



ÇAPRAZ SEVKİYATTA BÜTÜNLEŞİK KAPI ATAMA VE KAMYON ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR MATEMATİKSEL MODEL

Tuğba SARAÇ^{1*}, Feriştah ÖZÇELİK²

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8115-3206>

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0329-203X>

Anahtar Kelimeler Öz

Çapraz sevkiyat,
Kapi atama,
Çizelgeleme.

Çapraz sevkiyat, farklı tedarikçilerden gelen ürünlerin bir depoda sevkiyat noktalarına göre birleştirilerek genelde 24 saat içinde sevk edildiği depolama sürecidir. Bu işlemlerin gerçekleştirildiği merkezlerde, kamyonların hangi kapılara hangi sırada atandığı, işlemlerin tamamlanma zamanlarını oldukça etkileyen bir karardır. Bu nedenle literatürde, kamyonların kapılara atanması ve çizelgelenmesi problemi (KKAÇP) sıklıkla ele alınmıştır. Ancak bu çalışmalarda genellikle kapılara atanacak işçi sayısı ve kapıların hangi tip kamyonlara hizmet verebileceği konuları göz ardı edilmiştir. Bu çalışmada ilk defa kapılara atanacak işçi sayılarının ve hem gelen kamyonlara hem de giden kamyonlara hizmet verebilen karma kapıların dikkate alındığı bütünleşik KKAÇP ele alınmıştır. Ele alınan problemin çözümü için bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin performansı rassal türetilen test problemleri kullanılarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen çözüm yaklaşımı ile son işin tamamlanma zamanının klasik yaklaşıma göre ortalama %52 oranında iyileştiğini ortaya koymuştur.

*Sorumlu yazar; e-posta : tsarac@ogu.edu.tr

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1529587>

A MATHEMATICAL MODEL FOR INTEGRATED CROSS-DOCKING DOOR ASSIGNMENT AND TRUCK SCHEDULING PROBLEM

Keywords	Abstract
Cross-docking, Door assignment, Scheduling.	<i>Cross-docking is a storage process in which products from different suppliers are combined according to shipping points in a warehouse and shipped generally within 24 hours. In the centers where these transactions are carried out, which trucks are assigned to which doors in which sequence is a decision that greatly affects the completion time of the transactions. For this reason, door assignment and truck scheduling problem (DATSP) has been frequently addressed in the literature. However, these studies generally ignored the number of workers to be assigned to the doors and which types of trucks the doors could serve. In this study, for the first time, an integrated DATSP is considered in which the number of workers to be assigned to doors and mixed-mode service docks that the doors can serve both inbound and outbound trucks are taken into account. A mathematical model is proposed to solve the problem. The performance of the proposed model is demonstrated using randomly generated test problems. The results show that the completion time of the last job is improved by 52% on average with the proposed solution approach compared to the classical approach.</i>
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 07.08.2024	Submission Date : 07.08.2024
Kabul Tarihi : 14.10.2024	Accepted Date : 14.10.2024

1. Giriş

Çapraz sevkiyat merkezleri, tedarikçilerden gelen ürünlerin boşaltıldığı, boşaltılan ürünlerin gönderilecek müşterilerin taleplerine göre bir araya getirildiği ve depolanmadan ya da çok kısa süre depolanarak müşterilere gönderildiği dağıtım merkezleridir. Çapraz sevkiyat merkezine tedarikçi firmalardan gönderilen bir kamyon ulaştığında, ürünlerini boşaltabilmesi için bir kapiya atanır. Bu kapıda yükler boşaltılır ve gönderilecekleri müşterilere göre tasniflenir. Her müşteriye ait ürün grubu o müşteriye gidecek kamyonun atandığı kapiya taşınır. Bir müşteriye gönderilecek tüm ürünler tamamlandığında ürünler kamyonla yüklenerek sevkiyat gerçekleştirilir. Bir çapraz sevkiyat merkezinde kapılar farklı hizmet modlarında çalışabilir. Bu tesislerde en çok karşılaşılan modlardan bazıları tahsisli, karma ve bir kısmı tahsisli ve bir kısmı karmadır. Tahsisli hizmet modunda kapılar ya sadece

tedarikçiden gelen kamyonların yük boşaltma işlemlerine ya da müşterilere gidecek kamyonların yüklenmesi işlemlerine tahsis edilmiştir. Ve tek tip hizmet vermektedir. Karma hizmet modunda tüm kapılar hem gelen hem de giden kamyonlara hizmet verebilirler. Bir kısmı tahsisli ve bir kısmı karma modunda ise bazı kapılar giden kamyonlara bazı kapılar gelen kamyonlara tahsis edilmişken bazıları her ikisine birlikte hizmet verebilmektedir.

Çapraz sevkiyat merkezlerinde kamyonların hangi kapılara atandığı, boşaltılan yüklerin sevk kapılarına aktarılması aşamasındaki taşımaları oldukça etkileyen bir karardır. Bu nedenle literatürde, gelen ve giden kamyonların hangi kapılara atanacağı belirlendiği kapı atama problemi sıklıkla ele alınmıştır. Ancak kamyonların atandıkları kapılarda hangi sırada hizmet alacağı da önemlidir. Bir giden kamyonun merkezden ayrılabilmesi için tüm yüklerinin tamamlanmış olması gerekir. Eğer bir yük grubunu taşıyan gelen kamyon henüz boşaltılmamışsa giden kamyonun onu beklemesi gerekir. Dolayısıyla çapraz sevkiyatta kapı atama ve çizelgeleme probleminin birlikte ele alınması merkezin etkinliğinin büyük ölçüde arttırılabilmesine katkı sağlar.

Çapraz sevkiyat literatüründe genellikle kapılarda çalışacak işçi sayılarının belirli olduğu varsayımı yapılır ve sadece kapılara kamyonların atanmasına odaklanılır. Ancak bir kapıya kaç işçinin atandığı kamyon yükleme ve boşaltma sürelerini oldukça etkileyen bir faktördür. Bu nedenle göz önünde bulundurulması önemlidir.

Tablo 1, çapraz sevkiyatta kapı atama problemini ele alan çalışmaları sunmaktadır. Tablonun ikinci ve sonraki sütunları, bu çalışmaların sırasıyla çizelgeleme problemini (S) ele alıp almadığını kapıların tamamının tahsisli (E), bir kısmının tahsisli ve bir kısmının karma (EM) ve tamamının karma (M) olup olmadığını ve işgücünü (W) dikkate alıp almadığını göstermektedir. Son iki sütunda ise sırasıyla ilgili çalışmaların amaç fonksiyonu ve çözüm yöntemi verilmiştir.

Tablo 1'de yer alan çalışmalar incelendiğinde, çapraz sevkiyatta kamyonların kapılara atanması ve çizelgenmesi problemlerinin sıklıkla birlikte ele alındığı görülmektedir. Kamyonların kapılara dağıtımı ve sıralanması kararlarının işlerin tamamlanma zamanları üzerine büyük etkisi olması nedeniyle bu çalışmalarda genellikle erkenlik, gecikme, son işin tamamlanma zamanı gibi zamana bağlı amaç fonksiyonlarının dikkate alındığı görülmektedir. Son işin tamamlanma zamanı amaç fonksiyonu, hem tüm işlerin tamamlanma zamanını azaltırken hem de işlerin dengeli dağıtılmasına hizmet ettiğinden literatürde pek çok çizelgeleme çalışmasında benimsenmiştir.

Tablo 1

Çapraz Sevkiyatta Kapı Atama Problemini Konu Alan Çalışmalar

Çalışma	S	E	EM	M	W	Amaç	Çözüm Yöntemi
Tarhini, Yunis ve Chamseddine 2016		✓				taşıma mesafesi	SS
Oh, Hwang, Cha ve Lee 2006		✓				taşıma mesafesi	MINLP, H, GA
Gelareh, Glover, Guemri, Hanafi, Nduwayo ve Todosijević 2020		✓				taşıma maliyeti	MILP
Enderer, Contardo ve Contreras 2017		✓				toplam maliyet	MILP, CG
Escudero, Garín ve Unzueta 2024		✓				taşıma maliyeti	MILP, H
Nassief, Contreras ve As' Ad 2016		✓				taşıma maliyeti	MILP, LR
Nassief, Contreras ve Jaumard 2018		✓				taşıma maliyeti	MILP, CG
Wang ve Alidaee 2019		✓				taşıma maliyeti	MILP, TS
Zhang, Gong, Chen, Gu, Yuan ve Zhang 2019		✓				taşıma maliyeti	ACO
Essghaier, Allaoui ve Goncalves 2021		✓				toplam maliyet	FCP
Ghomi, Ghazi Nezami, Shokoohyar ve Ghofrani Esfahani 2023		✓				toplam maliyet	MINLP, TS, BLPF
Li, Hao ve Wu, 2024		✓				taşıma maliyeti	H
Konur ve Golias 2017		✓			✓	işgören maliyeti	GA
Wisittipanich ve Hengmeechai 2015	✓	✓				erkenlik ve gecikme	MILP, MODE
Ozden ve Saricicek 2019	✓	✓				erkenlik ve gecikme	SA, TS
Acar, Yalcin ve Yankov 2012	✓	✓				boş süre	MINLP, H
Sayed, Contreras, Diaz ve Luna 2020	✓	✓				son işin tamamlanma zamanı	MILP, HA
Dondo ve Cerdá 2015	✓	✓				son işin tamamlanma zamanı, toplam maliyet	MILP

Çalışma	S	E	EM	M	W	Amaç	Çözüm Yöntemi
Gallo, Accorsi, Akkerman ve Manzini 2022	✓	✓				toplam maliyet	GA
Miao, Zhang, Lan ve Su 2019	✓	✓				toplam maliyet	MILP, GA
Van Belle, Valckenaers, Berghe ve Cattrysse 2013	✓	✓				taşıma süresi ve gecikme	MILP, TS
Tadumatzte ve diğ. 2019	✓	✓			✓	akış süresi veya dakiklik	MILP, H
Monemi, Gelareh, Maculan ve Chen, 2024	✓	✓				son işin tamamlanma zamanı	DF
Li ve diğ. 2020	✓		✓			işlem süresi	GA, HA
Rijal ve diğ. 2019	✓		✓			toplam maliyet	ALNS
Xi ve diğ. 2020	✓		✓			toplam maliyet ve çıkışma sayısı	CCG
Hermel ve diğ. 2016	✓			✓		son işin tamamlanma zamanı	FSSA
Monemi ve diğ., 2023	✓			✓		toplam maliyet	DK
Monemi, Gelareh ve Maculan, 2024	✓			✓		toplam maliyet	DF, VNS
Bu çalışma	✓			✓	✓	son işin tamamlanma zamanı	MILP

ACO: Karınca Kolonisi Algoritması, ALNS: Uyarlanmış Büyük Komşuluk Arama Algoritması, BLPF: Eniyi Yerel Nokta Bulucu Algoritma, CCG: Sütun ve Kısıt Türetme Algoritması, CG: Sütun Türetme Algoritması, DF: Dal-Fiyat Algoritması, DK: Dal-Kesme Algoritması, E: Tahsisli, EM: Tahsisli-Karma, FCP: Bulanık Şans Kısıtlı Programlama, FSSA: Dört Aşamalı Çözüm Yöntemi, GA: Genetik Algoritma, H: Sezgisel Algoritma, HA: Melez Algoritma, LR: Lagrange Gevşetmesi, M: Karma, MINLP: Karma Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama, MILP: Karma Tamsayı Doğrusal Programlama, MODE: Çok Amaçlı Diferansiyel Evrim Algoritması, S: Çizelgeleme, SA: Tavlama Benzetimi, SS: Dağıtk Arama, TS: Yasaklı Arama, VNS: Değişken Komşu Arama, W: İşgören.

Çalışmalara kapı tipleri açısından bakıldığında çoğunun kapıların tahsisli olduğu durumu ele aldığı göze çarpmaktadır. Sadece üç çalışmada (Li, Tang, MuRong ve Sun, 2020; Rijal, Bijvank ve de Koster, 2019; Xi, Changchun, Yuan ve Hay, 2020) kapıların bir kısmının tahsisli bir kısmının karma olduğu durum ele alınırken yine sadece üç çalışmada (Hermel, Hasheminia, Adler ve Fry, 2016, Monemi, Gelareh ve Maculan, 2023, Monemi, Gelareh ve Maculan, 2024) tüm kapıların karma hizmet verebildiği durum incelenmiştir. Kapıların karma hizmet verdiği durumun, tahsisli duruma kıyasla, taşımaları ve buna bağlı olarak tamamlanma zamanlarını azaltma potansiyeline rağmen literatürde nadir ele alınmış olması dikkat çekicidir.

Çapraz sevkiyatta kapı atama problemini ele alan çalışmaların sadece ikisinde (Konur ve Golias, 2017; Tadumadze, Boysen, Emde ve Weidinger, 2019) işçiler dikkate alınmıştır. Konur ve Golias (2017), bir çapraz sevkiyat sisteminde giden kamyonların yüklenmesi için kapı atama problemini incelemiştir. Çalışmalarında, kamyon yükleme süresi, yükleme kapısına atanan işçi sayısına bağlıdır. Hem kapılara atanacak işçi sayısını hem de kamyonları birlikte belirlemek için doğrusal olmayan bir tamsayı programlama modeli ve bir genetik algoritma önerilmiştir. Tadumatze ve diğ. (2019), gelen kamyonlar için bütünlük kamyon ve işgücü çizelgeleme problemini ele almıştır. Ele alınan problem için iki farklı MILP modeli önerilmiştir. Amaç fonksiyonu birinci model için toplam akış süresini, ikinci model için ise kayıp sevkiyatların ağırlıklı toplamını enküçükmektir. Büyük ölçekli problemlerin çözümü için sezgisel bir algoritma da önerilmiştir.

Tablo 1'den görülebileceği gibi hem karma kapıları hem de işçi atamalarını birlikte dikkate alan çalışma yoktur. Bu çalışmada ilk defa işçi atamalarının ve karma kapıların dikkate alındığı bütünlük çapraz sevkiyat kapı atama ve kamyon çizelgeleme problemi ele alınmıştır.

Çalışmanın izleyen bölümlerinde sırasıyla, problem tanımı ve önerilen matematiksel model, deneysel sonuçlar ve sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. Problem Tanımı ve Önerilen Matematiksel Model

Ele alınan problemde, bir çapraz sevkiyat sistemine gelen ve giden olmak üzere iki tip kamyon vardır. Gelen kamyonlar, giden kamyonlara aktarılacak ürünleri taşımaktadır. Bir giden kamyon, birden fazla gelen kamyonun yük alabileceği gibi bir gelen kamyon da birden fazla giden kamyon için yük taşıyabilir. Her gelen kamyonun giden kamyonların hangilerine ne kadar yük aktarılacağı önceden belirlidir. Her kamyonun mutlaka bir kapıya atanması ve eğer o kapıya birden fazla kamyon atanmış ise hizmet sırasının belirlenmesi gerekmektedir. Kamyonların boşaltma/yükleme hizmetini almak için hazır olma zamanı vardır. Ayrıca bir giden kamyonun yüklenmesine başlayabilmek için bu kamyonun yük

taşıyan tüm gelen kamyonların boşaltma işlemlerinin tamamlanmış ve taşımaların yapılmış olması gerekir.

Yükleme ve boşaltma yapmak üzere kapılara atanabilecek toplam işçi sayısı sabittir. Bir kapıya birden fazla işçi atanması mümkündür. Yükleme ve boşaltma işlemlerinin süreleri, ilgili kapıya atanan işçi sayısına bağlıdır. Kapılar önceden yükleme ve boşaltma işlemlerine tahsis edilmemiştir. Tüm kapılar karma hizmet verebilmektedirler.

Bir gelen kamyonun hizmet alımının tamamlanma zamanı, yüklerinin boşaltılmasının tamamlandığı zamandır. Bir giden kamyonun hizmet alımının tamamlanabilmesi için ise tüm yüklerinin gelen kamyonlardan boşaltılması, kamyonun atandığı kapıya taşınması ve kamyonu yüklenmesi gerekir. Problemin amacı, en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesidir.

Önerilen matematiksel modelin (M-karma) indisleri, parametreleri, karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

M-karma:

kümeler:

$I = \{1, 2, \dots, \alpha\}$ kapı kümesi
 $K = \{1, 2, \dots, \beta\}$ kamyon kümesi
 $W = \{1, 2, \dots, \delta\}$ işçi sayısı kümesi

indisler:

$i, j \in I$ kapı indisleri
 $k, l \in K$ kamyon indisleri
 $o, n \in K$ sıra indisleri
 $w \in W$ işçi sayısı indisi

parametreler:

α : kapı sayısı
 β : kamyon sayısı
 δ : bir kapıya atanabilecek en fazla işçi sayısı
 g : toplam işçi sayısı
 q_k : kamyon k 'nın tipi (0, gelen; 1, giden)
 r_k : kamyon k 'nın hazır olma zamanı
 t_{ij} : kapı i ve kapı j arasındaki birim taşıma süresi

u_w : w adet işçi ile birim yük boşaltma süresi

a_w : w adet işçi ile birim yük yükleme süresi

b_{kl} : kamyon k 'dan kamyon l 'ye taşınacak yük miktarı

s_k : kamyon k 'dan boşaltılacak toplam yük miktarı ($s_k = \sum_l b_{kl}$)

h_l : kamyon l 'ye yüklenecek toplam yük miktarı ($h_l = \sum_k b_{kl}$)

p_{kw} : kamyon k 'nın w adet işçi ile işlem süresi (kamyon tipine göre boşaltma ya da yükleme süresi)

$$p_{kw} = \begin{cases} s_k u_w & q_k = 0 \\ h_k a_w & q_k = 1 \end{cases} \quad (1)$$

M : yeterince büyük pozitif sayı. $M = \sum_k p_{k1}$

karar değişkenleri:

x_{kio} : kamyon k , kapı i 'nin o . sırasına atandıysa, 1; atanmadıysa, 0.

y_{iw} : kapı i 'ye w adet işçi atandıysa, 1; atanmadıysa, 0.

C_k : kamyon k 'nın işleminin tamamlanma zamanı.

e_k : kamyon k 'nın işlemine başlama zamanı.

C_{enb} : en büyük tamamlanma zamanı.

amaç fonksiyonu:

$$enk \ z = C_{enb} \quad (2)$$

kısıtlar:

$$\sum_i \sum_o x_{kio} = 1 \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_k x_{kio} \leq 1 \quad \forall i, o \quad (4)$$

$$\sum_o o x_{kio} \leq \sum_o o x_{lio} + \beta \left(2 - \sum_o x_{kio} - \sum_o x_{lio} \right) \quad \forall i, \forall k, \forall l, b_{kl} > 0 \quad (5)$$

$$\sum_w y_{iw} \leq 1 \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_k \sum_o x_{kio} \leq \beta \sum_w y_{iw} \quad \forall i \quad (7)$$

$$\sum_k x_{kio} - \sum_l x_{li(o-1)} \leq 0 \quad \forall i, o \quad o > 1 \quad (8)$$

$$C_k \geq r_k + p_{kw} - M(2 - x_{kio} - y_{iw}) \quad \forall k, \forall i, o = 1, \forall w \quad (9)$$

$$C_k \geq C_l + p_{kw} - M(3 - x_{li(o-1)} - x_{kio} - y_{iw}) \quad \forall k, \forall l, \forall i, o > 1, \forall w \quad (10)$$

$$C_k \geq r_k + p_{kw} - M(3 - x_{li(o-1)} - x_{kio} - y_{iw}) \quad \forall k, \forall l, \forall i, o > 1, \forall w \quad (11)$$

$$C_l \geq C_k + t_{ij} b_{kl} + p_{lw} - M(3 - \sum_o x_{kio} - \sum_o x_{ljo} - y_{jw}) \quad (12)$$

$\forall k | q_l = 1, \forall i, \forall j, \forall l | b_{kl} > 0, \forall w$

$$e_k \leq C_k - p_{kw} + M \left(2 - \sum_o x_{kio} - y_{iw} \right) \quad \forall i, \forall k, \forall w \quad (13)$$

$$e_k \geq C_k - p_{kw} - M \left(2 - \sum_o x_{kio} - y_{iw} \right) \quad \forall i, \forall k, \forall w \quad (14)$$

$$e_l \geq C_k \quad \forall k, \forall l | b_{kl} > 0 \quad (15)$$

$$C_{enb} \geq C_k \quad \forall k \quad (16)$$

$$\sum_i \sum_w w y_{iw} \leq g \quad (17)$$

$$x_{kio} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall k, \forall o \quad (18)$$

$$y_{iw} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall w \quad (19)$$

$$C_k, e_k \geq 0 \quad \forall k \quad (20)$$

$$C_{enb} \geq 0 \quad (21)$$

Amaç (2) en büyük tamamlanma zamanının (C_{enb}) enküçüklenmesidir. (3) numaralı kısıt grubu, her kamyonun bir kapının bir sırasına atanmasını garanti eder. (4) numaralı kısıt grubu, bir kapının bir sırasına en fazla bir kamyon atanmasını sağlar. (5) numaralı kısıt grubu, aynı kapıya atanan kamyon k 'dan kamyon l 'ye yük aktarılacaksa kamyon k 'nın işlem sırasının kamyon l 'den küçük olmasını garanti eder. (6) numaralı kısıt grubu, her kapıya $[1, \delta]$ aralığında işçi atanmasını sağlar. (7) numaralı kısıt grubu, işçi atanmayan (açılmayan) kapılara kamyon atanmasını engeller. (8) numaralı kısıt grubu, sıra atlanmamasını sağlar. (9)-(12) numaralı kısıt grupları, kamyonların tamamlanma zamanlarının hesaplanması içindir. (13)-(14) numaralı kısıt grupları, kamyonların yükleme/boşaltma işlemlerinin başlama zamanlarını hesaplar. (15) numaralı

kısıt grubu, kamyon k 'dan kamyon l 'ye yük aktarılacaksa kamyon k 'nın boşaltma işlemi tamamlanmadan kamyon l 'nin yükleme işlemine başlanmasını engeller. (16) numaralı kısıt grubu, en büyük tamamlanma zamanını hesaplar. (17) numaralı kısıt, tüm kapılara atanacak toplam işçi sayısını sınırlandırır. (18)-(21) ise karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

Önerilen M-karma modelinin literatüre katkısını ortaya koyabilmek için kullanılacak olan kapıların karma hizmet veremediği ve yükleme ve boşaltma işlemlerine önceden tahsis edildiği ayrıca kapılara sabit sayıda işçi atandığı M-tahsisli modeli tariflenmiştir.

M-tahsisli modelinde işçi sayıları önceden belirli olduğundan y_{iw} karar değişkenine ihtiyaç yoktur. Bu nedenle y_{iw} değişkenini içeren M-karma modelinin (6), (7) ve (17) numaralı kısıtlarının M-tahsisli modelinde yer almasına gerek yoktur. Ayrıca p_{kw} parametresi w indisi çıkarılarak p_k olarak güncellenmiştir. Bu bağlamda (9)-(14) numaralı kısıtlar revize edilmiştir. M-karma modelindeki (3) numaralı kısıt yerine (22) ve (23) numaralı kısıtlar yazılarak gelen kamyonların önceden tahsis edilmiş boşaltma kapılarına, giden kamyonların ise önceden tahsis edilmiş yükleme kapılarına atanmaları garanti edilmiştir. M-tahsisli modelinde hem gelen hem de giden kamyonların aynı kapıya atanması mümkün olmadığından M-karma modelindeki kısıt (5)'e gerek yoktur. M-tahsisli modeli aşağıda verilmiştir.

M-tahsisli:

(2), (4), (8), (15), (16), (18), (20), (21)

$$\sum_{i|i \leq \frac{\alpha}{2}} \sum_o x_{kio} = 1 \quad \forall k | q_k = 0 \quad (22)$$

$$\sum_{i|i > \frac{\alpha}{2}} \sum_o x_{kio} = 1 \quad \forall k | q_k = 1 \quad (23)$$

$$C_k \geq r_k + p_k - M(1 - x_{kio}) \quad \forall k, \forall i, o = 1 \quad (24)$$

$$C_k \geq C_l + p_k - M(2 - x_{li(o-1)} - x_{kio}) \quad \forall k, \forall l, \forall i, o > 1 \quad (25)$$

$$C_k \geq r_k + p_k - M(2 - x_{li(o-1)} - x_{kio}) \quad \forall k, \forall l, \forall i, o > 1 \quad (26)$$

$$C_l \geq C_k + t_{ij}b_{kl} + p_l - M(2 - \sum_o x_{kio} - \sum_o x_{ljo}) \quad (27)$$

$$\forall k | q_l = 1, \forall i, \forall j, \forall l | b_{kl} > 0$$

$$e_k \leq C_k - p_k + M \left(1 - \sum_o x_{kio} \right) \quad \forall i, \forall k \quad (28)$$

$$e_k \geq C_k - p_k - M \left(1 - \sum_o x_{kio} \right) \quad \forall i, \forall k \quad (29)$$

3. Deneysel Sonuçlar

Tüm testler Intel Core i9 CPU 3.60GHz işlemci ve 32 GB belleğe sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. Test problemlerinin önerilen matematiksel model ile çözümünde GAMS 45.2.0 yazılımının Cplex çözücüsü kullanılmıştır. Bu bölümün alt başlıklarında örnek problem, test problemleri ve test sonuçları sunulmuştur.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3.1. Örnek Problem

Örnek problemde 4 kapı ve 8 kamyon vardır. İlk 4 kamyon gelen, diğerleri giden kamyonudur. Bir kapıya en fazla 5 işçi atanabilmektedir. Toplam işçi sayısı (g) 12'dir. Problem parametreleri sırasıyla Tablo 2, 3, 4 ve 5'te verilmiştir.

Tablo 2

r_k, s_k ve h_k Parametrelerinin Değerleri								
k	1	2	3	4	5	6	7	8
r_k	0	8	10	6	21	11	14	10
s_k	48	73	90	31	0	0	0	0
h_k	0	0	0	0	57	91	52	42

Tablo 3

u_w ve a_w Parametresinin Değerleri					
w	1	2	3	4	5
u_w	9	6	4	3	2
a_w	11	8	6	4	3

Tablo 4

 t_{ij} Parametresinin Değerleri ($\alpha = 4$)

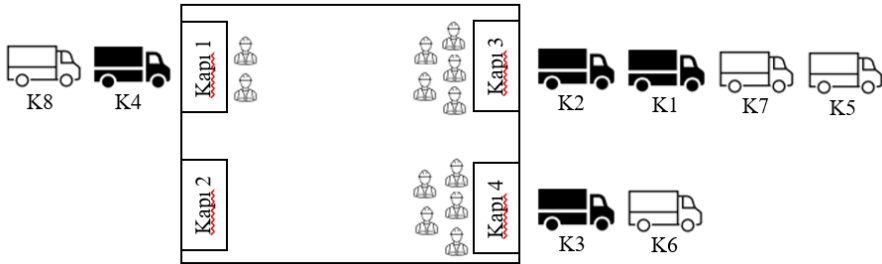
i/j	1	2	3	4
1	0	1	2	3
2	1	0	3	2
3	2	3	0	1
4	3	2	1	0

Tablo 5

 b_{kl} Parametresinin Değerleri

k/l	5	6	7	8
1	26	-	22	-
2	-	41	-	32
3	-	50	30	10
4	31	-	-	-

Örnek problem, öncelikle tüm kamyonların tüm kapılara atanabildiği durum için geliştirilen matematiksel model (M-karma) ile çözülmüştür. Eniyi amaç fonksiyonu değeri, 153 sn.'de 577 olarak bulunmuştur. Elde edilen kamyon-kapı atamaları ve kamyon sıraları Şekil 1'de, her kamyonun işlemine başlama ve tamamlanma zamanları ise Tablo 6'da verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi kapı 2 açılmamış, diğer kapılar ise karma yani hem gelen hem de giden kamyonlara hizmet vermiştir. Kapı 1'e 2 adet işçi, 3 ve 4'e ise 5'er işçi atanmıştır.



Şekil 1. Örnek Problemin Eniyi Çözümü

Tablo 6

 e_k ve C_k Karar Değişkenlerinin Değerleri

k	e_k	C_k
1	154	250
2	8	154
3	10	190
4	6	192
5	406	577
6	195	468
7	250	406
8	220	556

Aynı problem, işçi sayılarının tüm kapılar için sabit alındığı ve boşaltma ve yükleme kapılarının önceden belirlendiği M-tahsisli modeli ile de çözülmüştür. Toplam işçi sayısının tüm kapılara eşit dağıtıldığı varsayılmıştır. 8 saniye içinde eniyi çözüme ulaşılmıştır. Eniyi amaç fonksiyonu değeri 1153 olarak elde edilmiştir. Elde edilen çözüm Tablo 7 ve 8'de verilmiştir.

Tablo 7

Kapı Atama Ve Kamyon Sıraları

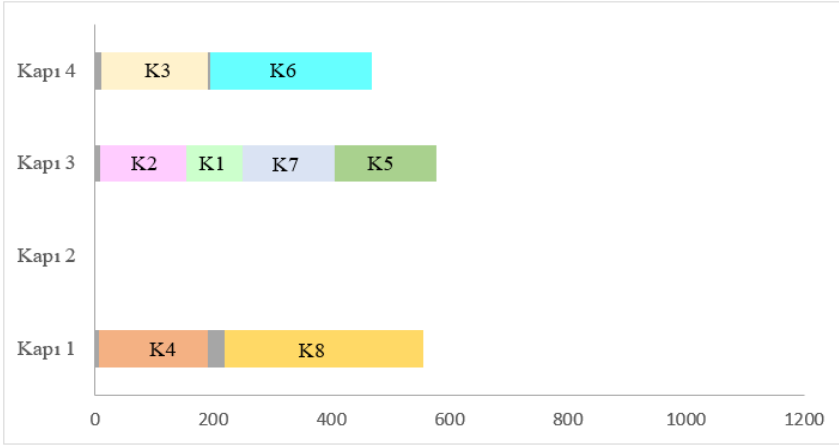
$kapı/sıra$	1	2	3
1	K4	K3	
2	K1	K2	
3	K6		
4	K5	K7	K8

Tablo 8

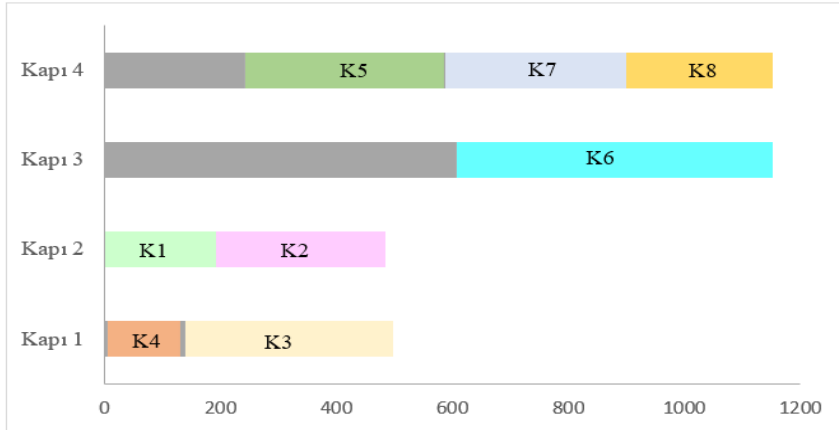
 e_k ve C_k Karar Değişkenlerinin Değerleri

k	e_k	C_k
1	0	192
2	192	484
3	139	499
4	6	130
5	244	586
6	607	1153
7	589	901
8	901	1153

Her iki model ile elde edilen eniyi amaç fonksiyonu değerleri incelendiğinde bu kadar küçük bir problemde bile %50 gibi çarpıcı bir iyileşme sağlandığı görülmektedir. M-karma modeli ile elde edilen sonuçlar Şekil 2’de, M-tahsisli modeli ile elde edilen sonuçlar ise Şekil 3’de verilen Gantt Şemalarında gösterilmiştir. Şekillerde beklemler gri renk ile işaretlenmiştir.



Şekil 2. M-Karma Modeli İle Elde Edilen Sonuçlar İçin Gantt Şeması



Şekil 3. M-Tahsisli Modeli İle Elde Edilen Sonuçlar İçin Gantt Şeması

Şekil 2 incelendiğinde M-karma modeli ile bir kapının açılmadığı ve açılan kapıların yüklerinin de dengeli dağıldığı görülmektedir. Ayrıca çok az bekleme gerçekleştiği göze çarpmaktadır. Öte yandan Şekil 3'te verilen M-tahsisli modeli ile elde edilen sonuçlar ile çizilen Gantt şeması incelendiğinde hem tüm kapıların açıldığı, hem de yüklerin dengesiz dağıldığı dikkat çekmektedir. Ayrıca yükleme kapılarında işleme başlanabilmesi için boşaltma kapılarındaki işlemlerin tamamlanması gerektiğinden yükleme kapılarında çok ciddi beklemlerin oluştuğu görülmektedir.

3.2. Test Problemleri

Önerilen modeli test etmek için Guignard ve ark. (2012)'nin çalışmasında önerilen yöntemle benzer şekilde türetilen test problemleri kullanılmıştır. Test problemlerinde kamyon sayısı (β) 8, 10 ve 12, kapı sayısı (α) 4 ve 6, bir kapiya atanabilecek en fazla işçi sayısı (δ) 5 olarak alınmıştır. Toplam işçi sayısı (g) (30) numaralı formülle hesaplanmıştır.

$$g = \left\lfloor \frac{\delta}{2} \right\rfloor \alpha \quad (30)$$

Kapılara atanan işçi sayılarının önceden bilinmesine gereksinim duyan M-tahsisli modeli için toplam işçi sayısının tüm kapılara eşit dağıtıldığı varsayılmıştır.

Kamyon k 'nin tipi (q_k) eğer $k \leq \frac{\beta}{2}$ ise 0'a eşittir. Eğer $k > \frac{\beta}{2}$ ise 1'e eşittir. Kamyon k 'nin hazır olma zamanı (r_k) $[0, 15]$ aralığında kesikli düzgün dağılıma uygun olarak rassal türetilmiştir. Kapılar arasındaki taşıma süreleri (t_{ij}) matrisi 4 kapı için Tablo 4'te ve 6 kapı için ise Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. t_{ij} Parametresinin Değerleri ($\alpha = 6$)

i/j	1	2	3	4	5	6
1	0	1	2	2	3	4
2	1	0	1	3	2	3
3	2	1	0	4	3	2
4	2	3	4	0	1	2
5	3	2	3	1	0	1
6	4	3	2	2	1	0

Bir işçi ile birim yük boşaltma (u_1) ve yükleme (a_1) süreleri sırasıyla 9 ve 11 olarak alınmıştır. İki veya daha fazla işçi ($w>1$) için ise ilgili süreler sırasıyla (31) ve (32) numaralı formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$u_w = 0,7 u_{w-1} \quad (31)$$

$$a_w = 0,7 a_{w-1} \quad (32)$$

Kamyon k 'dan kamyon l 'ye taşınacak yük miktarı (b_{kl}) [10, 50] aralığında kesikli düzgün dağılıma uygun olarak rassal türetilmiştir. b_{kl} parametresi türetilirken, matrisin en az %25'inin 0'dan farklı değer alması, her gelen kamyonun en az bir giden kamyonu yük gönderilmesi ve her giden kamyonu da en az bir gelen kamyonun yük gelmesi garanti edilmiştir.

3.3. Test Sonuçları

Türetilen test problemleri M-tahsisli ve M-karma modelleri ile 108000 saniye süre limiti ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 10 dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde problem isimleri, sonraki iki bölümde sırasıyla her bir test probleminin M-tahsisli ve M-karma modelleri ile çözümü sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri (z), Cplex çözücüsü ile elde edilen alt sınır (as), alt sınıra uzaklık yüzdesi (gap) ve saniye cinsinden çözüm süresi (süre) verilmiştir. gap değerleri denklem (33)'de verilen formülle hesaplanmıştır.

$$gap = \frac{z - as}{as} \quad (33)$$

Tablonun son bölümünde ise kapılara atanacak işçi sayılarının model tarafından belirlenmesinin ve kapıların karma modda hizmet vermesinin katkısını ortaya koyabilmek için tahsisli model ile elde edilen çözümün karma model ile ne kadar iyileştirildiği yüzde olarak verilmiştir. % iyileşme değerleri (34) numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%iyileşme = \frac{z_{tahsisli} - z_{karma}}{z_{tahsisli}} 100 \quad (34)$$

Tablo 10'dan da görülebileceği gibi 8 kamyonlu problemlerin tamamında hem M-tahsisli hem de M-karma modelleri ile eniyi çözüme ulaşılmıştır. Kamyon sayısı arttıkça gap değerleri de büyümüş, M-karma modeli daha zor bir model olduğundan %94'e ulaşan gap değerleri ortaya çıkmıştır. Elde edilen amaç fonksiyonu değerleri incelendiğinde, kapıların hem gelen hem giden kamyonlara hizmet verebildiği ve kapılara atanması gereken en iyi işçi sayılarının da model

tarafından belirlendiği M-karma modelinin, son işin tamamlanma zamanını M-tahsisli modeline kıyasla ortalama %52 daha azalttığı tespit edilmiştir. Bu başarının M-karma modeli sonuçlarındaki daha yüksek *gap* değerlerine rağmen elde edilebilmiş olması da ayrıca dikkat çekicidir.

Tablo 10
Test Sonuçları

<i>problem</i>	<i>M-tahsisli</i>				<i>M-karma</i>				<i>% iyileşme</i>
	<i>z</i>	<i>as</i>	<i>gap</i>	<i>süre</i>	<i>z</i>	<i>as</i>	<i>gap</i>	<i>süre</i>	
8-4-1	1311	1311	0	12	686	686	0	1763	48
8-4-2	1188	1188	0	24	560	560	0	290	53
8-4-3	1311	1311	0	27	615	615	0	488	53
8-4-4	1040	1040	0	29	529	529	0	633	49
8-4-5	1183	1183	0	11	621	621	0	336	48
8-6-1	1254	1254	0	25	598	598	0	1691	52
8-6-2	920	920	0	22	423	423	0	610	54
8-6-3	938	938	0	7	427	427	0	563	54
8-6-4	553	553	0	18	274	274	0	1040	50
8-6-5	1150	1150	0	17	531	531	0	825	54
10-4-1	1589	1589	0	25653	786	786	0	63932	51
10-4-2	1367	1367	0	1755	656	656	0	34041	52
10-4-3	1413	1413	0	4810	669	669	0	81343	53
10-4-4	1042	1042	0	24326	512	512	0	38117	51
10-4-5	1083	1083	0	1207	505	505	0	6480	53
10-6-1	1064	836	0,21	108000	481	415	0,14	108000	55
10-6-2	1120	1120	0	7535	515	491	0,05	108000	54
10-6-3	1157	1157	0	1183	545	545	0	50209	53
10-6-4	852	852	0	1393	395	395	0	66290	54
10-6-5	1125	1094	0,03	108000	505	505	0	25167	55
12-4-1	1383	882	0,36	108000	689	399	0,42	108000	50
12-4-2	1379	1047	0,24	108000	704	465	0,34	108000	49
12-4-3	1570	1198	0,24	108000	787	552	0,30	108000	50
12-4-4	1584	974	0,39	108000	777	457	0,41	108000	51
12-4-5	1756	1116	0,36	108000	901	512	0,43	108000	49
12-6-1	1104	955	0,13	108000	520	32.34	0,94	108000	53
12-6-2	1194	1194	0	64754	573	82.86	0,86	108000	52
12-6-3	1526	1479	0,03	108000	700	468	0,33	108000	54
12-6-4	1017	1017	0	43078	468	135	0,71	108000	54
12-6-5	1356	1079	0,20	108000	654	115	0,82	108000	52

M-karma modeli ile elde edilen çözümlere ait ayrıntılı sonuçlar Tablo 11’de verilmiştir. Tablo iki ana bölümden oluşmaktadır. Sol bölümde 4 kapılı problemlere, sağ bölümde ise 6 kapılı problemlere ait değerler sunulmuştur. Her bölüm, kapı sayısı kadar sütundan oluşmaktadır ve her sütunda ‘*ilgili kapıya kaç işçi atandığı-kapının hizmet durumu*’ verilmiştir. Kapıların sadece gelen

kamyonlara hizmet verdiği durum 'I' ile, sadece giden kamyonlara hizmet verdiği durum 'O' ile ve karma hizmet verme durumu 'M' ile gösterilmiştir.

Tablo 11

M-Karma Modeli İle Elde Edilen Çözümlere Ait Ayrıntılı Sonuçlar

<i>problem</i>	1	2	3	4	<i>problem</i>	1	2	3	4	5	6
8-4-1	2-I	-	5-M	5-M	8-6-1	3-O	-	-	5-M	5-M	5-M
8-4-2	-	2-O	5-M	5-M	8-6-2	5-M	5-M	-	5-M	3-M	-
8-4-3	-	2-O	5-M	5-M	8-6-3	5-M	5-M	3-M	-	5-M	-
8-4-4	3-M	4-M	-	5-M	8-6-4	5-M	5-M	-	3-M	5-M	-
8-4-5	5-M	-	5-M	2-O	8-6-5	3-I	-	-	5-M	5-M	5-M
10-4-1	5-M	5-M	-	2-M	10-6-1	5-M	4-M	5-M	4-M	-	-
10-4-2	2-O	-	5-M	5-M	10-6-2	-	5-M	4-M	-	5-M	4-M
10-4-3	5-M	5-M	2-M	-	10-6-3	3-M	5-M	5-M	-	-	5-M
10-4-4	2-M	-	5-M	5-M	10-6-4	-	4-M	-	5-M	5-M	4-M
10-4-5	-	5-M	5-M	2-M	10-6-5	-	5-M	-	3-M	5-M	5-M
12-4-1	2-M	5-M	5-M	-	12-6-1	5-M	4-M	4-M	5-M	-	-
12-4-2	1-O	5-M	1-O	5-M	12-6-2	5-M	5-M	5-M	-	3-M	-
12-4-3	5-M	2-M	-	5-M	12-6-3	5-M	5-M	5-M	-	3-M	-
12-4-4	5-M	2-M	5-M	-	12-6-4	5-M	4-M	5-M	4-M	-	-
12-4-5	2-M	5-M	-	5-M	12-6-5	-	5-M	5-M	-	4-M	4-M

Tablo 11'den de görüldüğü gibi, tüm kapılara işçi ve kamyon atanmasının zorunlu olmadığı ve kapı modunun serbest bırakıldığı durumda bazı kapılar açılmamakta, onun yerine açılan kapılara daha çok işçi atanmakta ve kapılar çoğunlukla karma hizmet vermektedir.

Gerçek hayat uygulamalarında 108000 saniye çözüm süresi uygulanabilir olmayabilir. Bu nedenle tüm test problemleri önerilen M-karma modeli ile 600, 1800 ve 3600 saniye olmak üzere çok daha kısa süre limitleri ile çözülmüş ve elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin 108000 saniyede elde edilenlere ne kadar yaklaşabildiği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12'den de görülebileceği gibi 8 kamyonlu problemlerin tamamına 600 saniye gibi kısa süre içinde bile optimum çözümler bulunabilmektedir. Daha büyük boyutlu problemlere 600 saniye süre limiti içinde bulunan amaç fonksiyonu değerleri ise 108000 saniyede bulunanlara kıyasla sadece ortalama %3 kötüleşmiştir. Süre limiti arttıkça beklenildiği üzere çözüm kalitesi de artmıştır. Kötüleşme oranı 1800 saniyede ortalama %2'ye 3600 saniyede ise %1'e düşmüştür. Sonuç olarak önerilen matematiksel model ile 600 saniye içinde bile kaliteli çözümlere ulaşılabildiği gösterilmiştir.

Tablo 12
Çözüm Süresi Analizi

problem	süre limiti (sn.)				% fark		
	600	1800	3600	108000	$\frac{z_1 - z_4}{z_1}$	$\frac{z_2 - z_4}{z_2}$	$\frac{z_3 - z_4}{z_3}$
	z_1	z_2	z_3	z_4			
8-4-1	686	686	686	686	0	0	0
8-4-2	560	560	560	560	0	0	0
8-4-3	615	615	615	615	0	0	0
8-4-4	529	529	529	529	0	0	0
8-4-5	621	621	621	621	0	0	0
8-6-1	598	598	598	598	0	0	0
8-6-2	423	423	423	423	0	0	0
8-6-3	427	427	427	427	0	0	0
8-6-4	274	274	274	274	0	0	0
8-6-5	531	531	531	531	0	0	0
10-4-1	801	793	793	786	1,87	0,88	0,88
10-4-2	674	674	674	656	2,67	2,67	2,67
10-4-3	683	669	669	669	2,05	0	0
10-4-4	542	542	542	512	5,54	5,54	5,54
10-4-5	505	505	505	505	0	0	0
10-6-1	487	487	487	481	1,23	1,23	1,23
10-6-2	541	541	522	515	4,81	4,81	1,34
10-6-3	592	552	552	545	7,94	1,27	1,27
10-6-4	395	395	395	395	0	0	0
10-6-5	528	505	505	505	4,36	0	0
12-4-1	756	735	735	689	8,86	6,26	6,26
12-4-2	711	709	709	704	0,98	0,71	0,71
12-4-3	804	804	792	787	2,11	2,11	0,63
12-4-4	784	784	784	777	0,89	0,89	0,89
12-4-5	929	905	905	901	3,01	0,44	0,44
12-6-1	571	557	520	520	8,93	6,64	0,00
12-6-2	645	612	603	573	11,16	6,37	4,98
12-6-3	788	765	712	700	11,17	8,50	1,69
12-6-4	500	499	489	468	6,40	6,21	4,29
12-6-5	685	685	679	654	4,53	4,53	3,68
					2,95	1,97	1,22

Toplam işçi sayısının (g) amaç fonksiyonunun değerine etkisini inceleyebilmek amacıyla eniyi çözüme makul süre içinde ulaşılabilen 8 kamyonlu problemler farklı g değerleri ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 13'de verilmiştir. Yapılan testlerde üç farklı g değeri kullanılmıştır. Orta değer, (30) numaralı formülle hesaplanmıştır. İlk değer, orta değer %75'i, son değer ise %125'idir.

Tablo 13

Toplam İşçi Sayısı Analizi

problem	g=9		g=12		g=15		problem	g=14		g=18		g=23	
	z ₁	t ₁	z ₂	t ₂	z ₃	t ₃		z ₁	t ₁	z ₂	t ₂	z ₃	t ₃
8-4-1	821	371	686	1763	597	650	8-6-1	643	1635	598	1691	598	2140
8-4-2	717	305	560	290	471	185	8-6-2	458	798	423	610	375	254
8-4-3	776	923	615	488	490	130	8-6-3	495	750	427	563	427	811
8-4-4	635	469	529	633	409	211	8-6-4	283	1766	274	1040	274	658
8-4-5	764	308	621	336	492	494	8-6-5	558	818	531	825	531	2133

Tablo 13 incelendiğinde toplam işçi sayısı arttıkça amaç fonksiyonu değerinin iyileştiği görülmektedir. Bu iyileşme özellikle kapı sayısının az olduğu problemlerde daha belirgindir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada çapraz sevkiyatta kapı atama, kamyon çizelgeleme ve kapılara atanacak işçi sayılarının belirlenmesi problemleri bütünleşik olarak ele alınmıştır. Kapılar, kamyon tipinden bağımsız olarak tüm kamyonlara hizmet verebilmektedir. Kamyonların yükleme ve boşaltma süreleri, kapılara atanan işçi sayılarına bağlıdır. Bu problemin çözümü için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu, son işin tamamlanma zamanıdır. Kapıların karma olmasının ve işçi sayılarının model tarafından belirlenmesinin katkısını gösterebilmek amacıyla işçi sayılarının sabit olduğu ve kapıları sadece gelen ya da giden kamyonlara önceden tahsis edildiği durumu ele alan bir matematiksel model daha önerilmiştir. Rassal türetilen test problemleri her iki modelle de çözülerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Problemin bütünleşik yapısı problem boyutu arttıkça çözüm süresinin artmasına yol açtığından 12 kamyonlu problemler için elde edilen sonuçlarının tahmin edilen eniyi çözümden farkları %94'e kadar ulaşmıştır. Buna rağmen tüm problemler dikkate alındığında karma kapı ve kapılara farklı sayıda işçi atayabilme esnekliklerinin bu esnekliklerin olmadığı durum göre son işin tamamlanma zamanını ortalama %52 oranında iyileştirdiği belirlenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için meta sezgisel algoritma geliştirilebilir böylelikle son işin tamamlanma zamanını iyileştirme oranları daha da iyileştirilebilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Tuğba SARAÇ, çalışma fikrinin oluşturulması, literatürün taranması, matematiksel modelin geliştirilmesi, test problemlerinin çözülmesi ve makalenin yazılması; Feriştah ÖZÇELİK, çalışma fikrinin oluşturulması, literatürün taranması, matematiksel modelin geliştirilmesi, test problemlerinin çözülmesi ve makalenin yazılması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynakça

- Acar, K., Yalcin, A. ve Yankov, D. (2012). Robust door assignment in less-than-truckload terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 63(4), 729-738. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.04.008>
- Dondo, R. ve Cerdá, J. (2015). The heterogeneous vehicle routing and truck scheduling problem in a multi-door cross-dock system. *Computers & Chemical Engineering*, 76, 42-62. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.02.003>
- Enderer, F., Contardo, C. ve Contreras, I. (2017). Integrating dock-door assignment and vehicle routing with cross-docking. *Computers & Operations Research*, 88, 30-43. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.018>
- Escudero, L. F., Garín, M. A. ve Unzueta, A. (2024). On solving the cross-dock door assignment problem. *International Journal of Production Research*, 62(4), 1262-1276. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2180307>
- Essghaier, F., Allaoui, H. ve Goncalves, G. (2021). Truck to door assignment in a shared cross-dock under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 182, 114889. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114889>
- Gallo, A., Accorsi, R., Akkerman, R. ve Manzini, R. (2022). Scheduling cross-docking operations under uncertainty: A stochastic genetic algorithm based on scenarios tree. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 11, 100095. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2022.100095>
- Gelareh, S., Glover, F., Guemri, O., Hanafi, S., Nduwayo, P. ve Todosijević, R. (2020). A comparative study of formulations for a cross-dock door assignment problem. *Omega*, 91, 102015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.004>
- Ghomi, V., Ghazi Nezami, F., Shokoohyar, S. ve Ghofrani Esfahani, M. (2023). An optimization model for forklift utilisation and congestion control in cross-docking terminals. *International Journal of Systems Science: Operations &*

Logistics, 10(1), 2142463. Doi: <https://doi.org/10.1080/23302674.2022.2142463>

Guignard, M., Hahn, P.M., Pessoa, A.A. ve da Silva, D.C. (2012). Algorithms for the cross-dock door assignment problem. *Proceedings of the Fourth International Workshop on Model-Based Metaheuristics*, Rio de Janeiro, Brazil.

Hermel, D., Hashemina, H., Adler, N. ve Fry, M. J. (2016). A solution framework for the multi-mode resource-constrained cross-dock scheduling problem. *Omega*, 59, 157-170. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.06.002>

Konur, D. ve Goliás, M. M. (2017). Loading Time Flexibility in Cross-docking Systems. *Procedia Computer Science*, 114, 491-498. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.011>

Li, Y., Tang, R. Y., MuRong, L. W. ve Sun, Q. (2020). Collaborative Optimization of Dock Door Assignment and Vehicle Scheduling in Cross-Docking. *Journal of the Operations Research Society of China*, 8, 493-514. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40305-019-00266-9>

Li, M., Hao, J. K. ve Wu, Q. (2024). A flow based formulation and a reinforcement learning based strategic oscillation for cross-dock door assignment. *European Journal of Operational Research*, 312(2), 473-492. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.014>

Miao, Z., Zhang, J., Lan, Y. ve Su, R. (2019). A two-stage genetic algorithm for the truck-door assignment problem with limited capacity vehicles and storage area. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 28, 285-298. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11518-019-5410-3>

Monemi, R. N., Gelareh, S. ve Maculan, N. (2023). A machine learning based branch-cut-and-Benders for dock assignment and truck scheduling problem in cross-docks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 178, 103263. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103263>

Monemi, R. N., Gelareh, S. ve Maculan, N. (2024). Solution algorithms for dock scheduling and truck sequencing in cross-docks: A neural branch-and-price and a metaheuristic. *Computers & Operations Research*, 167, 106604. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106604>

Monemi, R. N., Gelareh, S., Maculan, N. ve Chen, W. K. (2024). A neural branch-and-price for truck scheduling in cross-docks. *Science China Mathematics*, 67, 1341-1358. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11425-024-2301-9>

Nassief, W., Contreras, I. ve As' Ad, R. (2016). A mixed-integer programming formulation and Lagrangean relaxation for the cross-dock door assignment problem. *International Journal of Production Research*, 54(2), 494-508. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.1003664>

- Nassief, W., Contreras, I. ve Jaumard, B. (2018). A comparison of formulations and relaxations for cross-dock door assignment problems. *Computers & Operations Research*, 94, 76-88. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.01.022>
- Oh, Y., Hwang, H., Cha, C. N. ve Lee, S. (2006). A dock-door assignment problem for the Korean mail distribution center. *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 288-296. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.02.009>
- Ozden, G. ve Saricicek, I. (2019). Scheduling trucks in a multi-door cross-docking system with time windows. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 67(2). Doi: <https://doi.org/10.24425/bpas.2019.128113>
- Rijal, A., Bijvank, M. ve de Koster, R. (2019). Integrated scheduling and assignment of trucks at unit-load cross-dock terminals with mixed service mode dock doors. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 752-771. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.04.028>
- Sayed, S. I., Contreras, I., Diaz, J. A. ve Luna, D. E. (2020). Integrated cross-dock door assignment and truck scheduling with handling times. *Top*, 28, 705-727. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11750-020-00556-z>
- Tadumadze, G., Boysen, N., Emde, S. ve Weidinger, F. (2019). Integrated truck and workforce scheduling to accelerate the unloading of trucks. *European Journal of Operational Research*, 278(1), 343-362. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.04.024>
- Tarhini, A. A., Yunis, M. M. ve Chamseddine, M. (2016). Natural optimization algorithms for the cross-dock door assignment problem. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 17(8), 2324-2333. Doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2519104>
- Van Belle, J., Valckenaers, P., Berghe, G. V. ve Cattrysse, D. (2013). A tabu search approach to the truck scheduling problem with multiple docks and time windows. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 818-826. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.024>
- Wang, H. ve Alidaee, B. (2019). The multi-floor cross-dock door assignment problem: Rising challenges for the new trend in logistics industry. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 132, 30-47. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.10.006>
- Wisittipanich, W. ve Hengmeechai, P. (2015). A multi-objective differential evolution for just-in-time door assignment and truck scheduling in multi-door cross docking problems. *Industrial Engineering and Management Systems*, 14(3), 299-311. Doi: <http://dx.doi.org/10.7232/iems.2015.14.3.299>
- Xi, X., Changchun, L., Yuan, W. ve Hay, L. L. (2020). Two-stage conflict robust optimization models for cross-dock truck scheduling problem under

uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 144, 102123. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102123>

Zhang, Y. H., Gong, Y. J., Chen, W. N., Gu, T. L., Yuan, H. Q. ve Zhang, J. (2019). A dual-colony ant algorithm for the receiving and shipping door assignments in cross-docks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(7), 2523-2539. Doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2867577>