



Journal of Turkish Operations Management

Bir sipariş toplama deposunda iş birlikçi robot hızının çıktı performansı üzerindeki etkisi

Mahmut Tutam^{1*}

¹Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum

e-mail: mahmut.tutam@erzurum.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-2018-5458>

*Sorumlu Yazar

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi:

Geliş: 01.03.2023
Revize: 05.08.2023
Kabul: 09.08.2023

Anahtar Kelimeler:

Toplama listesi büyüklüğü,
Kolaboratif robot,
Optimal rotalama,
Optimal iş birliği stratejisi,
Optimal kolaboratif robot hızı

Özet

Sipariş toplama operasyonları depolarda en fazla maliyet ve iş yükü oluşturan aktivitelerden birisidir. Son yıllarda, sipariş toplayıcıların iş yükünün azaltılması ve performanslarının artırılması için depolarda kolaboratif sipariş toplama sistemleri daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Kolaboratif bir sipariş toplama sisteminde, kolaboratif robot bir sipariş toplayıcı tarafından sürülebilmekte veya sipariş toplama noktaları arasında yürüyen sipariş toplayıcının yanı sıra otonom olarak hareket edebilmektedir. Kolaboratif sistemin yaygınlaşması ile kolaboratif robot hızının sipariş toplama operasyonlarının çıktı performansına etkisi ne kadardır? ve bu etki farklı toplama liste büyüklükleri için nasıl değişmektedir? gibi araştırma soruları ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma kolaboratif robot kullanılan bir sipariş toplama deposunda robot hızının çıktı performansına etkisini araştırmak amacıyla bir tamsayı programlama modeli oluşturmayı ve çeşitli sipariş listesi büyüklükleri için geliştirilen modeli çözmeyi hedeflemektedir. Optimizasyon modelinin amacı bir toplama listesindeki tüm lokasyonları kapsayan tur süresini minimize etmektir. Ayrıca, sipariş lokasyonları arasındaki mesafeye bağlı olarak sipariş toplayıcının kolaboratif robotun yanında yürümesi veya kolaboratif robotu sürmesi için optimal strateji belirlenmiştir. Dahası, hız artışının kazalara yol açtığı dikkate alınarak optimizasyon modeline hız artışı için bir zaman cezası eklenmiştir. Son olarak, rastgele toplama listeleri oluşturmak için Monte Carlo simülasyonu kullanılmış ve Dinamik Programlama kullanılarak optimizasyon modeli çözülmüştür. Çalışmanın sonucunda, toplama listesi büyüklüğüne bağlı olarak robot hızının optimize edilmesiyle çıktı performansının %60,7'ye kadar artırılabileceği gösterilmiştir.

The impact of collaborative robot speed on the throughput performance in an order-picking warehouse

Article Info

Article History:

Received: 01.03.2023
Revised: 05.08.2023
Accepted: 09.08.2023

Keywords:

Pick-list size,
Collaborative robot,
Optimal routing,
Optimal collaboration
strategy,
Optimal collaborative robot
speed.

Abstract

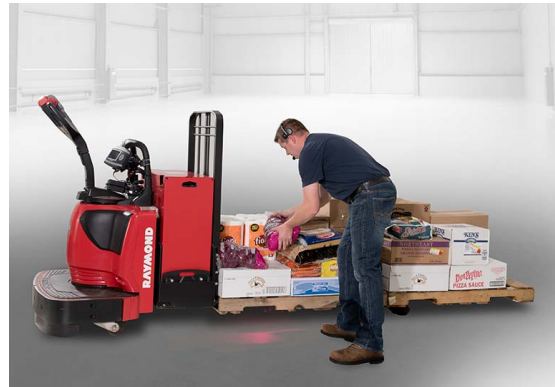
Order-picking operations are one of the most costly and labor-intensive activities in warehouses. In recent years, collaborative order-picking systems have been used increasingly in warehouses to reduce order pickers' workloads and increase their performances. In a collaborative order-picking system, the collaborative robot can be ridden by an order picker or move autonomously alongside the order picker walking between pick locations. The widespread use of collaborative systems raises research questions, such as how much the collaborative robot speed affects the throughput performance of order-picking operations and how this effect changes for different pick-list sizes. Therefore, this study aims to develop an integer programming model to investigate the impact of the robot speed on the throughput capacity in an order-picking warehouse using collaborative robots and to solve the model developed for various pick-list sizes. The objective of the optimization model is to minimize the total tour time covering all locations in a pick-list. Moreover, the optimal strategy to walk along or ride the robot for the order-picker is determined, depending on the distance between the pick locations. Considering the speed increase leads to accidents, a time penalty for the speed increase is added to the optimization model. Eventually, Monte Carlo simulation is used to generate pick-lists randomly, and the optimization model is solved by using Dynamic Programming. As a result of the study, it is shown that the throughput performance can be increased up to 60.7 by optimizing the robot speed depending on the pick-list size.

1. Giriş

Son yıllarda dünya genelinde yaşanan sosyolojik, ekonomik ve teknolojik gelişmeler insanların alışkanlıklarını ciddi bir şekilde değiştirmektedir. Özellikle, teknolojik gelişmeler neticesinde internet kullanım oranının artması ile bireyler çevrimdışı ortamlar yerine çevrimiçi ortamlarda daha fazla vakit geçirmektedirler. Nihayetinde, yapay zekaya sahip sanal asistanların ve sohbet robotlarının kullanımıyla tüketiciler online alışverişe daha fazla yönelmiş ve pandeminin etkisiyle bu yönelimde ciddi bir artış olmuştur. Ticaret Bakanlığı tarafından yayınlanan e-ticaret verilerine göre 2019 yılında %9,80 olan e-ticaretin genel ticaret içerisindeki payı 2020 yılında % 15,70'e çıkmış ve 2021 yılının ilk altı ayında % 17,60'a yükselmiştir (E-ticaret bilgi platformu, 2021). Bireylerin online alışverişe yönelimleri birçok alanda olduğu gibi tedarik zinciri ve lojistik sistemlerinde de ciddi değişimlere sebep olmuştur. Özellikle, insanların çalışma kapasitesinin kısıtlı kalması ve son yıllarda sensör ile bilgi teknolojilerindeki hızlı gelişmeler neticesinde daha fazla otomatik, otonom veya robotik sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Ne var ki, otomatik, otonom veya robotik sistem tasarımlarının insanlar kadar esnek olmaması sebebiyle (her farklı bir görev için farklı materyal veya bilgi gerekebilir) bu tür sistemlerin her işte kullanılması fikrinin sürdürülebilir olmadığı anlaşılmış; böylece, sıkıcı ve sürekli tekrar eden işlerde çalışan insanlara yardımcı olabilecek kolaboratif (işbirlikçi) sistemler daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır.

Tedarik zinciri ve lojistik sistemlerinde sürekli tekrar eden en önemli işlemlerden birisi depolarda gerçekleştirilen sipariş toplama operasyonlarıdır. Sipariş toplama operasyonlarında sipariş toplayıcılar gün boyunca müşterilerin siparişlerini içeren toplama listelerinde bulunan ürünleri depolardan toplamaktadırlar. Depolarda gerçekleştirilen faaliyetler için harcanan zamanın %55'ini oluşturan sipariş toplama operasyonları, toplam faaliyetler içerisindeki oranın %20 ile %50 arasında değiştiği (Tompkins vd., 2010) ve toplam iş gücü maliyetlerinin %40-60'ını oluşturduğu tahmin edilmektedir (Miller, 2004). Dahası, depo tasarımının veya operasyonların optimize edilmesi ile bu maliyetlerin %10 ile %30 arasında azaltılabileceği belirlenmiştir (Bartholdi ve Hackman, 2019). Son yıllarda sipariş verilen ürün boyutlarındaki azalmanın yanı sıra ürün sayısındaki ciddi artış göz önüne alındığında sipariş toplama operasyonlarının depolama faaliyetleri içerisindeki öneminin daha da arttığı görülmektedir.

2000'li yıllara kadar sıklıkla kullanılan Manuel Sipariş Toplama (MST) sistemlerinde genellikle sipariş toplayıcı toplama listelerindeki siparişleri toplamak için gün boyunca bir sipariş toplama aracını iterek veya çekerek depo içerisinde dolaşmaktadır (bakınız Şekil 1.a). Bu hem sipariş toplayıcının toplama kapasitesini ciddi bir şekilde kısıtlamakta hem de gün boyunca gezmek zorunda kalan sipariş toplayıcılar için ciddi ergonomik riskler barındırmaktadır. Diğer taraftan, son yıllarda sipariş toplayıcıların kapasitesini artırmak için binilebilir trans palet içeren Araçla Sipariş Toplama (AST) sistemleri yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (bakınız Şekil 1.b). Böylece, siparişler arasındaki mesafelerin yürünmesi yerine aracın kullanılması ile sipariş toplama operasyonları daha hızlı bir hale gelmiş ve gün içerisinde toplanan sipariş sayısı artırılmıştır. Ne var ki, AST sistemleri uzun mesafelerde sipariş toplayıcının fazladan yürümesini engellese dahi sürekli araca inip binmek zorunda olan sipariş toplayıcının dizlerine ek yük getirmiştir. Nihayetinde, günde 1200 kere araca inip binmek (Crown Equipment Corporation, 2013) zorunda kalan sipariş toplayıcıların kapasitesi artsa dahi dizlerinde oluşan baskı daha da artmıştır.



Şekil 1. Sipariş toplama sistemleri a) MST sistemi (UNEX Manufacturing, 2023) ve b) AST sistemi (Carolina Handling, 2023)

MST sistemindeki kapasite kısıtı ve AST sistemindeki ergonomik problemlerin farkında olan robotik sistem üreticileri son birkaç yıl içerisinde daha da yaygınlaşan insan-robot iş birliği düşüncesi temelinde Kolaboratif Sipariş Toplama (KST) sistemi önerisinde bulunmuşlardır. KST sisteminde eğer iki toplama noktası arasındaki mesafe uzunsa sipariş toplayıcı araca binmekte ve bir sonraki toplama lokasyonuna kadar aracı kullanmaktadır

(bakınız Şekil 2.a). Diğer taraftan, eğer iki toplama noktası arasındaki mesafe kısaysa sipariş toplayıcı bu mesafeyi yürümekte ve otonom olarak hareket edebilen araç bir sonraki toplama lokasyonuna kendi başına ulaşmaktadır (bakınız Şekil 2.b).



Şekil 2. Kolaboratif Sipariş Toplama sisteminde a) sürüş ve b) yürüyüş durumları (Crown Equipment Corporation, 2013)

MST ve AST sistemlerinin performanslarını optimize etmek için literatürde onlarca çalışma yapılmış ve çeşitli toplama ve rotalama stratejileri önerilmiştir (De Koster vd., 2007; Jaghbeer vd., 2020; Masae vd., 2020; Tuna ve Tunçel, 2012; Van Gils vd., 2018; Yener ve Yazgan, 2019). MST ve AST sistemleri için çözülen klasik sipariş toplama problemlerinden farklı olarak KST sisteminde toplama noktaları arasındaki stratejinin belirlenmesi gerekmektedir. Diğer taraftan, klasik sipariş toplama problemlerinin çoğunda sipariş toplayıcıların hızlarının sabit olduğu varsayılmakta ve sipariş toplayıcının hızının sistem performansı üzerindeki etkisi çok fazla irdelenmemektedir. Önceki çalışmalardan farklı olarak bu makalede KST sisteminde kolaboratif robot hızının çıktı performansı üzerindeki etkisi araştırılmaktadır.

KST sisteminde toplama listesi büyüklüğü hem rotanın hem de toplama noktaları arasındaki stratejinin belirlenmesinde önem arz etmektedir. Örneğin, toplama listesinin küçük olması durumunda, her bir toplama koridorunda toplanması gereken sipariş sayısı az olduğundan tüm koridorlar dolaşılmayacak ve toplama noktaları arasındaki mesafe uzun olacağı için sipariş toplayıcının kolaboratif robotu sürmesi tercih edilecektir. Diğer taraftan, toplama listesinin büyük olması durumunda, her bir toplama koridorunda toplanması gereken sipariş sayısı fazla olduğundan toplama noktaları arasındaki mesafe kısa olacak ve sipariş toplayıcının kolaboratif robotu sürmesi yerine toplama noktaları arasında yürümesi tercih edilecektir.

KST sisteminin çıktı performansı toplama listesinde bulunan tüm siparişlerin toplanması için gerekli süre temelinde değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmenin yapılabilmesi için optimal rota ve toplama noktaları arasındaki optimal stratejiyi belirleyen bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Dahası, sistem çıktı performansını artırmasına rağmen kolaboratif robot hızındaki artışın iş kazalarını artıracak düşüncesi temelinde kolaboratif robot hızı modele yansıtılmıştır. Oluşturulan optimizasyon modeli, farklı toplama listesi büyüklükleri için Monte Carlo simülasyonu temelinde türetilen data setleri için çözülmüştür. Böylece, kolaboratif robot hızının sistem çıktı performansına ne kadar etki ettiği gösterilmiştir.

Makalenin bundan sonraki bölümünde sipariş toplama operasyonları üzerine yapılan önceki çalışmalar verilmiş ve yapılan çalışmanın literatüre katkısı belirtilmiştir. Üçüncü bölümde optimizasyon modelinde kullanılan notasyon ve model detayları açıklanmıştır. Pratikte kullanılan parametre değerleri temelinde çözülen optimizasyon modeli sonuçları dördüncü bölümde paylaşılmaktadır. Yapılan çalışma ve sonuçları son bölümde özetlenerek, gelecekte yapılabilecek çalışma önerilerinde bulunulmuştur.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Sipariş toplama ile alakalı farklı problem tanım ve çözüm önerileri için literatürde onlarca çalışma bulunmasına rağmen, bu makale kolaboratif robot hızının KST sisteminin çıktı performansı üzerindeki etkisine odaklandığı için sipariş toplayıcı hızını temel alan çalışmalar temelinde literatür sınırlandırılmıştır.

Petersen (1999) MST ve AST sistemlerinin performanslarını farklı depolama politikaları ile çeşitli rotalama stratejileri için değerlendirmiştir. Dahası, sipariş toplayıcının hızının ve toplama listesi büyüklüğünün depolama politikaları ve rotalama stratejileri üzerindeki etkisini göstermiştir. Motmans (2012) on dakika boyunca forklift süren beş sipariş toplayıcının maruz kaldığı vücut titreşimini ölçmüştür. Dahası, sürüş yüzeyinin, sürüş hızının ve koltuk süspansiyonunun vücut titreşimine etkisini araştırmıştır. Vücut titreşiminin sürüş yüzeyinin iyileştirilmesi ile %39, sürüş hızının azaltılması ile %26 ve koltuk süspansiyonunun iyileştirilmesi ile %22 azaltılabileceği hesaplanmıştır.

Hong vd. (2013) geniş veya dar bir koridordaki bir toplama lokasyonundan birden fazla siparişin alınması gerektiği durumda sipariş toplayıcıların birbirlerini engellemesini değerlendirmek için analitik modeller geliştirmişlerdir. Markov zinciri temelinde sınırlayıcı iki farklı yürüyüş hızını (birim yürüyüş zamanı ve ani yürüyüş zamanı) düşünülmüş ve bir toplama lokasyonundaki maksimum alınması gereken farklı sipariş sayıları için sipariş toplama yoğunluğunun nasıl toplayıcıların birbirini engellemesini etkilediği deneysel sonuçlar temelinde gösterilmiştir. Hong (2014) bir m hızıyla yürüyen iki işçinin birbirini geçmesine müsaade etmeyen dairesel bir sistem için kapalı formda modeller geliştirmiş ve geliştirilen modeller simülasyon modelleri ile doğrulanmıştır. İşçilerin birbirini engellemesinin yürüyüş hızıyla, toplanan siparişin ağırlığıyla ve toplama lokasyonu sayısı ile ilişkili olduğunu belirlemişlerdir. Hong vd. (2015) bir yükleme ve bir boşaltma istasyonu bulunan lineer bir sipariş toplama sisteminde (bucket brigade vorder picking system) sipariş toplayıcıların hızını toplama yoğunluğuna göre değerlendirmişlerdir. İşçilerin hızlarına bağlı olarak sistemde sıralandırılmalarının birbirlerini engellemelerini azaltacağı gösterilmiştir.

Çelik ve Süral (2016) sipariş toplama aracı kullanılan depolarda araçların koridor değiştirirken yavaşlamaları sebebiyle sipariş toplama performansını negatif bir şekilde etkilediğini belirtmişlerdir. Sadece seyahat süresinin minimize edilmesinin amaçlandığı optimizasyon modellerinden farklı olarak seyahat süresine ilaveten koridorlar arası geçiş süresinin minimize edildiği çok amaçlı bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Geliştirdikleri algoritmalarla Pareto analizini kolayca yapabildiklerini göstermişler ve algoritmaların pratikte kullanılan sezgisele kıyasla daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir.

Hong (2019) iki sipariş toplayıcı bulunan bir lineer sipariş toplama sisteminde akış ve süreç içi çalışma süreleri ile sistem çıktısı olmak üzere üç farklı performans göstergesini değerlendirmiş ve bu performans göstergelerinin sınırlayıcı özelliklerini analiz etmiştir. Rojanapitoon ve Teeravaraprug (2020) sipariş toplayıcıların koridorlarda araçla seyahat ederken koridorlardaki trafiğe bağlı olarak hızlarını ayarladıklarını belirtmişler ve deponun trafik haritasını kullanarak optimal rotanın oluşturulması için çok amaçlı bir matematiksel model önermişlerdir. Önceki çalışmalara kıyasla sıkışık rotalardan %50 oranında sakınarak zamanda %44'e ve enerjide %17'ye kadar iyileştirme sağlanabileceğini göstermişlerdir. Zhang vd. (2021) hız ile kalite arasındaki mübadelenin önemli olduğunu ve bu iki performans metriğinin dengelenmesi için stratejilerin oluşturulması gerektiğini belirtmişlerdir. Gerçek data temelinde yaptıkları çalışmanın sonucunda, yöneticilerin sipariş toplayıcılardan aldıkları geri bildirimleri kullanarak hem hızlı hem de hatasız bir sipariş toplama stratejisi oluşturabileceklerini belirtmişlerdir. Macedo vd. (2021) sipariş toplama araç sayısı ve hızları temelinde sipariş toplama operasyonlarını analiz edecek simülasyon tabanlı bir karar destek sistemi önermişlerdir.

Al-Araidah vd. (2021) vücut kitlesi ve yürüyüş hızının bayan sipariş toplayıcıların sipariş toplama performansları ve metabolik enerji tüketimleri üzerine araştırmalarını yapmışlardır. Monte Carlo simülasyonu temelinde yaptıkları çalışma neticesinde özellikle normalin üzerinde bulunan vücut kitlesinin ve yürüyüş hızının sipariş toplama performansında ve metabolik enerji tüketiminde önemli olduğunu göstermişlerdir. Goeke ve Schneider (2021) sipariş toplayıcı ve toplama aracının eşleştirilmesiyle sipariş toplayıcının hız ve kapasitesine bağlı olarak maliyette ciddi tasarruf sağlanabileceği belirtmişlerdir. Boz ve Aras (2022) gerçek bir depo tasarımı temelinde dört farklı rotalama stratejisini karşılaştırmışlardır. Yaptıkları analiz sonucunda pratikte sıklıkla uygulanan rotalama stratejisinin en kötü sonuçlar ortaya çıkardığı sonucuna varmışlardır. Chen vd. (2022) sipariş toplama probleminin optimum çözelmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Bölgesel toplama (zone picking) yapılan sipariş toplama operasyonlarında bölgeler arası taşıma, hazırlık süresi ve farklı araç hızlarını değerlendirmişlerdir. Sipariş toplama operasyon maliyetleri ve geç kalma sürelerinin minimize etmek için geliştirdikleri karma-tamsayı optimizasyon modelinin çözümü için iki-aşamalı bir yinelenen arama algoritması geliştirmişlerdir. Son olarak, Tutam (2024) KST sistemi kullanılan depoların optimal tasarımlarını bulmak için iki seviyeli bir programlama modeli önermiştir. Yapılan analiz sonucunda optimal depo tasarımının sipariş toplama listesi büyüklüğüne bağlı olduğu gösterilmiştir.

3. Optimizasyon modeli

Bu bölümde kolaboratif robot hızının KST sisteminin çıktı performansı üzerindeki etkisini ölçmek için gerçek sistem gözlemlerine uygun olarak aşağıda verilen varsayımlar temelinde optimizasyon modeli oluşturulmuştur.

- Siparişlerin toplanmasına deponun en sol toplama koridorunun karşısında bulunan Kabul/Teslim (K/T) noktasından başlanmakta ve siparişler toplandıktan sonra yine bu noktada teslim edilmektedir (bakınız Şekil 3 ve 4). K/T noktasının başka bir lokasyonda olması durumunda optimizasyon modeli kolayca adapte edilebilir.
- Tüm koridorlar iki kolaboratif robotun yan yana geçişini sağlayabilecek kadar geniş olduğundan eş zamanlı olarak her iki yönde harekete izin verilmekte ve kolaboratif robotların bir birbirini engellemediği varsayılmaktadır. Dahası, koridorlar içerisinde gerekli hallerde kolaboratif robotun yönü değiştirilebilmektedir.

- Sipariş toplayıcı toplama koridorlarını kullanarak toplama lokasyonlarına ulaşmakta ve çapraz koridoru kullanılarak toplama koridorları arasında geçiş sağlamaktadır. Sipariş toplayıcının geçiş koridorlarında yürümesi izin verilmemekte, eğer iki toplama noktası farklı iki koridorda ise sipariş toplayıcı kolaboratif robotu sürmektedir.
- Sipariş toplayıcı toplama lokasyonlarına teker teker uğramakta, eğer bir toplama noktasından birden fazla sipariş alınması gerekiyorsa tek bir seferde siparişlerin alındığı varsayılmaktadır.
- Sipariş toplama aracının toplama listesinin büyüklüğüne bakılmaksızın tüm toplanacak siparişleri alacak kapasiteye sahip olduğu varsayılmaktadır.
- Siparişleri raftan alma veya araca bırakma zamanları tur süresini değiştirmeyeceği için göz ardı edilmiştir.
- Sipariş toplayıcının yürüyüş ve kolaboratif robotun sürüş hızlarındaki ivmelenme/yavaşlama gibi değişimler göz ardı edilmektedir.
- Sipariş toplayıcı aracı sürüyorsa uzaklık rektilineer olarak hesaplanmakta, yürümesi durumunda aracın durduğu lokasyondan toplama lokasyonuna direk gittiği varsayımıyla öklid uzaklık hesaplanmaktadır. Sipariş toplayıcının yürümesi durumunda kolaboratif robot doğrudan rektilineer uzaklık temelinde bir sonraki toplama noktasına hareket etmektedir.

Belirtilen varsayımlar temelinde, toplam tur uzunluğunu minimize etmek için oluşturulan optimizasyon modeli kullanılan küme, indis, parametre ve karar değişkenleriyle birlikte aşağıda verilmektedir.

Küme ve İndisler :

I = bir sipariş toplama listesindeki toplama noktaları kümesi (K/T noktası 0 değeri ile gösterilmektedir)

i, j = toplama noktası indisleri ($i, j \in I$)

Parametreler :

h_o = kolaboratif robot üreticisi tarafından belirtilen ortalama sürüş hızı (m/s)

h_k = kolaboratif robotun ortalama hızı (m/s)

$r_{i,j}$ = $i \in I$ toplama noktasından sonra sipariş toplayıcının kolaboratif robotu sürerek $j \in I$ toplama noktasındaki siparişi alması ve robota bırakılması için gerekli zaman (s)

$o_{i,j}$ = $i \in I$ toplama noktasından sonra sipariş toplayıcının yürüyerek $j \in I$ toplama noktasındaki siparişi alması ve robota bırakılması için gerekli zaman (s)

Karar Değişkenleri :

$x_{i,j}$ = 1, eğer kolaboratif robot $i, j \in I$ toplama noktaları arasında sürülürse;
0, aksi takdirde

$y_{i,j}$ = 1, eğer sipariş toplayıcı $i, j \in I$ toplama noktaları arasında yürürse;
0, aksi takdirde

u_i = bir sipariş listesi için oluşturulan turda $i \in I$ toplama noktasının ziyaret edilme sırası

Amaç Fonksiyonu :

$$\text{minimum} \quad \sum_{i \neq j, i \in I} \sum_{j \in I} \left[r_{i,j} x_{i,j} + o_{i,j} y_{i,j} + (h_o/h_k)^2 \right] \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i \neq j, i \in I} (x_{i,j} + y_{i,j}) = 1 \quad j \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \neq i, j \in I} (x_{i,j} + y_{i,j}) = 1 \quad i \in I \quad (3)$$

$$u_i - u_j + |I| (x_{i,j} + y_{i,j}) \leq |I| - 1 \quad i \neq j \text{ ve } i, j \in I \setminus \{0\} \quad (4)$$

$$1 \leq u_i \leq |I| - 1 \quad i \in I \setminus \{0\} \quad (5)$$

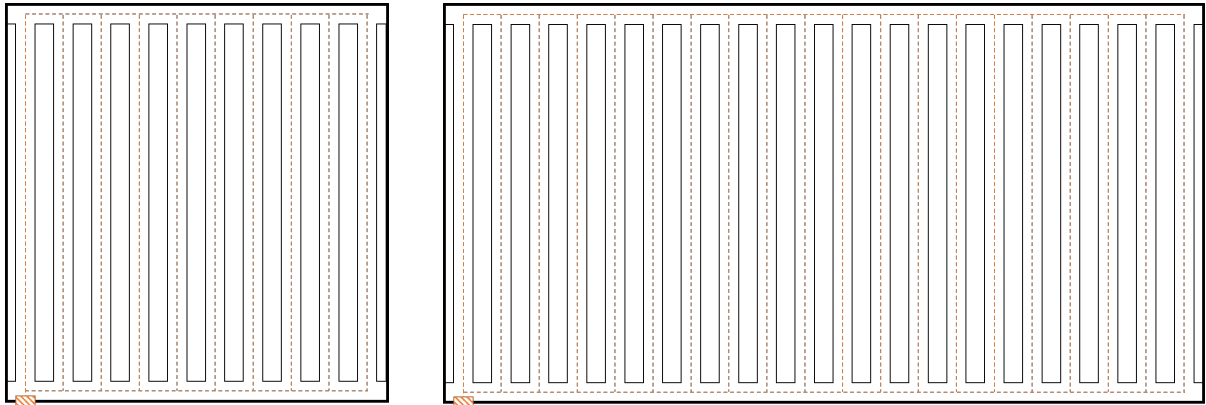
$$u_i \in Z \quad i \in I \setminus \{0\} \quad (6)$$

$$x_{i,j}, y_{i,j} \in \{0,1\} \quad i, j \in I \quad (7)$$

Yukarıda verilen optimizasyon modeli Gezgın Satıcı Problemi'nin (GSP) bir varyasyonu olarak oluşturulmuştur. GSP'den farklı olarak sipariş toplayıcı yürümeyi veya kolaboratif robotu sürmeyi seçebildiğinden iki farklı karar değişkeni tanımlanmıştır. Ayrıca, hız artışının kazalara yol açtığı dikkate alınarak optimizasyon modeline hız artışı için bir zaman cezası (bağıl hız değişiminin karesi ile kaza sayısı değişecektir) eklenmiştir (Nilsson, 2004). Böylece, bir toplama listesindeki tüm lokasyonları kapsayacak ve toplam tur uzunluğunu minimize edecek şekilde optimal rotanın ve stratejinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Dolayısıyla, Formül (1) kolaboratif robotun hızına ceza verilerek toplam tur uzunluğunun optimal toplama rotası ve optimal iş birliği stratejisi ile minimize edilmesini sağlamaktadır. GSP'de olduğu gibi sipariş toplayıcının bir toplama listesindeki tüm lokasyonlara sadece bir kez uğraması gerekmektedir. Bu yüzden, Formül (2) kısıtı optimizasyon modeline eklenerek her bir durak noktasına sadece bir durak noktasından ya kolaboratif robotu sürerek ya da yürüyerek varılması garanti edilmektedir. Benzer şekilde, Formül (3) modele ilave edilerek her bir durak noktasından sadece bir diğer durak noktasına ya kolaboratif robotu sürerek ya da yürüyerek varılması sağlanmaktadır. Formül (2) ve (3) optimizasyon modelinin çalışmasını sağlarken, çözümde birden fazla alt turun oluşmasına izin vermektedir. Bu da sadece bir turda tüm sipariş toplama lokasyonlarına uğranması gerekliliğini ihlal ettiğinden, Miller vd. (1960) tarafından geliştirilen alt tur eleme kısıtları modele ilave edilmiştir. Formüller (4-6) kullanılarak her bir toplama listesi için oluşturulan rotada alt turların oluşması engellenmiştir. Son olarak, Formül (7) ile karar değişkenlerinin 0 ve 1 değerlerini alması sağlanmaktadır.

4. Bulgular

Bir önceki bölümde verilen optimizasyon modeli depolarda kullanılan gerçek parametre değerleri temelinde çözülmüştür. Depoda siparişlerin bulunduğu toplama koridorlarının ve toplama koridorları arasında geçişin sağlandığı çapraz koridorların genişliklerinin 2,7 m olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, her bir raf derinliğinin 1,3 m olduğu düşünülerek iki toplama koridoru merkezleri arasındaki uzaklık 5,3 olarak hesaplanmıştır. Resim 3'te gösterildiği üzere depoda toplamda 10 veya 20 toplama koridorunun bulunduğu ve uzunluklarının 50 m olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla, iki farklı depolama alanı için hesaplamalar yapılmış ve alanlar $(5,3 \cdot 10) \cdot (50 + 2 \cdot 2,7) = 2936,2 \text{ m}^2$ veya $(5,3 \cdot 20) \cdot (50 + 2 \cdot 2,7) = 5872,4 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Toplama listesinin büyüklüğünün optimal rota ve iş birliği stratejilerini değiştireceği düşünülerek 5, 10, 20, 40, 80 ve 160 sipariş bulunduğu durumlar incelenmiştir. Kolaboratif robotun ilk hızının 2,3 m/s ve sipariş toplayıcının yürüme hızının 0,7 m/s olduğu kabul edilmiştir. Robot hızının çıktı performansı üzerindeki etkisini göstermek amacıyla hız değeri 0,7 m/s'den başlatılmış ve 0,14 m/s artırılarak 25 farklı hız değeri için hesaplamalar tekrar edilmiştir.

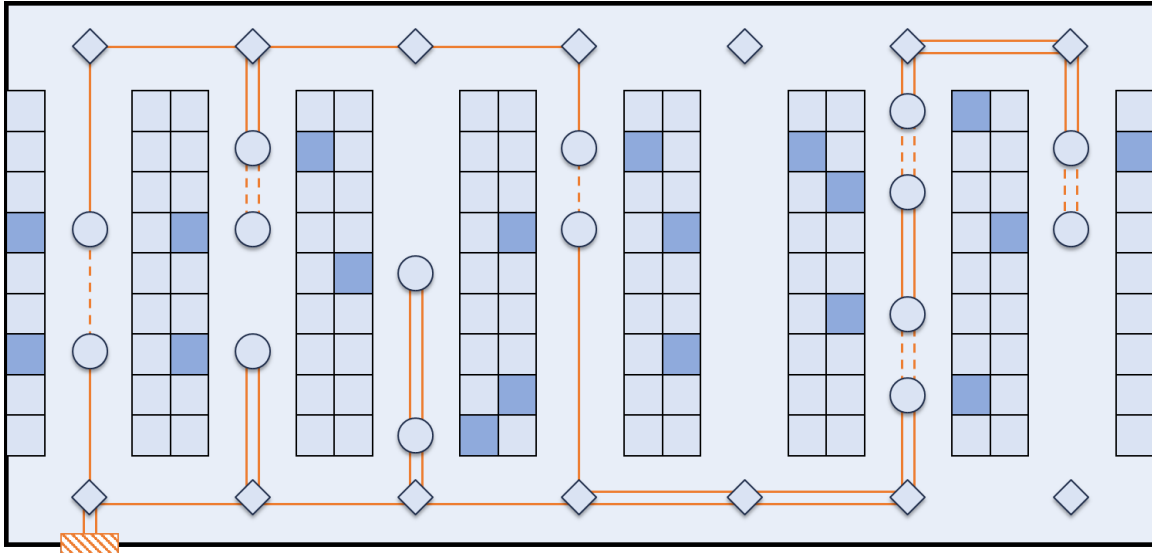


Şekil 3. Depo tasarımları

Oluşturulan optimizasyon modeli GSP'nin bir varyasyonu olduğundan NP-Zor bir problemdir. Model Matlab programında kodlanmış ve Gurobi programı çağrılarak problem çözdürülmüştür. Ne var ki, modelin büyük sipariş toplama listeleri (80 ve 160 sipariş) için makul bir zaman dilimi (120 dakika) içerisinde çözemediği gözlemlenmiştir. Bu yüzden, sonuçların elde edilmesi için Dinamik Programlama (DP) yöntemi kullanılmıştır. DP birbirini izleyen ve etkileşimli kararlardan oluşan bütünlük kararların alt karar modellerine dönüştürülerek çözülmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Eren Şenaras ve İnanç, 2018). Depolardaki rotalama problemi bütünlük bir karar olarak tanımlansa dahi depoların özel yapısı sebebiyle bu bütünlük kararın koridorlara bağlı alt kararlara nasıl dönüştürülebileceği Ratliff ve Rosenthal (1983) tarafından gösterilmiştir. Dahası, büyük sipariş toplama listeleri için çözüm süresinin koridor sayısına bağlı olarak lineer bir şekilde arttığını göstermişler ve 50 koridora sahip bir depoda bile çözüm süresinin sadece bir dakika olduğunu belirtmişlerdir.

DP uygulanırken durum, aşama ve aşamalar arası geçişler tanımlanmalıdır. Durum her bir koridorda alınacak kararları belirtmektedir ve her bir koridorda aşağıda belirtilen kararlar alınabilir (Ratliff ve Rosenthal, 1983).

- Eğer sipariş yoksa koridora girme (bakınız Şekil 4 – Koridor 5).
- Eğer bir veya daha fazla sipariş varsa koridorun bir ucundan gir ve diğer bir ucundan çık (bakınız Şekil 4 – Koridor 1 ve 4).
- Eğer bir veya daha fazla sipariş varsa koridorun bir ucundan diğer bir ucuna git ve geri dön (bakınız Şekil 4 – Koridor 6).
- Eğer bir veya daha fazla sipariş varsa koridorun alt ucundan gir ve siparişleri topladıktan sonra tekrar koridorun alt ucundan çık (bakınız Şekil 4 – Koridor 3).
- Eğer bir veya daha fazla sipariş varsa koridorun üst ucundan gir ve siparişleri topladıktan sonra tekrar koridorun üst ucundan çık (bakınız Şekil 4 – Koridor 7).
- Eğer iki veya daha fazla sipariş varsa sipariş noktaları arasındaki en büyük uzaklık bulunarak turdan çıkararak koridorun alt ve üst uçlarından girip geri dön (bakınız Şekil 4 – Koridor 2).



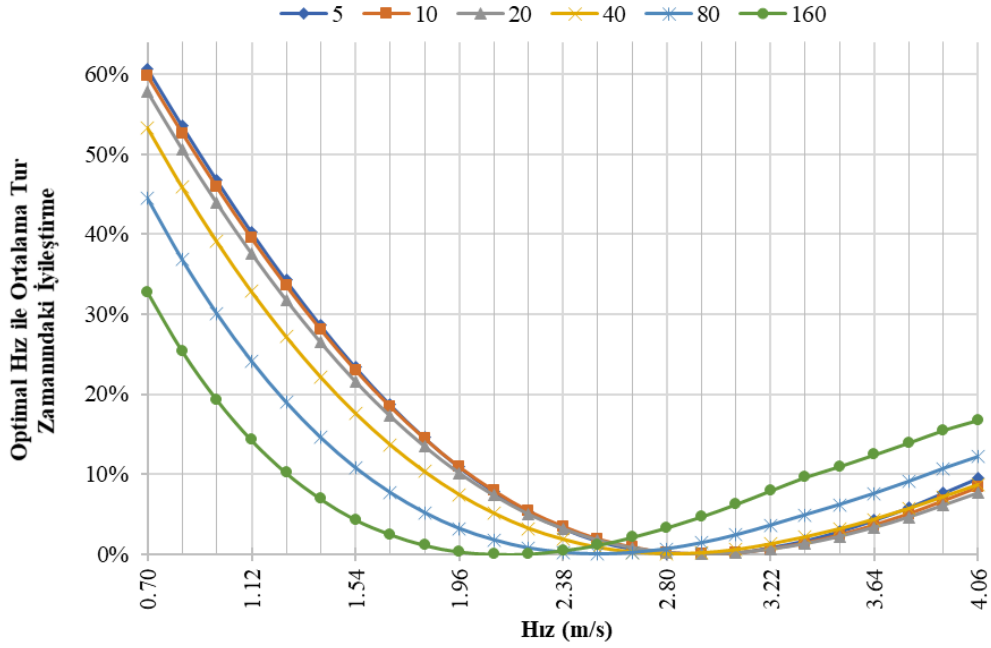
Şekil 4. Dinamik Programlama ile örnek bir rotanın oluşturulması (her bir koridorda alınabilecek kararların tamamını rota üzerinde göstermek amacıyla optimal rota verilmemiştir)

DP ile en kısa rotanın belirlenmesi için öncelikle her bir koridorda alınabilecek kararların (durumların) maliyetleri (zaman) hesaplanır (hesaplama yapılırken toplayıcının yürüdüğü ve kolaboratif robotu sürdüğü durumlar göz önünde bulundurulmaktadır). Koridorlar arası geçişler DP’de aşamalar arası geçişleri oluşturduğundan her bir koridor kendisinden sonraki koridora bağlanırken tüm uygun durumlar için hesaplamalar yapılır. İlk koridordan başlanarak en son koridora kadar aşamalar arası geçişlerin maliyetleri ilave edilerek her bir aşamadaki durumların maliyeti güncellenir. En son koridora ulaşıldığında en düşük maliyetli durum seçilir ve geriye doğru hesaplamalara bakılarak en kısa rota belirlenir. Yukarıda açıklanan DP modeli Delphi 10.4 Topluluk Sürümü kullanılarak kodlanmış ve küçük problemlerin (5, 10 ve 20 sipariş) sonuçları Matlab programının sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Sonuçlar Monte Carlo simülasyonu temelinde her bir araç hızı ve sipariş toplama listesi büyüklüğü için 1.000 kez tekrar edilerek oluşturulmuş ve ortalama değerleri verilmiştir. Ayrıca, her bir sipariş büyüklüğünün veya hızın replikasyonlarını doğru bir şekilde karşılaştırmak için ortak bir tohum (seed) değeri kullanılmıştır. Dolayısıyla toplamda $2 \times 25 \times 6 \times 1.000 = 300.000$ problem çözülerek sonuçlar hazırlanmıştır. Problemlerin çözümünde 64-bit Windows 10 işletim sistemine sahip, 8 GB RAM bulunan, 4 çekirdekli ve Intel i7-4790 3.60 GHz işlemcili bir bilgisayar kullanılarak elde edilmiştir. Herhangi bir sipariş büyüklüğü veya hız değeri için yapılan 1.000 tekrar için algoritma çalışma süresi maksimum 60 saniyedir.

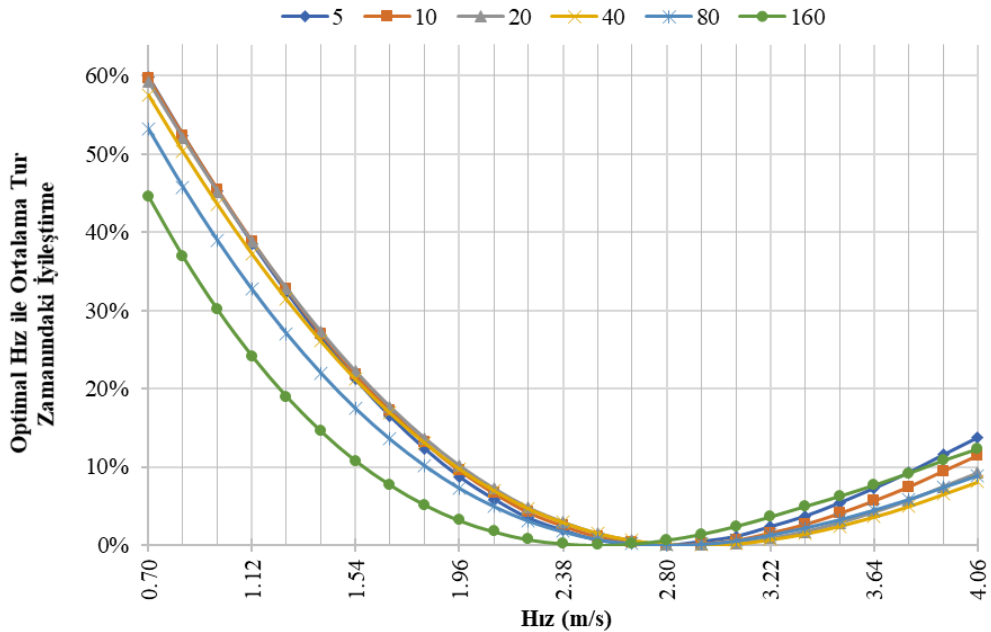
Şekil 5’te 10 toplama koridoruna sahip bir depo tasarımı için toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine göre optimal hızın ortalama tur zamanındaki iyileştirme yüzdeleri sunulmaktadır (detaylı ortalama tur süreleri ve iyileştirme oranları ek kısımdaki tablolarda verilmiştir). Toplama listesine bağlı olarak, kolaboratif robot için optimal hız değeri 2,10 ile 2,94 arasında değişmektedir. Sipariş toplama listesi büyüklüğü arttıkça optimal hız azalmaktadır. Bunun sebebi sipariş toplama noktasının fazla olması sebebiyle kolaboratif robot daha fazla durak noktasında durmakta ve böylece robotun ortalama hızında azalma gözlemlenmektedir. Hız değerleri aynı olsa dahi sipariş listesi boyutundaki artış iyileştirmeyi azaltmaktadır. Örneğin, hız değerinin 0,7 m/s olduğu durum göz önünde bulundurulduğunda, 5 sipariş için optimal hız değeri ile %60,73 iyileştirme sağlanabilirken, 10 sipariş için iyileştirme oranının %59,76’ya ve 20 sipariş için %57,86’ya düştüğü görülmektedir. Optimal hızın azaldığı daha

büyük listeler (40, 80 ve 160) için iyileştirme oranı daha da azalmaktadır. Tüm liste büyüklükleri için, optimal hız değerindeki 0,28 m/s değişimin ortalama tur zamanında maksimum %1,13 artışa sebep olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 10 koridorlu bir depo tasarımı için toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine göre optimal hız ile ortalama tur zamanındaki iyileştirme yüzdeleri

Benzer şekilde, 20 toplama koridorunun bulunduğu bir depo tasarımı için toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine göre optimal hızın ortalama tur zamanındaki iyileştirme yüzdeleri Şekil 6'da sunulmaktadır (detaylı ortalama tur süreleri ve iyileştirme oranları ek kısımdaki tablolarda verilmiştir). Toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine optimal kolaboratif robot hız değeri 2,52 ile 2,94 arasında değişmektedir. 10 koridorlu tasarıma kıyasla küçük liste büyüklükleri için optimal hız değerinin arttığı görülmektedir. Sipariş toplama listesi büyüklüğü arttıkça optimal kolaboratif robot hızı önce artmakta daha sonra azalmaktadır. Bunun sebebi koridor sayısının fazla olması sebebiyle sipariş sayısındaki 40'a kadar hız artışı ile süreç hızlandırılmakta, 40'tan fazla sipariş büyüklüklerinde sıklıkla duraklarda durulması gerektiği için optimal hızın zamanla azalması ile sonuçlanmaktadır. 10 koridorlu tasarıma benzer şekilde, hız değerleri aynı olsa dahi sipariş listesi boyutundaki artış iyileştirmeyi azaltmaktadır. Ayrıca, optimal hız değerindeki 0,28 m/s değişimin tüm liste büyüklükleri için ortalama tur zamanında maksimum %1,14 artışa sebep olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 20 koridorlu bir depo tasarımı için toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine göre optimal hız ile ortalama tur zamanındaki iyileştirme yüzdeleri

5. Sonuç ve değerlendirme

Son yıllarda dünya genelinde yaşanan gelişmeler neticesinde insanların alışveriş alışkanlıklarında ciddi değişimler meydana gelmiş ve online ortamlarda daha fazla vakit geçiren bireyler e-ticarete daha fazla yönelmişlerdir. Dahası, teknolojik gelişmeler ve tüm dünyayı etkisi altına alan pandemik hastalıkların etkisiyle online alışverişin toplam perakende sektörü içerisindeki payı ciddi bir şekilde artmıştır. Böylece, bir taraftan e-ticaret sektöründe faaliyet gösteren firma sayısını hızla artırırken, diğer taraftan her geçen gün firmalar arasındaki rekabetin artması ile sonuçlanmaktadır. Günün sonunda, müşterilere ürünlerini daha hızlı ulaştırarak memnuniyetlerini artırmayı ve böylece rakiplerinin önüne geçmeyi planlayan lojistik firmalar daha fazla teknolojik sistemlere yönelmiş ve daha fazla otomatik, otonom veya robotik sistemler kullanmaya başlamışlardır. Diğer taraftan, otomatik, otonom veya robotik sistemlerin insanlar kadar esnek olmaması sebebiyle, firmalar insanlarla aynı iş ortamında çalışabilecek ve onlara yardımcı olacak kolaboratif sistemlere yönelmişlerdir.

Bu makalede son yıllarda depolardaki sipariş toplama operasyonlarında sıklıkla kullanılmaya başlanan bir kolaboratif robotun hızı incelenmiş ve robot hızının sistem çıktı performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, sipariş toplayıcının kolaboratif robotun yanında yürümesi veya kolaboratif robotu sürmesi durumları göz önünde bulundurularak optimal strateji temelinde bir tamsayı programlama modeli kurulmuştur. Ayrıca, robot hız artışının daha fazla kazaya sebep olacağı düşüncesi temelinde optimizasyon modeline hız artışı için bir zaman cezası eklenmiştir. Monte Carlo simülasyonu temelinde oluşturulan sipariş toplama listeleri Dinamik Programlama kullanılarak çözülmüştür.

Toplama listesine bağlı olarak, kolaboratif robot için optimal hız değerinin 10 koridorlu depolarda 2,10 ile 2,94 ve 20 koridorlu depolarda 2,52 ile 2,94 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Küçük sipariş büyüklükleri için depodaki koridor sayısı arttıkça optimal hız değeri artmaktadır. Diğer taraftan, sipariş toplama listesi büyüklüğü arttıkça genellikle optimal hız azalmaktadır (koridor sayısının fazla olduğu durumlarda önce artmakta daha sonra azalmaktadır). Aynı hız değerleri için sipariş listesi boyutunun artması optimal hız değerinin ortalama tur süresindeki iyileştirmeyi azalttığı gözlemlenmiştir. Tüm liste büyüklükleri için, optimal hız değerindeki 0,28 m/s değişimin ortalama tur zamanında maksimum 10 koridorlu depolarda %1,13 ve 20 koridorlu depolarda %1,14 artışa sebep olduğu görülmektedir.

Bu çalışma rastgele depolama stratejisi temelinde yapılmıştır. Gelecek çalışma olarak, farklı depolama stratejileri (sınıf bazlı veya devir bazlı) incelenebilir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında sipariş toplama sürecinde her bir durak lokasyonundan tek bir ürün tipi alındığı varsayılmaktadır. Bazı durak lokasyonlarının atlanarak, birden fazla ürünün toplandığı duraklar için ayrıca bu çalışma genişletilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında incelenen Kolaboratif Sipariş Toplama sistemi ile alakalı değerli bilgi paylaşımı için Dr. René De Koster'a teşekkür ederiz. Ayrıca, makalenin geliştirilmesi için önerilerde bulunan hakemlere şükranlarımızı sunarız. Bu makale kapsamında yapılan çalışmalar TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel Teknolojik ve Araştırma Kurumu) tarafından 1059B191900637 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Sağlanan destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Al-Araidah, O., Okudan-Kremer, G., Gunay, E. E. ve Chu, C.-Y. (2021). A Monte Carlo simulation to estimate fatigue allowance for female order pickers in high traffic manual picking systems. *International Journal of Production Research*, 59(15), 4711–4722. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1770357>

Bartholdi, J. J. ve Hackman, S. T. (2019). *Warehouse & distribution science*: release 0.98.1. Atlanta, GA: Supply Chain and Logistics Institute. Erişim adresi: <http://warehouse-science.com>

Boz, E. ve Aras, N. (2022). Order picker routing problem in a single block warehouse. *Journal of Turkish Operations Management*, 6(1), 1113–1120. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jtom/issue/70951/1091208>

Carolina Handling. (2023). Increase Picking Accuracy. Boost Productivity. Erişim adresi: <https://www.carolinahandling.com/campaign/pick2pallet>

- Çelik, M. ve Süral, H. (2016). Order picking in a parallel-aisle warehouse with turn penalties. *International Journal of Production Research*, 54(14), 4340–4355. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1154624>
- Chen, W., Zhang, Y. ve Zhou, Y. (2022). Integrated scheduling of zone picking and vehicle routing problem with time windows in the front warehouse mode. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107823. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107823>
- Crown Equipment Corporation. (2013). Crown QuickPick™ Remote: [Order Picking Technology]: Productivity. Motivation. Safety. Retrieved from Order Picking Technology | QuickPick Remote | Crown Lift Trucks UK Erişim adresi: <https://www.crown.com/uk/forklifts/pdfs/brochures/order-picker-quickpick-remote-brochure-GB.pdf>
- De Koster, R., Le-Duc, T. ve Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481–501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- E-ticaret bilgi platformu. (2021). 2021 Yılı İlk Altı Ay E-Ticaret Verileri Açıklandı. Erişim adresi: <https://www.eticaret.gov.tr/istatistikler>
- Eren Şenaras, A. ve İnanç, Ş. (2018). Vba implementation via dynamic programming for agv line. *Journal of Life Economics*, 5(4), 255–264. <https://doi.org/10.15637/jlecon.273>
- Goeke, D. ve Schneider, M. (2021). Modeling Single-Picker Routing Problems in Classical and Modern Warehouses. *INFORMS Journal on Computing*, 33(2). <https://doi.org/10.1287/ijoc.2020.1040>
- Hong, S. (2014). Two-worker blocking congestion model with walk speed m in a no-passing circular passage system. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 687–696. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.013>
- Hong, S. (2019). A performance evaluation of bucket brigade order picking systems: Analytical and simulation approaches. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.037>
- Hong, S., Johnson, A. L. ve Peters, B. A. (2013). A note on picker blocking models in a parallel-aisle order picking system. *IIE Transactions*, 45(12), 1345–1355. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2012.745204>
- Hong, S., Johnson, A. L. ve Peters, B. A. (2015). Quantifying picker blocking in a bucket brigade order picking system. *International Journal of Production Economics*, 170, 862–873. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.04.012>
- Jaghbeer, Y., Hanson, R. ve Johansson, M. I. (2020). Automated order picking systems and the links between design and performance: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(15), 4489–4505. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1788734>
- Macedo, R., Coelho, F., Relvas, S. ve Barbosa-Póvoa, A. P. (2021). In-House Logistics Operations Enhancement in the Automobile Industry Using Simulation. *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, 374. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85476-8_4
- Masae, M., Glock, C. H. ve Grosse, E. H. (2020). Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 224, 107564. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107564>
- Miller, A. (2004). Order Picking for the 21st Century Voice vs. Scanning Technology. Erişim adresi: https://www.logisticsit.com/absolutenm/articlefiles/688-voice_vs_scanning.pdf
- Miller, C. E., Zemlin, R. A., Tucker, A. W. ve Zemlin, R. A. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM*, 7(4), 326–329. <https://doi.org/10.1145/321043.321046>
- Motmans, R. (2012). Reducing whole body vibration in forklift drivers. *Work*, 41(1), 2476–2481. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0484-2476>
- Nilsson, G. (2004). Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety. *Lund Institute of Technology, Department of Technology and society, traffic engineering*, 221. Erişim adresi: <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4394446/1693353.pdf>
- Petersen, C. G. (1999). The impact of routing and storage policies on warehouse efficiency. *International Journal*

of Operations & Production Management, 19(10), 1053–1064. <https://doi.org/10.1108/01443579910287073>

Ratliff, H. D. ve Rosenthal, A. S. (1983). Order-Picking in a Rectangular Warehouse: a Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, 31(3), 507–521. <https://doi.org/10.1287/opre.31.3.507>

Rojanapitoon, T. ve Teeravarapug, J. (2020). Economic Order Picker Routing Considering Travel Time and Vehicular Energy Consumption with Varying Aisle Traffic. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 13(3), 317–328. Erişim adresi: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107081697&partnerID=40&md5=ee445a16a02624774dec9b92060d35c6>

Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A. ve Tanchoco, J. M. A. (2010). Facilities planning (4th ed.). New York, NY: John Wiley & Sons. Erişim adresi: <https://www.wiley.com/en-us/Facilities+Planning%2C+4th+Edition-p-9781119016076>

Tuna, G. ve Tunçel, G. (2012). Depo Yönetiminde Sipariş Toplama Sistemleri: Bir Literatür Araştırması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 14(3), 15–31. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/40820/492511>

Tutam, M. (2024). Kolaboratif robot kullanılan sipariş-toplama depo tasarımlarının en iyilenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(1), 203–216. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.974331>

UNEX Manufacturing. (2023). What is Order Picking? Erişim adresi: <https://www.unex.com/applications/picking/order-picking>

Van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A. ve De Koster, R. B. M. (2018). Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review. *European Journal of Operational Research*, 267(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.002>

Yener, F. ve Yazgan, H. R. (2019). Optimal warehouse design: Literature review and case study application. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.006>

Zhang, X., Vries, J., Koster, R. ve Liu, C. (2021). Fast and Faultless? Quantity and Quality Feedback in Order Picking. *Production and Operations Management*, 31(4), 1536–1559. <https://doi.org/10.1111/poms.13630>

Ekler

Tablo 1. 10 koridor için toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine göre ortalama tur zamanları (s)

Hız	Toplama Listesi Büyüklüğü					
	5	10	20	40	80	160
0,70	354,18	512,94	729,91	966,52	1179,33	1433,60
0,84	299,77	435,79	623,62	834,09	1036,16	1291,83
0,98	261,41	381,36	548,59	740,77	935,95	1194,24
1,12	233,09	341,17	493,22	672,07	862,76	1124,13
1,26	211,60	310,64	451,13	620,00	807,81	1072,64
1,40	194,87	286,86	418,36	579,64	765,87	1034,89
1,54	181,63	268,04	392,45	547,93	733,51	1006,96
1,68	171,17	253,12	371,90	523,00	708,93	987,92
1,82	162,81	241,19	355,47	503,23	690,00	974,38
1,96	156,12	231,61	342,28	487,61	675,81	966,21
2,10	150,92	224,12	331,96	475,62	665,98	963,34
2,24	146,73	218,09	323,71	466,29	659,09	963,43
2,38	143,76	213,72	317,68	459,80	655,65	967,81
2,52	141,44	210,31	313,01	455,06	654,16	974,12
2,66	140,03	208,14	310,02	452,47	655,38	984,06
2,80	139,16	206,75	308,16	451,38	658,42	996,15
2,94	139,07	206,39	307,62	451,92	663,41	1010,55
3,08	139,31	206,60	307,98	453,77	670,17	1027,44
3,22	140,27	207,71	309,48	457,03	678,60	1046,34
3,36	141,47	209,22	311,59	461,11	687,95	1065,78
3,50	143,2	211,41	314,53	465,99	697,33	1082,10
3,64	145,29	214,10	318,18	471,82	707,95	1100,06
3,78	147,72	217,28	322,49	478,53	719,68	1119,32
3,92	150,65	221,09	327,63	486,27	732,66	1140,00
4,06	153,72	225,13	333,06	494,18	745,01	1157,48

Tablo 2. 10 koridor için Toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine göre optimal hız değeri için iyileştirme

Hız	Toplama Listesi Büyüklüğü					
	5	10	20	40	80	160
0,70	60,73%	59,76%	57,86%	53,30%	44,53%	32,80%
0,84	53,61%	52,64%	50,67%	45,88%	36,87%	25,43%
0,98	46,80%	45,88%	43,93%	39,07%	30,11%	19,33%
1,12	40,34%	39,51%	37,63%	32,84%	24,18%	14,30%
1,26	34,28%	33,56%	31,81%	27,20%	19,02%	10,19%
1,40	28,63%	28,05%	26,47%	22,13%	14,59%	6,91%
1,54	23,43%	23,00%	21,62%	17,62%	10,82%	4,33%
1,68	18,75%	18,46%	17,28%	13,69%	7,73%	2,49%
1,82	14,58%	14,43%	13,46%	10,30%	5,19%	1,13%
1,96	10,92%	10,89%	10,13%	7,43%	3,20%	0,30%
2,10	7,85%	7,91%	7,33%	5,10%	1,77%	0,00%
2,24	5,22%	5,36%	4,97%	3,20%	0,75%	0,01%
2,38	3,26%	3,43%	3,17%	1,83%	0,23%	0,46%
2,52	1,68%	1,86%	1,72%	0,81%	0,00%	1,11%
2,66	0,69%	0,84%	0,77%	0,24%	0,19%	2,11%
2,80	0,06%	0,17%	0,18%	0,00%	0,65%	3,29%
2,94	0,00%	0,00%	0,00%	0,12%	1,39%	4,67%
3,08	0,17%	0,10%	0,12%	0,53%	2,39%	6,24%
3,22	0,86%	0,64%	0,60%	1,24%	3,60%	7,93%
3,36	1,70%	1,35%	1,27%	2,11%	4,91%	9,61%
3,50	2,88%	2,37%	2,20%	3,14%	6,19%	10,97%
3,64	4,28%	3,60%	3,32%	4,33%	7,60%	12,43%
3,78	5,86%	5,01%	4,61%	5,67%	9,10%	13,94%
3,92	7,69%	6,65%	6,11%	7,18%	10,71%	15,50%
4,06	9,53%	8,32%	7,64%	8,66%	12,19%	16,77%

Tablo 3. 20 koridor için toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine göre ortalama tur zamanları (s)

Hız	Toplama Listesi Büyüklüğü					
	5	10	20	40	80	160
0,70	496,60	699,70	1015,07	1455,88	1937,32	2368,08
0,84	419,43	592,56	862,68	1244,06	1671,83	2080,22
0,98	365,18	517,13	755,24	1094,6	1484,75	1878,77
1,12	325,25	461,54	675,96	984,32	1347,07	1731,67
1,26	295,11	419,46	615,81	900,56	1242,74	1621,23
1,40	271,76	386,79	568,99	835,36	1161,90	1536,98
1,54	253,39	361,03	532,02	783,88	1098,41	1471,97
1,68	239,08	340,82	502,80	743,11	1048,54	1422,62
1,82	227,80	324,78	479,50	710,56	1009,04	1384,66
1,96	218,91	312,05	460,86	684,51	977,84	1356,21
2,10	212,25	302,33	446,40	664,19	953,98	1336,54
2,24	206,97	294,59	434,84	647,99	935,43	1322,79
2,38	203,63	289,36	426,63	636,28	922,60	1315,99
2,52	201,13	285,37	420,28	627,28	913,28	1313,12
2,66	200,07	283,26	416,45	621,65	908,31	1315,72
2,80	199,74	282,20	414,17	618,28	906,34	1321,95
2,94	200,72	282,78	413,98	617,57	907,69	1332,14
3,08	202,04	283,99	414,90	618,66	911,66	1345,87
3,22	204,61	286,71	417,69	622,08	918,46	1362,99
3,36	207,43	289,89	421,24	626,70	926,93	1381,94
3,50	211,14	294,17	426,19	633,01	937,02	1400,98
3,64	215,38	299,19	432,17	640,74	949,01	1422,52
3,78	220,15	304,91	439,11	649,81	962,80	1446,31
3,92	225,76	311,68	447,37	660,56	978,67	1472,62
4,06	231,52	318,72	456,06	671,87	994,91	1497,67

Tablo 4. 20 koridor için toplama listesi ve hız değer büyüklüklerine göre optimal hız değeri için iyileştirme

Hız	Toplama Listesi Büyüklüğü					
	5	10	20	40	80	160
0,70	59,78%	59,67%	59,22%	57,58%	53,22%	44,55%
0,84	52,38%	52,38%	52,01%	50,36%	45,79%	36,88%
0,98	45,30%	45,43%	45,19%	43,58%	38,96%	30,11%
1,12	38,59%	38,86%	38,76%	37,26%	32,72%	24,17%
1,26	32,32%	32,72%	32,77%	31,42%	27,07%	19,00%
1,40	26,50%	27,04%	27,24%	26,07%	22,00%	14,56%
1,54	21,17%	21,83%	22,19%	21,22%	17,49%	10,79%
1,68	16,45%	17,20%	17,67%	16,89%	13,56%	7,70%
1,82	12,32%	13,11%	13,66%	13,09%	10,18%	5,17%
1,96	8,76%	9,57%	10,17%	9,78%	7,31%	3,18%
2,10	5,89%	6,66%	7,26%	7,02%	4,99%	1,75%
2,24	3,49%	4,21%	4,80%	4,69%	3,11%	0,73%
2,38	1,91%	2,47%	2,97%	2,94%	1,76%	0,22%
2,52	0,69%	1,11%	1,50%	1,55%	0,76%	0,00%
2,66	0,16%	0,37%	0,59%	0,66%	0,22%	0,20%
2,80	0,00%	0,00%	0,05%	0,11%	0,00%	0,67%
2,94	0,49%	0,21%	0,00%	0,00%	0,15%	1,43%
3,08	1,14%	0,63%	0,22%	0,18%	0,58%	2,43%
3,22	2,38%	1,57%	0,89%	0,72%	1,32%	3,66%
3,36	3,71%	2,65%	1,72%	1,46%	2,22%	4,98%
3,50	5,40%	4,07%	2,86%	2,44%	3,27%	6,27%
3,64	7,26%	5,68%	4,21%	3,62%	4,50%	7,69%
3,78	9,27%	7,45%	5,72%	4,96%	5,86%	9,21%
3,92	11,53%	9,46%	7,46%	6,51%	7,39%	10,83%
4,06	13,73%	11,46%	9,23%	8,08%	8,90%	12,32%