdot VV_{lm3t} \leq 0 \quad \forall_{l,m,t} \quad (33)$$

$$V_{lm3t} - M \cdot VV_{lm3t} \geq u_3 - M \quad \forall l,m,t \quad (34)$$

$$W_{l1t} - M \cdot WW_{l1t} \leq 0 \quad \forall l,t \quad (35)$$

$$W_{l1t} - M \cdot WW_{l1t} \geq u_1 - M \quad \forall l,t \quad (36)$$

$$W_{l2t} - M \cdot WW_{l2t} \leq 0 \quad \forall l,t \quad (37)$$

$$W_{l2t} - M \cdot WW_{l2t} \geq u_2 - M \quad \forall l,t \quad (38)$$

$$W_{l3t} - M \cdot WW_{l3t} \leq 0 \quad \forall l,t \quad (39)$$

$$W_{l3t} - M \cdot WW_{l3t} \geq u_3 - M \quad \forall l,t \quad (40)$$

$$U_{mk1t} - M \cdot UU_{mk1t} \leq 0 \quad \forall m,k,t \quad (41)$$

$$U_{mk1t} - M \cdot UU_{mk1t} \geq u_1 - M \quad \forall m,k,t \quad (42)$$

$$U_{mk2t} - M \cdot UU_{mk2t} \leq 0 \quad \forall m,k,t \quad (43)$$

$$U_{mk2t} - M \cdot UU_{mk2t} \geq u_2 - M \quad \forall m,k,t \quad (44)$$

$$U_{mk3t} - M \cdot UU_{mk3t} \leq 0 \quad \forall m,k,t \quad (45)$$

$$U_{mk3t} - M \cdot UU_{mk3t} \geq u_3 - M \quad \forall m,k,t \quad (46)$$

Denge kısıtları (Kirchoff kuralı)

Koruma ilkesine göre, Kirchoff eşitlikleri, KDTZ ağındaki bir düğüme gelen akışlar toplamının, bu düğümden çıkan akışlar toplamına eşit olmasını garantiler.

Kısıt (47), parça için 'j' tedarikçisinin akış dengesini sağlar.

$$\sum_i \sum_q X_{ijqt} - \sum_k \sum_q Y_{jkqt} = 0 \quad \forall j,t \quad (47)$$

Kısıt (48), Tedarik zincirinde bir dönem kullanımdan sonra toplanmış ürünlerin akış dengesini sağlar.

$$\pi \cdot (\sum_j \sum_q Y_{jkqt} + \sum_m \sum_q U_{mkqt}) - \sum_l \sum_q Z_{klq(t+1)} = 0 \quad \forall k,t \quad (48)$$

Kısıt (49) ve (50), toplama merkezlerinde yenilenmiş ve geri dönüştürülmüş parçaların akış dengesini sağlar.

$$\theta \cdot \sum_k \sum_q Z_{klqt} - \sum_m \sum_q V_{lmqt} = 0 \quad \forall l,t \quad (49)$$

$$(1 - \theta) \cdot \sum_k \sum_q Z_{klqt} - \sum_q W_{lqt} = 0 \quad \forall l,t \quad (50)$$

Kısıt (51) yenilenmiş ürünün yenilenme merkezindeki akış dengesini sağlar.

$$\sum_l \sum_q V_{lmqt} - \sum_k \sum_q U_{mkqt} = 0 \quad \forall_{m,t} \quad (51)$$

Negatif olmama kısıtları

Aşağıdaki kısıtlar, karar değişkenleri üzerinde negatif olmama sınırlamalarını göstermektedir.

$$X_{ijqt} \geq 0 \quad \forall_{i,j,q,t} \quad (52)$$

$$Y_{jkqt} \geq 0 \quad \forall_{j,k,q,t} \quad (53)$$

$$Z_{klqt} \geq 0 \quad \forall_{k,l,q,t} \quad (54)$$

$$V_{lmqt} \geq 0 \quad \forall_{l,m,q,t} \quad (55)$$

$$W_{lqt} \geq 0 \quad \forall_{l,q,t} \quad (56)$$

$$U_{mkqt} \geq 0 \quad \forall_{m,k,q,t} \quad (57)$$

İkili değişken kısıtları

Aşağıdaki kısıtlar, karar değişkenleri üzerinde ikili sınırlamaları göstermektedir.

$$OP_{jt} = \{0,1\} \quad \forall_{j,t} \quad (58)$$

$$OC_{lt} = \{0,1\} \quad \forall_{l,t} \quad (59)$$

$$OR_{mt} = \{0,1\} \quad \forall_{m,t} \quad (60)$$

$$XX_{ijqt} = \{0,1\} \quad \forall_{i,j,q,t} \quad (61)$$

$$YY_{jkqt} = \{0,1\} \quad \forall_{j,k,q,t} \quad (62)$$

$$ZZ_{klqt} = \{0,1\} \quad \forall_{k,l,q,t} \quad (63)$$

$$VV_{lmqt} = \{0,1\} \quad \forall_{l,m,q,t} \quad (64)$$

$$WW_{lqt} = \{0,1\} \quad \forall_{l,q,t} \quad (65)$$

$$UU_{mkqt} = \{0,1\} \quad \forall_{m,k,q,t} \quad (66)$$

4. HESAPLAMALI ÇALIŞMALAR VE YÖNETİMSEL ÇIKARIMLAR

Bu bölüm, Çizelge 1'de görülebildiği gibi rastgele oluşturulmuş test verileri üzerinden yürütülen sayısal bir örnek sunmaktadır. Tüm hesaplamalı

deneyler bir bilgisayarda (I5 4200 CPU 1.60GHz 4.00 GB RAM) uygulanmıştır. Test problemi için; dört malzeme tedarikçisi, üç tedarikçi, beş market, iki toplama merkezi, üç teknoloji seviyesi, üç yük seviyesi aralığı ve üç zaman periyodu varsayılmıştır.

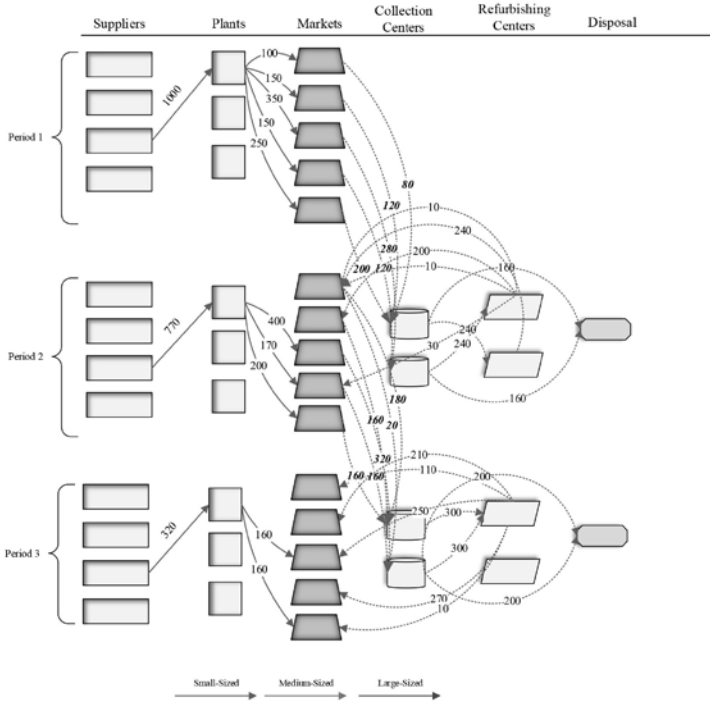
Çizelge 1. Rassal Olarak Oluşturulmuş Veri Değerleri

Parametreler	Karşılık Gelen Rassal Dağılım
d_{ij}	~ Uniform (125, 300)
d_{jk}	~ Uniform (150, 300)
d_{kl}, d_{lm}	~ Uniform (190, 350)
d_l	~ Uniform (50, 150)
d_{mk}	~ Uniform (100, 200)
$caps_{it}$	~ Uniform (5000, 10000)
$capp_{jnt}$	~ Uniform (1000, 2000)
$capcc_{it}, caprf_{mt}$	~ Uniform (7000,10000)
dem_{kt}	~ Uniform (75,300)
fcp_{jnt}	~ Uniform (1000000,1350000)
fcc_{it}	~ Uniform (400000,600000)
$fcrc_{mt}$	~ Uniform (350000,550000)
pc_i	~ Uniform (150,350)
pr_j	~ Uniform (500,600)
$colc_{kl}$	~ Uniform (400,100)
rfc_m	~ Uniform (75,100)
dc	~ Uniform (350000,550000)
cos_m	~ Uniform (300,400)
cep_{jn}	~ Uniform (1000,5000)
cet_q	~ Uniform (800,2450)

Tüm zaman periyotları için yük seviyesi aralıklarına göre birim taşıma maliyetleri (c_{qt}); 30, 20 ve 10 olarak kabul edilmiştir, yük aralıklarının minimum seviyeleri $u_1=0,001$, $u_2=10$, $u_3=20$ 'dir, bertaraf merkezindeki (dc) birim ürün bertaraf maliyeti 50\$, CO_2 emisyonunun birim maliyeti (C_{CO_2}) ise 0,112 (\$/gr) olarak kabul edilmiştir (<http://www.vtpi.org/tca/tca0510.pdf>). Talebin bir yüzdesi $\pi = 0,80$ olarak tanımlanan kullanılmış ürünlerin müşteri bölgelerinde toplandığı ve bu toplanan ürünlerin $\theta = 0,60$ 'ının yenileme merkezlerine gönderildiği varsayılmaktadır.

Önerilen model verilen örnek için GAMS-CPLEX 24.1.3 çözücüsü kullanılarak çözüldüğünde, % 3,7683 göreceli boşluk ile optimal sonuca ulaşmak için gereken hesaplama süresi 2053.8 CPU saniyedir. Tüm zaman periyotları için taşıma maliyeti, satın alma ve işletme maliyetleri, tesis sabit maliyeti ve çevresel maliyeti içeren toplam maliyet 187.440.000 \$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, toplam taşıma maliyetinin tüm maliyetin % 23,7'lik bir bölümünü oluşturduğunu göstermektedir. Azami pay % 71,9 ile çevre maliyeti ile gerçekleştirilirken, asgari pay % 1 ile satın alma ve işletme maliyeti ile gerçekleştirilmektedir.

Optimal çözüm hakkında bazı detayları sunmak üzere, tüm dönemler için dağıtım planları Şekil 2'de verilmiştir. Optimal plana göre, her üç dönemde de 2090 ton hammadde tedarikçilerden birinci tesise gönderilmektedir. Her dönemde sadece üçüncü tedarikçi seçilmekte ve sadece birinci teknoloji seviyesine sahip birinci tesis açılmaktadır. Tüm taşıma işlemleri küçük boyutlu kamyonlarla gerçekleştirilmektedir. Üç dönem boyunca marketlere 2090 ton bitmiş ürün gönderilmekte, 1800 ton kullanılmış ürün toplama merkezleri tarafından toplanmakta ve bu 1080 ton toplanmış ürün yenileme işleminden sonra müşterilere gönderilmektedir.



Şekil 2. Optimum Dağıtım Planı

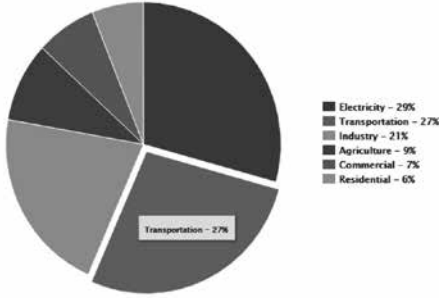
Varsayımsal veriler üzerine hesaplamalı çalışmalardan elde edilen sonuçlar bize aşağıdaki yönetsel sonuçları sağlamaktadır:

- Deneysel sonuçlara dayanarak, çevresel maliyet, satın alma - işletme ve tesis sabit maliyetlere kıyasla toplam maliyetin en yüksek oranına sahiptir.
- Küçük boyutlu kamyonlar minimum 10 ton yük taşıma kapasitesine sahip olsa da, optimal çözüm tüm taşıma işlemlerinin bu kamyonlarla yapıldığını göstermektedir. Bu kamyonların kullanılması, daha yüksek taşıma maliyetiyle sonuçlanırken, orta ve büyük boyutlu kamyonlara kıyasla daha az çevresel maliyete neden olur.
- Bilindiği gibi (<https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>), taşıma sırasında yayılan karbondioksit emisyon miktarı genellikle üretimdekinden daha yüksek olduğundan, taşıma yöntemi olarak yeşil seçeneğe küçük boyutlu kamyonlar tercih edilirken, üretimde maliyet tasarrufu sonucu olarak birinci teknoloji seviyesi tercih edilmiştir.
- Üçüncü teknoloji seviyesi diğerlerinden daha çevre dostu olmasına rağmen, model, maliyetleri en aza indirmek için birinci teknoloji seviyesine yönelmiştir.

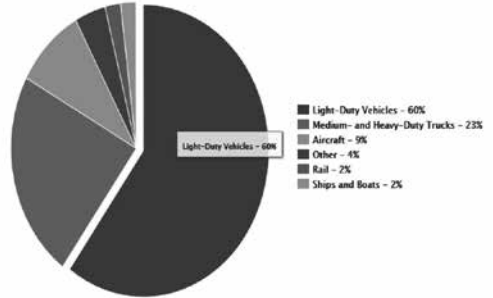
Bu sonuçlar istatistiklerle örtüşmektedir (<https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>):

- Ulaştırma sektörü, ABD sera gazı (GHG) emisyonlarına en büyük katkı sağlayan sektörlerden biridir.
- EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı)'ya göre, taşıma 2015 yılında toplam ABD GHG emisyonlarının % 27'sini temsil etmektedir.
- Ulaştırma sektörü sera gazı emisyonlarının % 60'ı hafif ticari araçlardan kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle, küçük boyutlu araçlar büyük boyutlu araçlardan daha sık kullanılmaktadır.

2015 U.S. GHG Emissions by Sector



2015 U.S. Transportation Sector GHG Emissions by Source



Şekil 3. 2015 Yılı Sektör Bazında ABD GHG Emisyonu ve Kaynak Bazında ABD Ulaştırma Sektörü GHG Emisyonu Yüzdeleri

Kaynak: <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>.

Ulaşımın çevresel etkisi çok önemlidir. Çünkü taşıma işlemleri yürütülürken, dünyadaki fosil yakıtların çoğu tüketilmektedir. Kaçınılmaz olarak, bu faaliyetler çevre kirliliği ile sonuçlanır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada yer seçimi ve ulaşım konuları ile ilgili bir KDTZ problemine odaklanılmıştır. Üç teknoloji seviyesi ve üç farklı araç tipine ilişkin bu problem için bir Karma Tamsayı Doğrusal Programlama Modeli geliştirilmiştir. Model, taşıma maliyeti ve karbondioksit emisyon maliyeti arasındaki ilişkiyi ele almaktadır. Modelin, toplam maliyeti, minimize etmek için küçük boyutlu kamyonlar seçme eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir. Çözümün çevreye üretimde daha az, ancak taşımada daha fazla önem verdiğine dikkat çekilmektedir. Gelecekte parametrelerdeki belirsizliği çözmek için modelin bulanık açılımı uygulanmalıdır.

KAYNAKÇA

- DEMİREL, N. Ö. ve GÖKÇEN, H., (2008), **“A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment”**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, c. 39, s. 11–12, ss. 1197–1206.
- DUES, C. M., TAN, K. H. & LIM, M., (2013), **“Green as the new Lean: How to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain”**, Journal of Cleaner Production, c. 40, ss. 93-100.
- EPA, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, (2017), **“Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions”**, <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>.
- FAHIMNIA, B., SARKIS, J. & ESHRAGH, A., (2015), **“A tradeoff model for green supply chain planning: A leanness-versus-greenness analysis”**, Omega, c. 54, ss. 173-190.
- GOVINDAN, K., SHANKAR, K. M. & KANNAN, D., (2016), **“Application of fuzzy analytic network process for barrier evaluation in automotive parts remanufacturing towards cleaner production - a study in an Indian scenario”**, Journal of Cleaner Production, c.114, ss. 199-213.
- MITRA, S., (2013), **“Periodic review policy for a two-echelon closed-loop inventory system with correlations between demands and returns”**, OPSEARCH, c. 50, s. 4, ss. 604–615.
- PISHVAEE, M. S., RABBANI, M. & TORABI, S. A., (2011), **“A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty”**, Applied Mathematical Modelling, c. 35, s. 2, ss. 637–649.
- TAHIROV, N., HASANOV, P. & JABER, M. Y., (2016), **“Optimization of closed-loop supply chain of multi-items with returned subassemblies”**, International Journal of Production Economics, c. 174, ss. 1–10.
- TOKTAY, L. B. & WEI, D., (2011), **“Cost allocation in manufacturing–Remanufacturing operations”**, Production and Operations Management, c. 20, s. 6, ss. 841–847.
- TOPCU, A., BENNEYAN, J. C. & CULLINANE, T. P., (2013), **“A simulation–optimisation approach for reconfigurable inventory space planning in remanufacturing facilities”**, International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling, c. 5, s. 1, ss. 86–114.
- TRANSPORTATION COST and BENEFIT ANALYSIS II –Air Pollution Costs (2017), <http://www.vtpi.org/tca/tca0510.pdf>.
- UGARTE, G. M., GOLDEN, J. S. & DOOLEY, K. J., (2016), **“Lean versus green: The impact of lean logistics on greenhouse gas emissions in consumer goods supply chains”**, Journal of Purchasing and Supply Management, c. 22, s. 2, ss. 98-109.
- WEI, J., ZHAO, J. & SUN, X., (2013), **“Reverse channel decisions for a fuzzy closed-loop supply chain”**, Applied Mathematical Modelling, c. 37, s. 3, ss. 1502–1513.