

İNTERMODAL LOJİSTİK AĞLARINDA YÜK PLANLAMA PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA MODELİ

Adil BAYKASOĞLU, Kemal SUBULAN

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İzmir
adil.baykasoglu@deu.edu.tr, kemal.subulan@deu.edu.tr

(Geliş/Received: 08.06.2015; Kabul/Accepted: 07.04.2016)

ÖZET

Son yıllarda, intermodal taşımacılık sistemlerinde yük planlama problemi, küresel lojistik sektöründe giderek artan öneme sahip bir konu haline gelmiştir. Ancak, bilimsel yazındaki mevcut çalışmaların çok büyük bir kısmında problem, tek modlu taşımacılık hizmeti sağlayan lojistik firmaları ve üretici firmalar çerçevesinden ele alınmıştır. Diğer yandan, intermodal taşımacılığın yaygın hale gelmesi ile taşıma modu seçimi, denizyolu ve demiryolu taşımacılığı sefer sayılarının belirlenmesi, periyodik yük tahsisi ve dış kaynak kullanımı gibi çok sayıdaki karmaşık kararın eş zamanlı olarak çözümlenmesi gerekliliği, problemin karmaşıklığını daha da arttırmaktadır. Bu çalışmada, lojistik komisyonculuğu bakış açısıyla, çok amaçlı, çok modlu ve çok dönemli bir yük planlama problemi için karma tamsayılı bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, müşterilerin hem ithalat hem de ihracat yönündeki yük taleplerine çözümler üretebilmekte olup toplam maliyetin en küçüklenmesinin yanı sıra, müşteri hizmet düzeyi ile ilişkilendirilebilecek toplam transit sürelerinin en küçüklenmesi ve toplam karbondioksit salınımının en küçüklenmesini de hedeflemektedir. Çelişen amaçlar doğrultusunda ve belirsizlik altında, karar vericiye tatmin edici çözümlerin sunulabilmesi için bulanık hedef programlama yaklaşımından yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki geliştirilen model; ekonomik, müşteri tatmini ve çevresel açılardan etkin ve efektif yük planlarının oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: İntermodal taşımacılık, yük planlama problemi, karma tamsayılı matematiksel programlama, bulanık hedef programlama

A NEW MATHEMATICAL PROGRAMMING MODEL FOR LOAD PLANNING PROBLEMS IN INTERMODAL LOGISTICS NETWORKS

ABSTRACT

Recently, there has been a growing attention to load planning problems in intermodal logistics networks by global logistics sector. However, most of the studies in the literature were concentrated on single mode problems from the perspectives of logistics companies/production firms. Since increasing importance of intermodal transportation, the problem need to be solved by handling various complex decisions simultaneously (i.e., transportation mode selection, load allocation, outsourcing and sizing of maritime and railway cruises), which makes the problem much more complex. In this study, a mixed-integer programming model is developed for a multi-objective, multi-mode and multi-period load planning problem from the perspective of freight forwarders. In the proposed model, both import/export transport demands of the customers are considered. In addition to minimize overall transport costs, it is also aimed to minimize total transit time and environmental impact resulted from CO₂ emissions. In order to handle these conflicting objectives and to provide compromise solutions under uncertainty, a fuzzy goal programming approach is used. According to the computational results, effective/efficient load plans can be generated in terms of economic and environmental issues.

Keywords: Intermodal transportation, load planning, mixed-integer programming, fuzzy goal programming

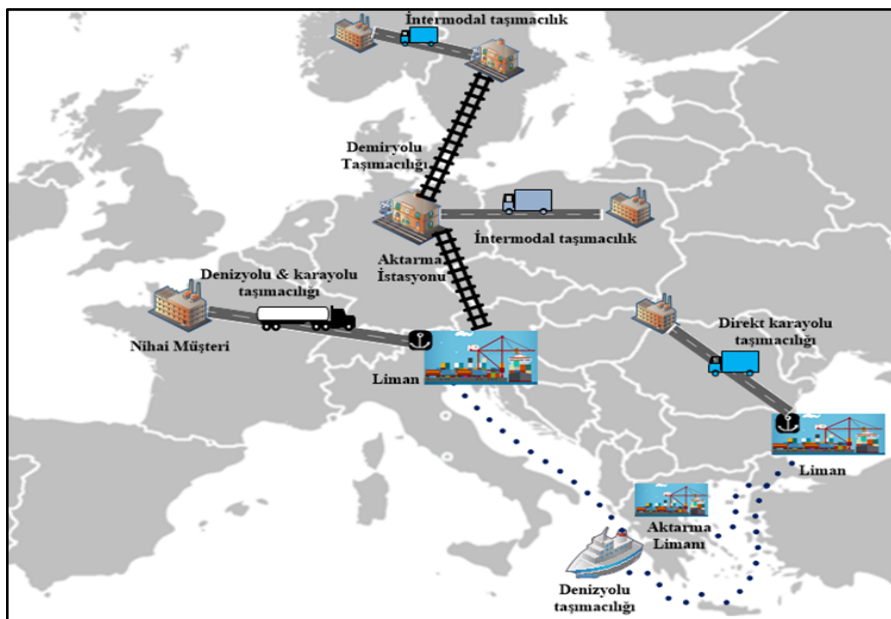
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hızla gelişen küresel lojistik sektöründe intermodal taşımacılık, gerek araştırmacıların gerekse uygulayıcıların dikkatini çeken önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. İntermodal taşımacılık, taşıma şekilleri değiştirilirken yük üzerinde herhangi bir işlem yapılmadan, yükün aynı taşıma birimiyle birden fazla noktaya, birden fazla taşıma modeliyle taşınması olarak tanımlanmıştır [1]. Ancak, yöneylem araştırması ve yapay zekâ tekniklerinin intermodal taşımacılık alanındaki uygulamaları henüz başlangıç seviyesindedir. Ayrıca, intermodal taşımacılık problemlerinin boyut ve karmaşıklık derecesinin yüksek olması nedeniyle, bu alandaki pratik hayat uygulamalarında mevcut yöneylem araştırması tekniklerinin kullanımı henüz sınırlı durumdadır [2]. Bu bağlamda Ishfaq ve Sox [3] çok modlu bir yük planlama problemi için lojistik hizmet sağlayıcı bakış açısıyla lojistik ağ tasarımı, rotalama, taşıma modu seçimi ve yük akış kontrolü gibi kararları içeren bir eniyileme modeli geliştirmiştir. Çözüm aşamasında, yasaklı arama algoritmasından yararlanılmıştır. Yang ve diğ. [4] transit noktalarının uyumluluğu ve akış sürekliliği en büyüklenirken, transit süresi değişkenliği ve taşımacılık maliyetlerinin en küçüklendiği bir intermodal lojistik ağı için hedef programlama yaklaşımı önermiştir. Bir intermodal taşımacılık ağı için taşıma modu, servis tipi ve terminal seçimi gibi kararları esas alan, yüklerin hangi oranda hangi taşıma modu ile taşınacağına ve buna bağlı olarak gerekli tren sayısına karar veren bir tamsayı matematiksel programlama modeli Bierwirth ve diğ. [5] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışma, Meisel ve diğ. [6] tarafından, taşıma sürecine üretim süreci ve ürün envanteri entegre edilerek ve de çok dönemli olacak şekilde genişletilmiştir. Rodrigues ve diğ. [7], intermodal taşımacılık ağlarında toplam

CO₂ emisyonunun azaltılmasını hedefleyen ve liman genişletme, konteynerlerin taşınması ve aktarılmasına ilişkin kararları da içeren bir yük planlama stratejisi geliştirmiştir. Ancak, bu çalışmalarda, intermodal lojistik ağlarında yük planları oluşturulurken problem, üretici bakış açısıyla ele alınıp modellenmiştir. Mevcut çalışma kapsamında ise çok amaçlı, çok modlu ve çok dönemli bir yük planlama problemi için lojistik komisyonculuğu bakış açısıyla bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir.

2. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODELLEME (PROBLEM DEFINITION AND MATHEMATICAL MODELING)

Bir lojistik komisyoncusu, Türkiye’de ve Avrupa kıtasında bulunan çok sayıdaki müşterisinin ithalat ve ihracat yönündeki yük taleplerinin karşılanabilmesi için farklı taşıma modellerini (karayolu, denizyolu ve demiryolu taşımacılığı) kullanarak hizmet vermektedir. Karayolu taşımacılığında, tüm Avrupa ülkeleri ile Türkiye arasında doğrudan yük taşımacılığı gerçekleştirilmektedir. Entegre denizyolu ve karayolu taşımacılığı, yüklerin Türkiye’deki limanlardan Ro-Ro gemileri ile Avrupa’daki limanlara, buradan da karayoluyla ilgili müşterilere teslim edilmesi esasına dayanmaktadır. İntermodal taşımacılıkta ise yükler Türkiye’deki limanlardan Ro-Ro gemileri ile Avrupa’daki limanlara taşınmakta, bu limanlardan ilgili demiryolu hatları ile tren istasyonlarına ulaştırılmakta ve buradan da karayoluyla müşterilere teslim edilmektedir. Lojistik komisyoncusunun, uluslararası boyutta karşılaştığı en temel sorunlardan biri, müşterilerinin dönemsel değişkenlik gösteren ithalat/ihracat yük taleplerine cevap verebilmek için yükleri farklı taşıma modlarına tahsis etmek; denizyolu ve demiryolu taşımacılığında yapılması gereken sefer ve pozisyon sayılarına dış



Şekil 1. Ele alınan yük planlama problemine ilişkin İntermodal taşımacılık ağı (Intermodal transportation network for the examined load planning problem)

kaynak kullanımını da göz önünde bulundurarak karar vermektir. Bir başka ifadeyle, çok sayıda müşteri Türkiye ve Avrupa kıtası arasındaki aylık bütünsel yük talebinin hangi oranlarda, hangi taşıma modelleri ile karşılanacağını belirlemesi doğrultusunda oluşacak çok aşamalı, çok modlu bir lojistik yük planlama problemidir. Bu bağlamda, lojistik komisyoncusu oluşturmayı hedeflediği yük planı ile müşterilerine zamanında teslimat, maliyet avantajı ve çevreye duyarlı olma gibi birçok avantaj kazandırmayı hedeflemektedir. Lojistik komisyonculuğu açısından ele alınan yük planlama problemine ait intermodal taşımacılık ağı Şekil 1’de gösterilmiştir.

2.1 Modelleme Varsayımları (Modeling Assumptions)

Yaklaşık 5000 civarındaki müşterinin yük talebi ülke bazında bütüleştirilmiş; sipariş ülkelerinin aylık ithalat/ihracat yük talepleri olarak tanımlanmıştır. Diğer lojistik servis sağlayıcıların Ro-Ro gemileri ile ve esnek çizelgili hızlı trenler ile taşımacılık faaliyetlerinde kapasite sınırı bulunmamaktadır. Aktarma limanlarında bulunan ekstra yüklerin yüklenip/boşaltılması sadece lojistik komisyoncusunun kendi sahip olduğu Ro-Ro gemileri ile yapılabilmektedir. Bir başka ifade ile, denizyolu taşımacılığında rotalar üzerinde bulunan aktarma limanlarına diğer lojistik servis sağlayıcıların Ro-Ro gemilerinin uğraması, yük alıp/boşaltması söz konusu olmamaktadır. Sipariş ülkelerinin aylık ithalat/ihracat yük taleplerinin kesin olarak bilindiği ancak amaçlara ilişkin hedef değerlerin belirsizlik içerdiği varsayılmıştır. Blok tren sefer maliyeti, yüklenen treyler miktarından bağımsız sabit bir maliyet iken; hızlı trenler ile yapılan taşımalarda maliyet birim treyler başıdır. Blok tren ve hızlı trenler ile gerçekleştirilen demiryolu taşımacılığında elektrikli trenler kullanılmakta olup, elektrik kullanımında CO₂ salınımının olmadığı, bir başka ifadeyle, CO₂ emisyon değerinin “0” olduğu varsayılmıştır.

2.2 Terminoloji (Nomenclature)

Önerilen matematiksel programlama modeline ilişkin notasyon Tablo 1’de verilmiştir. Parametre ve değişken tanımlamalarında kullanılan “*imp*” ve “*exp*” ifadeleri, ithalat (import) ve ihracat (export) anlamlarına gelmektedir. Ayrıca, her iki ifadenin de birlikte kullanıldığı maliyet terimleri ile (*imp/exp*), ithalat ve ihracat yönlerindeki ilgili maliyet kalemlerinin aynı değeri aldığı kastedilmektedir.

2.3 Karma Tamsayı Matematiksel Programlama Modeli (Mixed-Integer Mathematical Programming Model)

Lojistik komisyonculuğu bakış açısıyla ele alınan çok amaçlı, çok modlu ve çok dönemli yük planlama problemi için geliştirilen karma tamsayı matematiksel programlama modeli aşağıda verilmiştir. Toplam maliyet fonksiyonu (1), lojistik komisyoncusunun sahip olduğu Ro-Ro gemileri ve

diğer lojistik servis sağlayıcıları ile denizyolu taşımacılık maliyetlerinden, blok trenler ve esnek çizelgili hızlı trenler ile demiryolu taşımacılık maliyetlerinden ve karayolu yük taşımacılığı maliyetlerinin toplamından oluşmaktadır:

$$\begin{aligned} MIN Z_1 = & \sum_{(i,j) \in L_{ij}} \sum_{t \in T} (R_{ijt}^{imp} + R_{jit}^{exp}) \cdot Co_{ij}^{imp/exp} + \\ & \sum_{(i,j) \in C_{ij}} \sum_{t \in T} (P_{ijt}^{imp} + P_{jit}^{exp}) \cdot Cp_{ij}^{imp/exp} + \\ & \sum_{(j,k) \in L_{jk}} \sum_{t \in T} (S_{jkt}^{imp} + S_{kjt}^{exp}) \cdot Cb_{jk}^{imp/exp} + \\ & \sum_{(j,k) \in C_{jk}} \sum_{t \in T} (P_{jkt}^{imp} + P_{kjt}^{exp}) \cdot Cp_{jk}^{imp/exp} + \\ & \sum_{s \in T_k} \sum_{k \in G_k} \sum_{t \in T} (P_{skt}^{imp} + P_{kst}^{exp}) \cdot Cp_{sk}^{imp/exp} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (X_{ilt}^{imp} + X_{lit}^{exp}) \cdot d_{il} \cdot Cr + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in D_j} \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (Z_{ijkt}^{imp} + Z_{lkjt}^{exp}) \cdot d_{lk} \cdot Cr + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (Y_{ijlt}^{imp} + Y_{ljit}^{exp}) \cdot d_{jl} \cdot Cr \end{aligned} \quad (1)$$

Yük planları oluşturulurken dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli performans göstergesi de, müşterilerin yük taleplerinin zamanında karşılanmasıdır. Yüklere ilişkin transfer, gümrükleme, liman ve istasyonlarda bekleme ve yükleme/boşaltma süreleri toplamından oluşan transit sürelerinin en küçüklendiği amaç fonksiyonu eşitlik (2)’de olduğu gibi ifade edilebilir. Bu amaç fonksiyonu, denizyolu ve demiryolu taşımacılığında dış kaynak kullanımına ilişkin sefer sayılarının hesaplanması için değişkenlerin en yakın tamsayıya yuvarlanmasını gerektirdiğinden, doğrusal olmayan bir fonksiyondur.

$$\begin{aligned} MIN Z_2 = & \sum_{(i,j) \in L_{ij}} \sum_{t \in T} (S_{ijt}^{imp} + S_{jit}^{exp}) \cdot T_{ij} + \\ & \sum_{(i,j) \in C_{ij}} \sum_{t \in T} ([P_{ijt}^{imp} / Cap_{ij}^{imp}] + [P_{jit}^{exp} / Cap_{ji}^{exp}]) \cdot T_{ij} + \\ & \sum_{(j,k) \in L_{jk}} \sum_{t \in T} (S_{jkt}^{imp} + S_{kjt}^{exp}) \cdot T_{jk} + \\ & \sum_{(j,k) \in L_{jk} \setminus \{T_k\}} \sum_{t \in T} ([P_{jkt}^{imp} / Cap_{jk}^{imp}] + \\ & [P_{kjt}^{exp} / Cap_{kj}^{exp}]) \cdot T_{jk} + \\ & \sum_{s \in T_k} \sum_{k \in G_k} \sum_{t \in T} ([P_{skt}^{imp} / Cap_{sk}^{imp}] + [P_{kst}^{exp} / Cap_{ks}^{exp}]) \cdot T_{sk} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (X_{ilt}^{imp} + X_{lit}^{exp}) \cdot T_{il} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (Y_{ijlt}^{imp} + Y_{ljit}^{exp}) \cdot T_{jl} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in D_j} \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (Z_{ijkt}^{imp} + Z_{lkjt}^{exp}) \cdot T_{kl} \end{aligned} \quad (2)$$

Lojistik Komisyoncusu, çevreye salınan karbondioksit miktarını azaltmakla, çevresel etkinin en az düzeye indirgenmesinin yanında, yakıt tasarrufu da sağlayabilecektir. Yük planları realize edilirken oluşacak toplam CO₂ salınım miktarlarının en küçüklenmesine ilişkin amaç fonksiyonu eşitlik (3)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 MIN Z_3 = & \sum_{(i,j) \notin L_{ij}} \sum_{t \in T} (R_{ijt}^{imp} + R_{jit}^{exp}) \cdot d_{ij} \cdot CO_2^{Deniz} + \\
 & \sum_{(i,j) \notin C_{ij}} \sum_{t \in T} (P_{ijt}^{imp} + P_{jit}^{exp}) \cdot d_{ij} \cdot CO_2^{Deniz} + \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (Y_{ijlt}^{imp} + Y_{ljit}^{exp}) \cdot d_{jl} \cdot CO_2^{Kara} + \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{j \in D_j} \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (Z_{ijklt}^{imp} + Z_{lkjit}^{exp}) \cdot d_{kl} \cdot CO_2^{Kara} + \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (X_{ilt}^{imp} + X_{lit}^{exp}) \cdot d_{il} \cdot CO_2^{Kara} + \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{j \in D_j} \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (Z_{ijklt}^{imp} + Z_{lkjit}^{exp}) \cdot d_{jk} \cdot CO_2^{Demir}
 \end{aligned} \tag{3}$$

İntermodal lojistik ağları için mevcut çok amaçlı, çok aşamalı periyodik yük planlama probleminin içerdiği kısıtlar (4-36) eşitlik/eşitsizlikleri ile ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 X_{ilt}^{imp} + \sum_{j \in J} Y_{ijlt}^{imp} + \sum_{j \in D_j} \sum_{k \in D_k} Z_{ijklt}^{imp} + SP_{ilt}^{imp} = \\
 De_{ilt}^{imp} \quad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 X_{lit}^{exp} + \sum_{j \in J} Y_{ljit}^{exp} + \sum_{j \in D_j} \sum_{k \in D_k} Z_{lkjit}^{exp} + SP_{lit}^{exp} = \\
 De_{lit}^{exp} \quad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ijlt}^{imp} \leq \sum_{l \in L} N_{ij^*t}^{imp} \cdot Cap_{ij}^{imp} \\
 \forall (i,j) \in C_{ij}, j \in T_j \text{ ya da } j \notin D_j, j^* \in \gamma_j, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ljit}^{exp} \leq \sum_{l \in L} N_{j^*it}^{exp} \cdot Cap_{ji}^{exp} \\
 \forall (j,i) \in C_{ji}, j \in T_j \text{ ya da } j \notin D_j, j^* \in \gamma_j, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ijlt}^{imp} = R_{ijt}^{imp} \\
 \{ \forall (i,j) \in C_{ij}, j \in T_j, \forall t \in T \} \wedge \{ \forall (i,j) \in C_{ij}, j \notin D_j, \\
 \forall t \in T \}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ljit}^{exp} = R_{jit}^{exp} \\
 \{ \forall (i,j) \in C_{ij}, j \in T_j, \forall t \in T \} \wedge \{ \forall (j,i) \in C_{ji}, j \notin D_j, \\
 \forall t \in T \}
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ijlt}^{imp} + \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} Z_{ijklt}^{imp} \leq P_{ijt}^{imp} \\
 \forall (i,j) \notin C_{ij} \text{ ve } j \in D_j, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ljit}^{exp} + \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} Z_{lkjit}^{exp} \leq P_{jit}^{exp} \\
 \forall (j,i) \notin C_{ji} \text{ ve } j \in D_j, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ijlt}^{imp} + \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} Z_{ijklt}^{imp} \leq N_{ijt}^{imp} \cdot Cap_{ij}^{imp} - \\
 \sum_{l \in L} Y_{ij'lt}^{imp} + P_{ijt}^{imp} \\
 \forall (i,j) \in B_{ij}, j \in D_j, j' \in T_j, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ljit}^{exp} + \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} Z_{lkjit}^{exp} \leq N_{jit}^{exp} \cdot Cap_{ji}^{exp} - \\
 \sum_{l \in L} Y_{lj'it}^{exp} + P_{jit}^{exp} \\
 \forall (j,i) \in B_{ji}, j \in D_j, j' \in T_j, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ijlt}^{imp} + \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} Z_{ijklt}^{imp} = R_{ijt}^{imp} \\
 \forall (i,j) \in B_{ij}, j \in D_j, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} Y_{ljit}^{exp} + \sum_{k \in D_k} \sum_{l \in L} Z_{lkjit}^{exp} = R_{jit}^{exp} \\
 \forall (j,i) \in B_{ji}, j \in D_j, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$R_{ijt}^{imp} / Cap_{ij}^{imp} = S_{ijt}^{imp} \quad \forall (i,j) \notin L_{ij}, \forall t \in T \tag{16}$$

$$R_{jit}^{exp} / Cap_{ji}^{exp} = S_{jit}^{exp} \quad \forall (j,i) \notin L_{ji}, \forall t \in T \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 U_{ijt}^{imp} = R_{ijt}^{imp} / N_{ijt}^{imp} \cdot Cap_{ij}^{imp} \\
 \forall (i,j) \notin L_{ij}, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 U_{jit}^{exp} = R_{jit}^{exp} / N_{jit}^{exp} \cdot Cap_{ji}^{exp} \\
 \forall (j,i) \notin L_{ji}, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$LB_{ijt}^{imp} \leq U_{ijt}^{imp} \leq UB_{ijt}^{imp} \quad \forall (i,j) \notin L_{ij}, \forall t \in T \tag{20}$$

$$LB_{jit}^{exp} \leq U_{jit}^{exp} \leq UB_{jit}^{exp} \quad \forall (j,i) \notin L_{ji}, \forall t \in T \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} \sum_{l \in L} Z_{ijklt}^{imp} \leq S_{jkt}^{imp} \cdot Cap_{jk}^{imp} \\
 (j,k) \in C_{jk} \setminus \{T_k\}, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} \sum_{l \in L} Z_{lkjit}^{exp} \leq S_{kjt}^{exp} \cdot Cap_{kj}^{exp} \\
 (k,j) \in C_{kj} \setminus \{T_k\}, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} \sum_{l \in L} Z_{ijklt}^{imp} \leq P_{jkt}^{imp} \\
 (j,k) \in L_{jk} \setminus \{T_k\}, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in L} \sum_{l \in L} Z_{lkjit}^{exp} \leq P_{kjt}^{exp} \\
 (k,j) \in L_{kj} \setminus \{T_k\}, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{25}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} Z_{ijklt}^{imp} \leq S_{jkt}^{imp} \cdot Cap_{jk}^{imp} + P_{jkt}^{imp} \quad (j, k) \in B_{kj} \setminus \{T_k\}, \forall t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} Z_{lkj it}^{exp} \leq S_{kjt}^{exp} \cdot Cap_{kj}^{exp} + P_{kjt}^{exp} \quad (k, j) \in B_{kj} \setminus \{T_k\}, \forall t \in T \quad (27)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} Z_{ijklt}^{imp} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{k \in G_k} Z_{ijklt}^{imp} \leq S_{jkt}^{imp} \cdot Cap_{jk}^{imp} \quad \forall j \in D_j, \forall k \in T_k \cap (j, k) \in C_{jk}, \forall t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} Z_{lkj it}^{exp} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{k \in G_k} Z_{lkj it}^{exp} \leq S_{kjt}^{exp} \cdot Cap_{kj}^{exp} \quad \forall j \in D_j, \forall k \in T_k \cap (k, j) \in C_{kj}, \forall t \in T \quad (29)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in D_j} \sum_{l \in L} Z_{ijklt}^{imp} \leq P_{skt}^{imp} \quad \forall s \in T_k, \forall k \in G_k \cap (s, k) \in L_{sk}, \forall t \in T \quad (30)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in D_j} \sum_{l \in L} Z_{lkj it}^{exp} \leq P_{kst}^{exp} \quad \forall s \in T_k, \forall k \in G_k \cap (k, s) \in L_{ks}, \forall t \in T \quad (31)$$

$$LB_{jkt}^{imp} \leq S_{jkt}^{imp} \leq UB_{jkt}^{imp} \quad \forall (j, k) \notin L_{jk}, \forall t \in T \quad (32)$$

$$LB_{kjt}^{exp} \leq S_{kjt}^{exp} \leq UB_{kjt}^{exp} \quad \forall (k, j) \notin L_{kj}, \forall t \in T \quad (33)$$

$$|S_{jkt}^{imp} - S_{kjt}^{exp}| \leq 1 \quad \forall (j, k) \notin L_{jk}, \forall t \in T \quad (34)$$

$$|\sum_{t \in T} (S_{jkt}^{imp} - S_{kjt}^{exp})| \leq 1 \quad \forall (j, k) \notin L_{jk} \quad (35)$$

$$X_{ilt}^{imp}, X_{lit}^{exp}, Y_{ijlt}^{imp}, Y_{ijlt}^{exp}, Z_{ijklt}^{imp}, Z_{lkj it}^{exp}, R_{ijt}^{imp}, R_{jit}^{exp}, P_{ijt}^{imp}, P_{jit}^{exp}, P_{jkt}^{imp}, P_{kjt}^{exp}, S_{jkt}^{imp}, S_{kjt}^{exp} \geq 0 \text{ ve Tamsayı} \\ S_{ijt}^{imp}, S_{jit}^{exp} \geq 0, 0 \leq U_{ijt}^{imp} \leq 1 \text{ ve } 0 \leq U_{jit}^{exp} \leq 1 \quad (36)$$

(4) ve (5) kısıtları, her sipariş ülkesinin aylık ithalat/ ihracat yük taleplerinin farklı taşıma modları veya dış kaynak kullanımı aracılığıyla karşılanmasını sağlamaktadır. (6) ve (7) kısıtları, lojistik komisyoncusunun kendi Ro-Ro gemilerinin, herhangi bir demiryolu terminali ile bağlantısı olmayan limanlara yaptığı taşımalar için kapasite kısıtlarıdır. (8) ve (9) kısıtları ise Türkiye'deki limanlar ile herhangi bir demiryolu terminali ile bağlantısı olmayan Avrupa'daki limanlar arasındaki denizyolu taşımacılığında, lojistik komisyoncusunun sadece kendi Ro-Ro gemileri ile yapılan taşımalar için akışın korunumu kısıtlarıdır. Bir başka deyişle, bu kısıtlar ile ilgili denizyolu taşımacılık hatları üzerinde lojistik komisyoncusunun kendi Ro-Ro gemileri ile taşınan toplam yük miktarları hesaplanabilmektedir. (10) ve (11) kısıtları yardımıyla Türkiye'deki limanlar ile demiryolu terminaleri ile direkt bağlantısı olan

Avrupa'daki limanlar arasında sadece diğer lojistik servis sağlayıcıların Ro-Ro gemileri ile gerçekleştirilebilen (dış kaynak kullanımı) denizyolu taşımacılığına ilişkin yük miktarları hesaplanabilmektedir. (12) ve (13) kısıtları, hem lojistik komisyoncusunun hem de diğer lojistik servis sağlayıcıların Ro-Ro gemileri ile yapılabilen limanlar için kapasite kısıtlarıdır. Bu kısıtlarda, ekstra yüklerin yüklenip/boşaltıldığı aktarma limanları da dikkate alınmıştır. (8) ve (9) kısıtlarının aksine, (14) ve (15) kısıtları, Türkiye'deki limanlar ile demiryolu bağlantısı bulunan Avrupa'daki limanlar arasındaki denizyolu taşımacılığında, lojistik komisyoncusunun sadece kendi Ro-Ro gemileri ile yapılabilen ithalat ve ihracat yönlerindeki taşımalar için akışın korunumu kısıtlarıdır. (16) ve (17) kısıtlarına dayanarak, ilgili limanlar arasında lojistik komisyoncusunun kendi Ro-Ro gemileri ile gerçekleştirmesi gereken sefer sayıları hesaplanabilmektedir.

Ayrıca, (18) ve (19) kısıtları ile lojistik komisyoncusunun farklı denizyolu taşımacılık hatları üzerinde ithalat ve ihracat yönlerinde faaliyet gösteren kendi Ro-Ro gemilerine ait faydalı kullanım oranları dönemsel olarak hesaplanabilmektedir. Bu oranlar, ilgili denizyolu taşımacılık hattı üzerinde taşınan toplam ithalat ve ihracat yönlerindeki yük miktarlarının, ilgili hat üzerinde aylık yapılabilecek maksimum sefer sayısı ile Ro-Ro kapasitesinin çarpımına bölünerek elde edilmiştir. Bunun yanında, lojistik komisyoncusu denizyolu taşımacılığında, kendi Ro-Ro gemilerinin kullanım oranlarının belli bir seviyenin üzerinde olmasını hedeflemektedir. Bu bağlamda, (20) ve (21) kısıtları ile faydalı kullanım oranlarına ilişkin alt ve üst sınırlar tanımlanmıştır. (22) ve (23) kısıtları demiryolu ağında sadece sabit çizelgeli blok trenler ile taşınan hatlar üzerindeki yüklere ilişkin kapasite kısıtlarıdır. (24) ve (25) kısıtları ile blok tren seferlerinin olmadığı hatlar üzerinde, esnek çizelgeli hızlı trenler ile taşınan yük miktarları hesaplanabilmektedir. Benzer şekilde, hem blok trenler hem de esnek çizelgeli hızlı trenler ile taşımacılık faaliyetlerini gerçekleştirilebilen demiryolu terminaleri için kapasite kısıtları (26) ve (27)'de verilmiştir.

(28) ve (29) kısıtları, blok tren seferlerinin düzenlendiği ve aktarma istasyonlarını da içeren ilgili demiryolu hatlarındaki taşımacılığa ilişkin kapasite kısıtlarıdır. Bir başka deyişle, blok trenler ile bu istasyonlara gelen yüklerin bazıları sipariş ülkelerine karayolu ile dağıtılmakta, geri kalan yükler diğer sipariş ülkelerine hızlı trenler aracılığıyla ulaştırılmaktadır. Aktarma istasyonları ve diğer terminaller arasındaki taşımacılık faaliyetlerinin sadece hızlı trenler kullanılarak yapılabildiği (30) ve (31) kısıtlarında formüle edilmiştir. (32) ve (33) kısıtları sadece blok tren seferlerinin düzenlendiği demiryolu hatlarında yapılabilecek tren sefer

sayılarına ilişkin aylık alt ve üst sınırları göstermektedir. Blok trenler ile yapılan demiryolu taşımacılığında, her ay içerisinde ithalat ve ihracat yönlerindeki yük taşımacılığı için gerçekleştirilen sefer sayıları arasında bir denge olmalıdır. Bir başka ifadeyle, sabit çizelgeli bir blok trenin, önceden tanımlı iki farklı istasyon arasında yapacağı aylık ithalat ve ihracat toplam sefer sayıları arasındaki fark en fazla bir olabilmektedir (34). Bunun temel sebebi, çizelge kısıtlarından ötürü, dört haftadan oluşan aylar için yapılan ithalat ve ihracat sefer sayıları birbirine eşit olmakta iken, beş haftadan oluşan aylarda toplam sefer sayıları arasındaki farkın bir olabilmektedir. Aylık bazda sağlanan bu dengenin, yıllık bazda da korunması istenmektedir (35). Ayrıca, bu kısıtlarda mutlak değer ifadesinin kullanılması nedeniyle, doğrusal olmayan bir yapı söz konusudur. Çözüm aşamasında, bu kısıtlar, (37) – (40) kısıtlarında verildiği üzere doğrusal forma dönüştürülmüştür [8]. Son olarak (36) kısıtı ile karar değişkenlerinin pozitif tamsayı olma koşulu ve bazı değişkenler için değer aralığı tanımlanmaktadır.

$$S_{jkt}^{imp} - S_{jkt}^{exp} \leq 1 \quad \forall (j, k) \notin L_{jk}, \forall t \in T \quad (37)$$

$$S_{jkt}^{exp} - S_{jkt}^{imp} \leq 1 \quad \forall (j, k) \notin L_{jk}, \forall t \in T \quad (38)$$

$$\sum_{t \in T} (S_{jkt}^{imp} - S_{jkt}^{exp}) \leq 1 \quad \forall (j, k) \notin L_{jk} \quad (39)$$

$$\sum_{t \in T} (S_{jkt}^{exp} - S_{jkt}^{imp}) \leq 1 \quad \forall (j, k) \notin L_{jk} \quad (40)$$

3. UYGULAMA ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

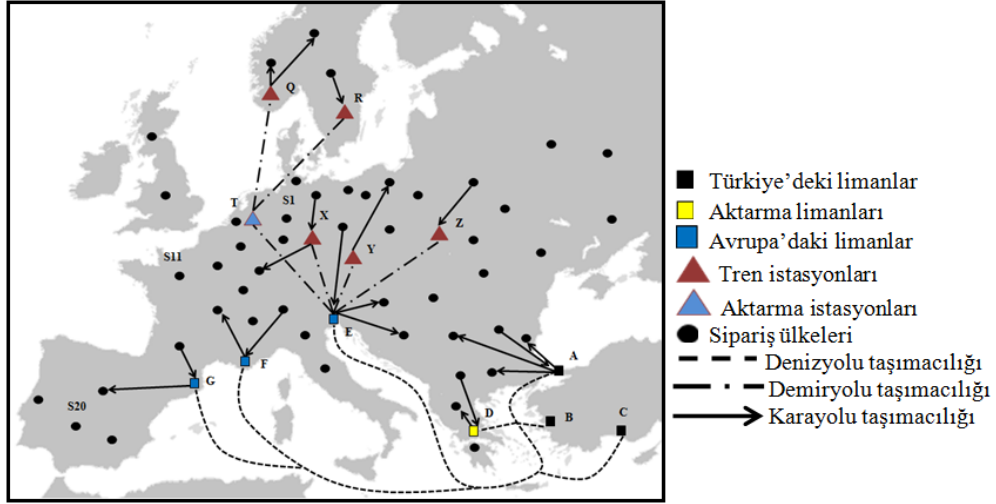
Bu bölümde, geliştirilen karma tamsayılı matematiksel programlama modelinin performansını ve pratik hayattaki geçerliliğini test etmek amacıyla, Türkiye’de faaliyet gösteren büyük ölçekli bir lojistik komisyoncusuna ilişkin gerçek hayat uygulamasından elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Lojistik komisyoncusu; malzemeler, bitmiş ürünler, endüstriyel ve tüketim mallarını içeren yüklerin treyler ve konteynerler ile taşınmasına ilişkin etkin ve efektif yük planları oluşturmayı hedeflemektedir. Ayrıca, birçok uluslararası firmanın ve markanın yük taşımacılığı için demiryolu ve denizyolu hatlarını içeren intermodal lojistik çözümleri sunmaktadır. Her sektörün farklı taşımacılık gereksinimlerine karşı, çeşitli sektörler (otomotiv, hızlı tüketim ürünleri, gıda, tekstil, endüstri, yapı ve dekorasyon vb.) yönelik taşımacılık çözümleri sunabilmektedir. Lojistik komisyoncusuna ait intermodal lojistik ağı Şekil 2’de gösterilmiştir.

Örnek uygulamadaki lojistik ağı, biri aktarma limanı (E) olmak üzere Avrupa’da bulunan 4 liman (D, E, F ve G) ve Türkiye’de yer alan 3 limandan (A, B ve C) oluşan denizyolu taşımacılık hattına sahiptir. Ayrıca, Avrupa’da biri aktarma demiryolu istasyonu (T) olmak üzere 3 sabit çizelgeli blok tren hattı (X, Z ve

T) ve 3 esnek çizelgeli hızlı tren hattı (Y, Q ve R) yer almaktadır. Bütünleşik müşterilere karşılık gelen 49 sipariş ülkesi (S1,...,S49) mevcuttur ve bu sipariş ülkeleri ile Türkiye arasında ihracat/ithalat taşımacılık operasyonları gerçekleştirilmektedir. Planlama periyodu, 12 aylık dönemlerden oluşmaktadır. Mevcut intermodal lojistik ağ yapısının detayına bakıldığında, Türkiye’deki limanlar ile Avrupa’daki limanlar arasında haftanın 4 günü, lojistik komisyoncusunun kendi Ro-Ro gemileri ile seferler düzenlenmektedir. Her seferin transit süresi yaklaşık 60 saat olup, 240 treyler kapasiteli Ro-Ro gemileri ile gerçekleştirilmektedir. Blok tren kapasiteleri sefer başına 32 treyler olup, her bir demiryolu hattı üzerinde aylık minimum yapılması gereken sefer sayısı 8’dir. Kilometre bazlı tüketim üzerinden birim treyler için, CO₂ salınım değerleri, karayolu taşımacılığında 0,918 kg/km, denizyolu taşımacılığında 0,357 kg/km ve demiryolu taşımacılığında (elektrikli kullanımı) ise 0 kg/km’dir.

Örnek uygulamada, denizyolu ve demiryolu hatlarını içeren intermodal lojistik ağının yapısı Tablo 2’de özetlenmiştir. Bu tabloda, uygulama çalışmasına ait intermodal lojistik ağ yapısı ile, Tablo 1’de verilen model notasyonu arasındaki bağlantı sağlanmıştır. Bir başka deyişle, uygulama çalışmasındaki denizyolu taşımacılık hatları üzerinde, hangi limanlar arasında sadece lojistik komisyoncusunun kendi Ro-Ro gemilerinin faaliyet gösterdiği, hangi limanların aktarma limanı olarak kullanıldığı, hangi limanlar arasında sadece diğer lojistik servis sağlayıcıların Ro-Ro gemilerinin kullanılabileceği işaretlenmiştir. Ayrıca, benzer işlemler, demiryolu taşımacılığı faaliyetleri için de gerçekleştirilmiştir. Hangi hatlar üzerinde sadece blok tren seferlerinin düzenlendiği, hangi hatlar üzerinde ise hızlı trenlerin kullanılabildiği ve hangi terminallerin aktarma demiryolu istasyonu oldukları işaretlenmiştir. Türkiye’de lojistik ve lojistik komisyonculuğu faaliyetleri gösteren bir firmaya ait gerçek hayat uygulamasında kullanılan parametrelere ilişkin veri aralığı Tablo 3’te verilmiştir.

Bu veriler ile geliştirilen matematiksel programlama modeli LINGO 14.0 eniyileme yazılımı kullanılarak her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı çözüldüğünde Tablo 4’te verilen kazanç matrisi elde edilmiştir. Eniyileme sürecinde kullanılan bilgisayarın konfigürasyonu ise Intel i7 Core 2.4 GHz işlemci ve 16 GB RAM olup Windows 8 işletim sistemine sahiptir. Ayrıca, tablo içerisinde modeldeki toplam değişken sayısı, tamsayılı değişken sayısı, toplam kısıt sayısı ve çözüm süresine yer verilmiştir. Kazanç matrisine ait köşegen, her bir hedef için elde edilen eniyi amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir. Matris içerisindeki diğer değerler ise bir amacın eniyilenmesi halinde, diğer amaçların alacağı değerleri ifade etmektedir.



Şekil 2. Firmaya ait intermodal lojistik ağı (Intermodal logistics network of the freight forwarder)

Tablo 2. İntermodal lojistik ağ konfigürasyonu (Intermodal logistics network configuration)

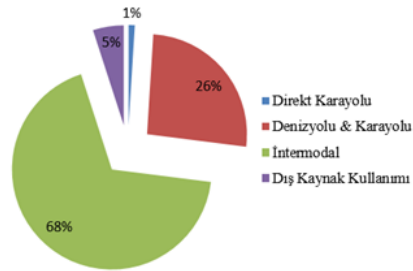
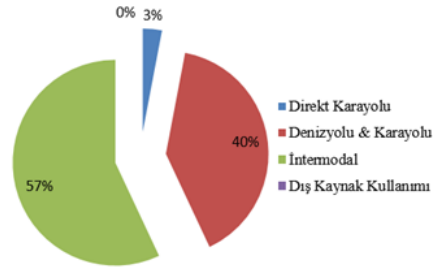
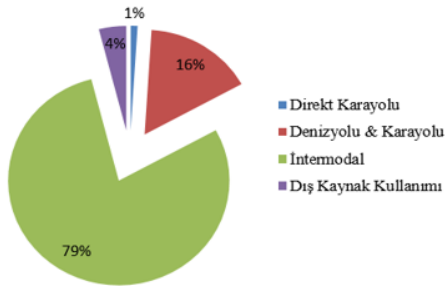
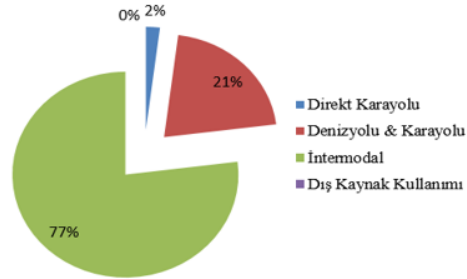
Limanlar (Türkiye/ Avrupa)	A			B			C			T_j	D_j	γ_j
	L_{ij}	C_{ij}	B_{ij}	L_{ij}	C_{ij}	B_{ij}	L_{ij}	C_{ij}	B_{ij}			
D			⊗	⊗			⊗				⊗	⊗
E		⊗								⊗		
F					⊗							
G	⊗											
Avrupa'daki Liman /Tren İstasyonları		D			T_k	D_k	G_k					
		L_{kj}	C_{kj}	B_{kj}								
X			⊗			⊗						
Y		⊗				⊗						
Z			⊗			⊗						
T			⊗		⊗	⊗						
Q		⊗									⊗	
R		⊗									⊗	

Tablo 3. Örnek uygulamadaki parametrelere ilişkin veri aralıkları (Data ranges related to the model parameters)

Parametre	Veri aralığı
Sipariş Ülkelerinin aylık ithalat yük talebi (Treyler/Ay)	0 - 370
Sipariş Ülkelerinin aylık ihracat yük talebi (Treyler/Ay)	0 - 366
Lojistik Komisyoncusunun kendi Ro/Ro gemileri ile taşıma maliyeti (€/Treyler)	500 - 1475
Lojistik Komisyoncusunun Ro/Ro gemi kapasiteleri (Treyler)	165 - 240
Diğer lojistik hizmet sağlayıcılar ile denizyolu taşımacılık maliyeti (€/Treyler)	647,73 - 918,3
Blok trenler sefer maliyeti (€/sefer)	20121 - 23328
Blok tren kapasitesi (Treyler)	28 - 32
Esnek çizelgeli hızlı trenler ile birim taşıma maliyeti (€/Treyler)	685
Karayolu taşımacılığı birim maliyeti (€/Treyler/km)	1,20
Lojistik Komisyoncusunun kendi Ro/Ro gemileri ile aylık maksimum sefer sayısı	4 - 14
Blok trenler ile aylık maksimum yapılabilecek demiryolu sefer sayısı	12 - 41
Türkiye'deki limanlar & sipariş ülkeleri arasındaki karayolu mesafesi (km)	540 - 5070
Türkiye'deki limanlar ile sipariş ülkeleri arasındaki karayolu transit süresi (saat)	27 - 254
Avrupa'daki limanlar & sipariş ülkeleri arasındaki karayolu mesafesi (km)	50 - 4160
Avrupa'daki limanlar ile sipariş ülkeleri arasındaki karayolu transit süresi (saat)	2.5 - 208
Avrupa'daki istasyonlar & sipariş ülkeleri arasındaki karayolu mesafesi (km)	50 - 3015
Avrupa'daki istasyonlar & sipariş ülkeleri arasındaki karayolu transit süresi (saat)	2.5 - 150,8
Avrupa'daki tren istasyonları ile limanlar arasındaki demiryolu transit süresi (saat)	20 - 24
Türkiye'deki limanlar ile Avrupa'daki limanlar arasındaki transit süresi (saat)	17 - 96

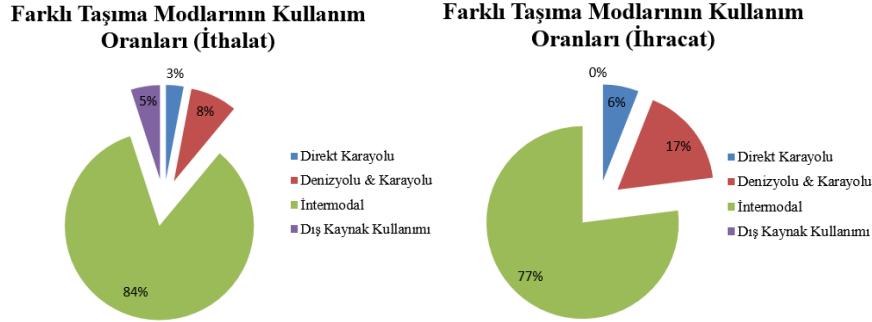
Tablo 4. Kazanç matrisi ve çözüm detayları (Payoff matrix and solution details)

Amaç Fonksiyonları	Toplam Maliyet (€)	Toplam Transit Süresi (sa)	Toplam CO ₂ Salınımı (kg)
Toplam Maliyet (€)	137513933,0	1872491	89898090,0
Toplam Transit Süresi (saat)	142411984,0	1615857	85437220,0
Toplam CO ₂ Salınımı (kg)	142330667,0	1758551	84438490,0
Model Sınıfı	MILP	MINLP	MILP
Toplam değişken sayısı	34907	34907	34907
Toplam Tamsayı değişken sayısı	32064	32064	32064
Toplam kısıt sayısı	4438	4438	4438
Toplam doğrusal olmayan kısıt	0	240	0
Toplam ardıştırma sayısı	78013	53281300,0	3160
CPU çözüm süresi (sn)	43.09	2076.23	16.50

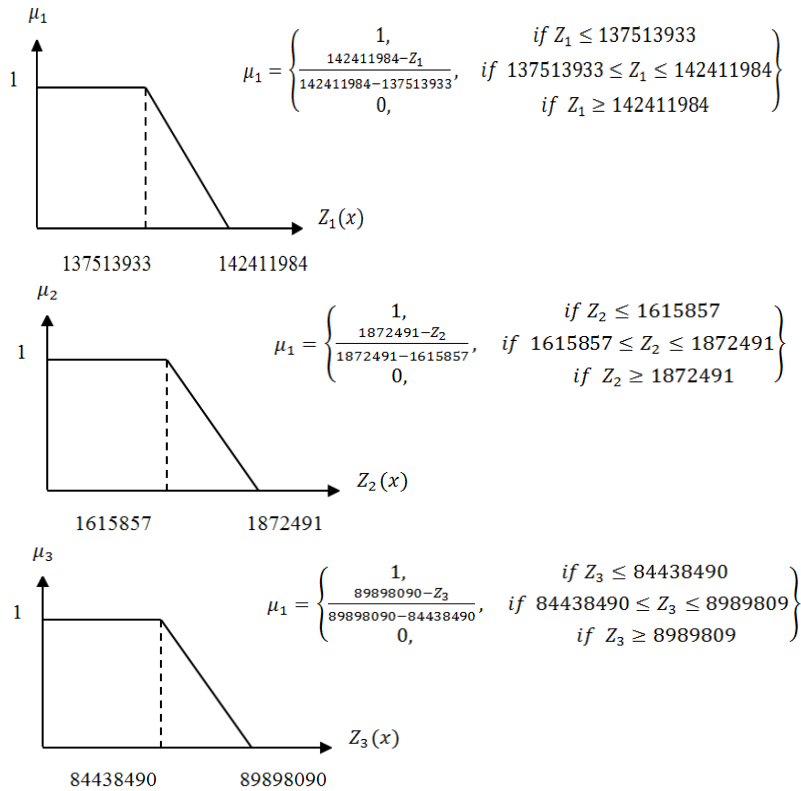
Farklı Taşıma Modlarının Kullanım Oranları (İthalat)**Farklı Taşıma Modlarının Kullanım Oranları (İhracat)****Şekil 3.** Farklı taşıma modları ve dış kaynak kullanım oranları: Toplam taşımacılık maliyetinin en küçüklenmesi (Usage rates of different transportation modes and outsourcing: Minimize total transport costs)**Farklı Taşıma Modlarının Kullanım Oranları (İthalat)****Farklı Taşıma Modlarının Kullanım Oranları (İhracat)****Şekil 4.** Farklı taşıma modları ve dış kaynak kullanım oranları: Toplam transit süresinin en küçüklenmesi (Usage rates of different transportation modes and outsourcing: Minimize total transit time)

Tablo 4'te görüldüğü üzere, geliştirilen matematiksel programlama modeli çok sayıda tamsayı değişkene sahip olmasına rağmen, büyük boyutlu gerçek hayat problemleri için makul sürelerde karar vericiye çözümler üretebilmektedir. Ayrıca, Tablo 4'te verildiği üzere, toplam transit süresi ve toplam CO₂ salınımı hedefleri en küçüklendiğinde, toplam maliyet değerinde önemli ölçüde artışlar meydana gelmektedir. Benzer şekilde, toplam maliyet ve toplam CO₂ salınımının en küçüklenmesi durumunda, toplam transit süresinin arttığı görülmektedir. Son olarak, toplam maliyet ve toplam transit süresinin en küçüklenmesi, toplam CO₂ salınımında artışlar meydana getirmektedir. Bu bağlamda, ele alınan hedeflerin birbirleri ile çeliştiği söylenebilir. Çekici ve dorse (veya konteyner) kullanılarak yapılan karayolu taşımacılığında transit süreleri, intermodal

taşımacılıkta kullanılan denizyolu ve demiryolu taşımacılığı transit sürelerine nazaran daha kısa olmasına rağmen, çevreye salınan toplam CO₂ miktarı karayolu taşımacılığında çok daha fazladır. Bu nedenle, toplam transit süresi ve toplam CO₂ salınımı hedefleri kısmi olarak çelişmektedir. Sadece toplam maliyetin en küçüklenmesi hedeflendiğinde, ithalat ve ihracat yönlerindeki farklı taşıma modlarına ilişkin elde edilen kullanım oranı değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Bir başka ifadeyle, bu değerler toplam yük talebinin hangi oranda hangi taşıma modu ile karşılanması gerektiğini göstermektedir. Benzer şekilde, sadece toplam transit sürelerinin ve sadece çevresel etkinin en küçüklenmesi istendiğinde, farklı taşıma modlarına ilişkin kullanım oranı değerleri Şekil 4 ve Şekil 5'de görülmektedir. Birtakım bilgi eksiklikleri, tamamlanmamış veriler ve kesin bilgi



Şekil 5. Farklı taşıma modları ve dış kaynak kullanım oranları: Toplam CO₂ salınımının en küçüklenmesi (Usage rates of different transportation modes and outsourcing: Minimize Total CO₂ emission)

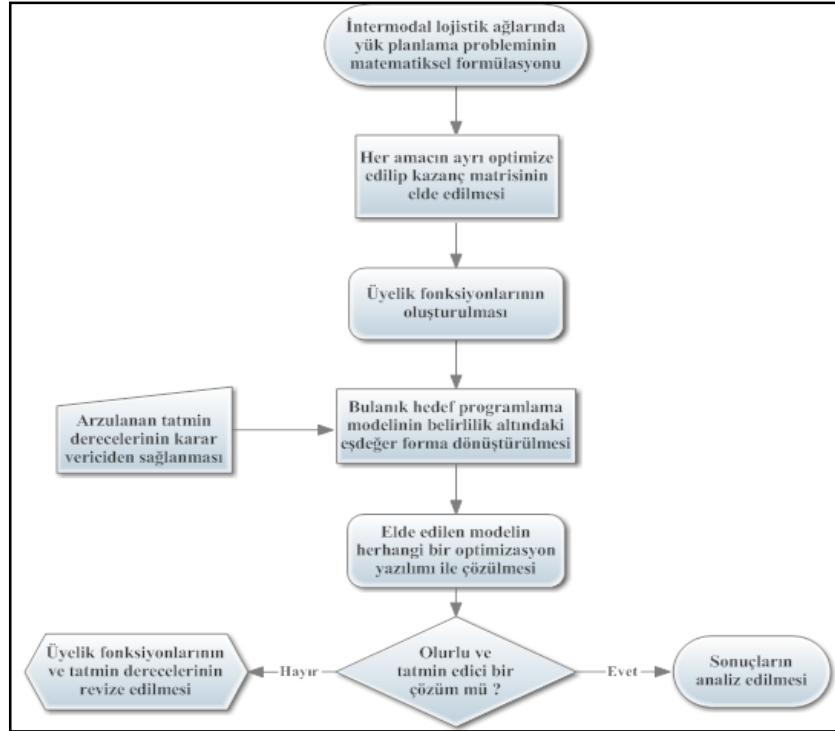


Şekil 6. Toplam taşımacılık maliyeti, Toplam transit süreleri, Toplam CO₂ salınımı amaçlarına ilişkin üyelik fonksiyonları (Membership functions for total transport cost, total transit time and total CO₂ emission objectives)

toplamanın zor olması sebebiyle, ele alınan amaçların hedef değerleri karar verici tarafından kesin ve net bir şekilde belirlenememektedir. Bilgi eksikliği, karar vericinin toplam maliyet verilerini tam ve doğru olarak bilmesinin mümkün olmaması nedeni ile maliyet ile ilgili hedef değerleri kesin olarak ortaya koyamaması ile ilişkilidir. Aynı durum toplam transit süresi ve çevresel etki hedefleri için de söz konusudur. Bu nedenle, amaçlara ilişkin hedef değerlerin belirsizlik (bulanıklık) içerdiği varsayılmış ve kazanç matrisinden yararlanılarak bu değerlere ait alt ve üst sınırlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu değerler Şekil 6'daki doğrusal üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasında kullanılmıştır. Çelişen amaçların belirsizlik altında bir arada ele alınması ve karar vericiye tatmin edici çözümlerin sunulabilmesi, çok amaçlı eniyileme tekniklerinin kullanımını

gerektirmektedir. Çalışma kapsamında, gerek kolay uygulanabilir olması ve hesaplama kolaylığı sağlaması, gerekse bulanık hedeflere ait hem önem dereceleri hem de öncelik ilişkilerini eş zamanlı olarak ele alabilen tek bir eniyileme modelinin çözümünü gerektirmesi sebebiyle, Chen ve Tsai [9] tarafından geliştirilen bulanık hedef programlama yaklaşımı kullanılmıştır.

Bu yaklaşım ile, öncelik sırası arttıkça birden fazla eniyileme modelinin çözümünü gerektiren ve bu nedenle de hesaplama yükünü artıran bilimsel yazındaki klasik bulanık hedef programlama yaklaşımlarından farklı olarak tek bir eniyileme modelinin çözümü ile karar vericiye makul sürelerde tatmin edici çözümler sunulabilmektedir. Ayrıca, bu yaklaşımın bilimsel yazında kapalı döngü tedarik



Şekil 7. Kullanılan bulanık hedef programlama yaklaşımına ilişkin akış diyagramı (A flow chart for the utilized fuzzy goal programming approach)

Tablo 5. Bulanık hedef programlama eniyileme sonuçları (Optimization results of fuzzy goal programming approach)

Amaç Fonksiyonları	Toplam Maliyet	Toplam Transit Süresi	Toplam CO ₂ Salınımı
Amaç fonksiyonu değeri	138493471,0	1685633	86184290,0
Hedeflere ait tatmin derecesi	0,80	0,73	0,68
Hedef değerden sapma	979538 €	69776 saat	1745800 kg.
CPU çözüm süresi (Sn.)	838,67		

Tablo 6. Dış kaynak kullanımı ithalat/ihracat yük miktarları (Import/export load quantities by outsourcing)

Türkiye	Sipariş Ülkesi	Aylar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	S27	İhracat	6	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	S18	İthalat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0
A	S27	İthalat	14	14	0	22	0	32	0	13	19	18	22	0
A	S31	İthalat	11	7	11	0	0	0	0	16	19	12	13	13
A	S32	İthalat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
A	S34	İthalat	0	105	103	85	89	72	110	96	0	90	115	77
A	S41	İthalat	43	0	55	54	53	55	40	0	42	0	0	0
A	S49	İthalat	0	0	0	0	0	0	1	4	4	0	5	0

zinciri tasarımı, bütünlük üretim planlama ve kalite fonksiyon göçerimi gibi pek çok alanda yaygın uygulamaları olmasına rağmen, intermodal taşımacılık alanında günümüze değin herhangi bir uygulamasına rastlanmamıştır. Bu yaklaşımda, karar verici tarafından her bir amaç dilsel değişkenler (çok önemli, önemli, az önemli, önemsiz vb.) kullanarak değerlendirilir ve bu dilsel değişkenlere karşılık gelen bulanık üçgen sayıların durulaştırma teknikleri kullanılması sonucunda arzulanan tatmin dereceleri belirlenmektedir. Dilsel değişkenler yardımıyla, yüksek önem düzeyi ve öncelik sırasına sahip hedeflere daha yüksek arzulanan tatmin dereceleri atanarak hedeflere ait üyelik dereceleri toplamı

maksimize edilmeye çalışılır. Geliştirilen çok amaçlı intermodal taşımacılıkta yük planlama probleminin, ilgili bulanık hedef programlama tekniği ile çözümüne ilişkin akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, toplam taşımacılık maliyeti, toplam transit süresi ve toplam CO₂ salınımı amaçlarına ilişkin arzulanan tatmin dereceleri, lojistik komisyoncusu tarafından sırasıyla 0,8, 0,7 ve 0,6 olarak belirlenmiş; bulanık hedef programlama modeli belirlilik altındaki eşdeğer forma (41) - (45) kısıtları ile dönüştürülerek, Tablo 5'deki çözümler elde edilmiştir.

$$Maks f(\mu) = \sum_{k=1}^3 \mu_k = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 \quad (41)$$

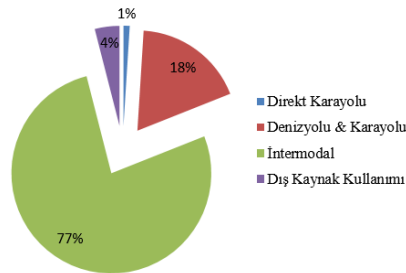
Tablo 7. Denizyolu taşımacılığı yük planı (Load planning in maritime transportation)

Aylar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lojistik komisyoncusunun kendi Ro/Ro Seferleri ile yapılan ihracat/ithalat yük miktarları												
A/E	35	36	38	37	35	38	36	36	36	47	40	34
A/D	2275	2375	2631	2567	2596	2467	2607	2277	2776	2397	2616	2298
B/F	74	92	104	97	118	114	114	105	126	96	101	78
E/A	13	12	13	13	14	13	14	12	13	13	13	11
D/A	2317	2177	2436	2407	2367	2533	2482	1796	2574	2163	2299	2207
F/B	67	78	94	95	111	86	109	76	97	64	89	79
Diğer lojistik servis sağlayıcıların Ro/Ro gemileri ile yapılan ihracat/ithalat yük miktarları												
A/D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A/G	125	249	294	291	438	387	229	265	421	304	463	223
B/D	361	377	433	426	450	433	401	370	456	404	445	368
C/D	66	73	85	84	88	78	83	71	91	74	86	71
D/A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G/A	65	75	87	91	100	82	94	80	106	72	84	74
D/B	16	17	20	18	19	19	19	13	18	14	15	15
D/C	6	6	7	7	7	7	7	5	7	6	6	6

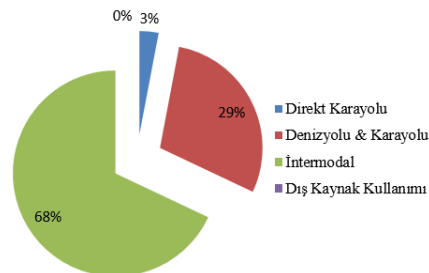
Tablo 8. Demiryolu taşımacılığı yük planı (Load planning in railway transportation)

Aylar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Blok tren İhracat/ithalat sefer sayıları												
D/X	9	11	11	12	12	11	11	9	12	11	12	9
D/Z	26	24	26	26	27	25	27	26	26	27	25	27
D/T	31	32	37	36	35	36	36	27	38	32	35	30
X/D	10	10	12	11	11	12	12	8	11	11	11	10
D/Z	27	24	26	26	26	26	27	25	26	26	25	27
D/T	32	32	36	35	34	37	37	26	39	31	34	31
Esnek çizelgili hızlı trenler ile ihracat/ithalat yük miktarları												
D/Y	161	189	188	176	185	168	170	205	195	180	199	165
T/Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T/R	123	125	162	139	153	149	147	130	179	129	186	148
Y/D	110	68	76	105	90	124	64	0	162	47	101	60
Q/T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R/T	78	14	36	18	34	18	41	23	136	16	17	37

Farklı Taşıma Modlarının Kullanım Oranları (İthalat)



Farklı Taşıma Modlarının Kullanım Oranları (İhracat)



Şekil 8. Farklı taşıma modları ve dış kaynak kullanım oranları: Bulanık hedef programlama yaklaşımı (Usage rates of different transportation modes and outsourcing: A fuzzy goal programming approach)

$$\mu_1 \leq (142411984 - Z_1)/4898051 \quad (42)$$

$$\mu_2 \leq (1872491 - Z_2)/256634 \quad (43)$$

$$\mu_3 \leq (89898090 - Z_3)/5459600 \quad (44)$$

Tüm kısıtlar kümesi (4) – (36)

$$\mu_1 \geq 0.8, \mu_2 \geq 0.7, \mu_3 \geq 0.6 \text{ ve } \mu_1, \mu_2, \mu_3 \leq 1 \quad (45)$$

Farklı taşıma modlarına ait kullanım oranları Şekil 8’de verilmiştir. Bu bağlamda, bulanık hedef programa yaklaşımının kullanılması ile elde edilen ve

karar vericinin hedeflerini önemli ölçüde tatmin eden çözüme ilişkin dış kaynak kullanım miktarları (treylar/dorse cinsinden) Tablo 6’da verilmiştir. Bir başka deyişle, Türkiye’deki limanlar ile Avrupa’daki farklı sipariş ülkeleri arasında dış kaynak kullanımı yolu ile taşınan yük miktarları Tablo 6’da görülmektedir. Ayrıca, denizyolu ve demiryolu taşımacılık detayları Tablo 7 ve Tablo 8’de özetlenmiştir. Daha detaylı olarak, Türkiye ve Avrupa’daki limanlar arasında lojistik komisyonun kendi Ro-Ro gemileri ve diğer lojistik servis sağlayıcıların Ro-Ro gemileri kullanılarak ithalat/ihracat yönlerinde taşınan yük miktarları

(treylar/dorse cinsinden) Tablo 7’de verilmiştir. Tablo 8’de ise ithalat/ihracat yönlerinde farklı demiryolu terminalleri arasında yapılması gereken aylık blok tren sefer sayıları ile esnek çizelgeli hızlı trenler ile taşınması gereken yük miktarları verilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda (Bakınız Tablo 5 ve Şekil 8) bulanık hedef programlama yaklaşımının kullanılması ile sağlanan sonuçlar lojistik komisyoncusu tarafından kabul edilebilir düzeyde olup; karar vericiye hem ekonomik, hem müşteri tatmini hem de çevresel açılardan etkin ve efektif yük planları oluşturmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, intermodal taşımacılığın, tüm hedefler doğrultusunda en yüksek oranda kullanılması gereken taşıma modeli olduğu açıkça ortaya konulmuştur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İntermodal lojistik ağlarında yük ve filo planlama problemleri gerek araştırmacılar gerekse uygulayıcıların dikkatini çeken önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Mevcut çalışmada, denizyolu, demiryolu ve karayolu taşımacılığında oluşan intermodal taşımacılıkta periyodik yük planlama problemi için, lojistik komisyonculuğu bakış açısıyla, çok amaçlı yeni bir eniyileme modeli geliştirilmiştir. Toplam maliyet, toplam transit süresi ve toplam çevresel etki gibi çelişen amaçların, belirsizlik altında entegre bir şekilde ele alınması ve karar vericiye tatmin edici çözümler sunulabilmesi amacıyla bulanık hedef programlama yaklaşımından yararlanılmıştır. Geliştirilen model ile maliyet etkin, müşteri odaklı ve çevreye duyarlı yük planları oluşturulabileceği ortaya konmuştur.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, intermodal taşımacılığın kullanım oranının diğer taşıma modellerine oranla artırılması, ele alınan üç farklı amaç için de firmalara önemli ölçüde avantajlar sağlayacaktır. İntermodal lojistik ağlarında filo planlama problemleri için yapay zekâ tekniklerinin kullanımı; belirsizlik durumlarının modellenmesi; çeşitli gerçek hayat senaryolarının farklı bakış açıları ile analizi gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasındadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. European Conference of Ministers of Transport, United Nations Economic Commission for Europe & Statistical Division and European Union Eurostat (1997), Glossary for Transport Statistics, <http://www1.oecd.org/cem/online/glossaries/>.
2. Macharis, C. ve Bontekoning, Y.M., Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review, **European Journal of Operational Research**, Cilt 153, No 2, 400-416, 2004.
3. Ishfaq, R. ve Sox, C.R., Intermodal logistics: The interplay of financial, operational and service issues, **Transportation Research Part E**, Cilt 46, No 6, 926-949, 2010.
4. Yang, X., Low, J. M. W. ve Tang L.C., Analysis of intermodal freight from China to Indian Ocean: A goal programming approach, **Journal of Transport Geography**, Cilt 19, No 4, 515-527, 2011.
5. Bierwirth, C., Kirschstein, T. ve Meisel F., On transport service selection in intermodal rail/road distribution networks, **BuR - Business Research**, Cilt 5, No 2, 198-219, 2012.
6. Meisel, F., Kirschstein, T. ve Bierwirth, C., Integrated production and intermodal transportation planning in large scale production-distribution-networks, **Transportation Research Part E**, Cilt 60, 62-78, 2013.
7. Rodrigues, V. S., Pettit, S., Harris, I., Beresford, A., Piecyk, M., Yang, Z. ve Ng, A., UK supply chain carbon mitigation strategies using alternative ports and multimodal freight transport operations, **Transportation Research Part E**, Cilt 78, 40-56, 2015.
8. Mangasarian, O.L., Absolute value equation solution via concave minimization, **Optimization Letters**, Cilt 1, No 1, 3-8, 2007.
9. Chen, L.H. ve Tsai F.C., Fuzzy goal programming with different importance and priorities, **European Journal of Operational Research**, Cilt 133, No 3, 548-556, 2001.