



Optimizing order-picking warehouse designs using collaborative robots

Mahmut Tutam*

Department of Industrial Engineering, Erzurum Technical University, 25050, Erzurum, Türkiye

Highlights:

- Optimal collaboration strategy (decision to ride the collaborative robot or walk alongside it)
- Optimal routing policy (determination of the route)
- Optimal layout design (evaluation of the shape factor, width-to-depth ratio)

Keywords:

- Order-picking
- Optimal shape factor
- Optimal routing policy
- Optimal collaboration strategy
- Pick-list size

Article Info:

Research Article

Received: 25.07.2021

Accepted: 16.01.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.974331

Acknowledgement:

Dr. René De Koster provided valuable information regarding the operation AR-COP systems. The author benefited from reviewers' comments. This work was supported by The Scientific and Technological Research Council of Türkiye [Grant Number: 1059B191900637].

Correspondence:

Author: Mahmut Tutam
e-mail: mahmut.tutam@
erzurum.edu.tr
phone: +90 442 444 5388 /
2604

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a bi-level optimization model is developed to find the optimal shape factor for one- or two-block order-picking warehouses employing collaborative robots. The top-level model is used to determine the optimal shape factor (width-to-depth ratio) minimizing the order-picking time; whereas, the bottom-level model determines the optimal tour and collaboration strategy. Figure A shows optimal tours and collaboration strategies in two different warehouse designs with ten randomly generated pick locations.

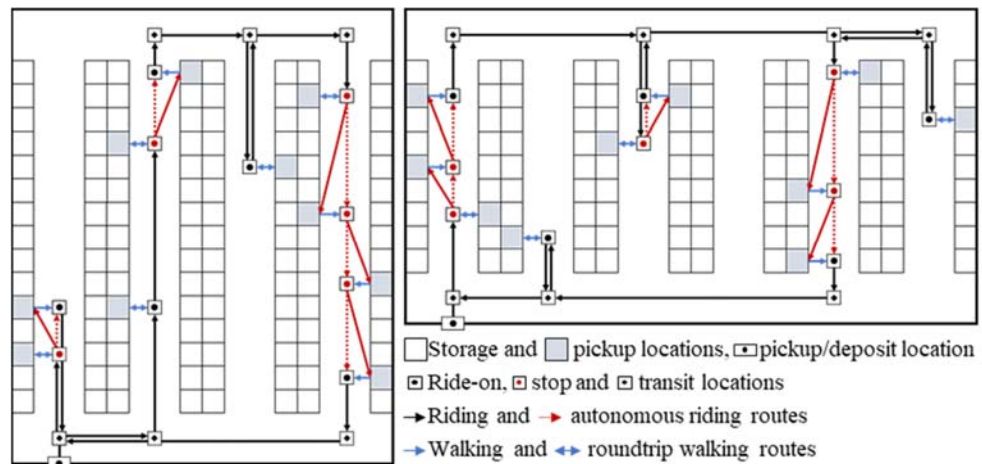


Figure A. Optimal tours and collaboration strategies in two different warehouse designs

Purpose:

The purpose of this study is to investigate the impact of the shape factor on the performance of an Autonomous Ride-on Collaborative Order-Picking (AR-COP) system. Moreover, the performance of the AR-COP system over Manuel Order-Picking (MOP) and Ride-on Order-Picking (ROP) systems are presented in terms of average order-picking time under one- or two-block warehouse designs and various pick-list sizes.

Theory and Methods:

Using Monte Carlo simulation, we generate 1,000 pick lists randomly and solve the bi-level optimization model for each warehouse design having different number of aisles and pick-list sizes. The optimal shape factor is found by using an enumeration method because the solution space at the top-level model is limited to the number of aisles. However, the optimal tour and collaboration strategy is determined at the bottom-level model by using a well-known Dynamic Programming approach which is linear in the number of aisles.

Results:

Our numerical results show that designing the AR-COP system optimally may result in increasing the order-picking performance up to %27.9 and %22.6 for one- and two-block warehouse designs, respectively. An optimally designed AR-COP system provide savings up to %68.5 and %27.9 for one-block warehouse design compared to MOP and ROP systems, respectively. Likewise, the performance of MOP or ROP systems can be improved up to %65.3 and %22.7 for two-block warehouse design, respectively.

Conclusion:

It is shown that the optimal shape factor significantly affects the average time of an order-picking tour when the pick-list size is small. Moreover, the optimal shape factor varies depending on the pick-list size.



Kolaboratif robot kullanılan sipariş-toplama depo tasarımlarının eniyilenmesi

Mahmut Tutam*^{ID}

Erzurum Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Optimal iş birliği kararı (kolaboratif robotu sürme veya yanında yürüme kararının verilmesi)
- Optimal rota seçimi (tur zamanının minimizasyonu)
- Optimal depo tasarımı (şekil faktörünün değerlendirilmesi, en-boy oranı)

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.07.2021

Kabul: 16.01.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.974331

Anahtar Kelimeler:

Sipariş-toplama deposu,
optimal şekil faktörü,
optimal rota,
optimal iş birliği,
toplama-listesi büyüklüğü

ÖZ

Dijital teknolojilerin e-ticaret platformlarına hızlı bir şekilde entegrasyonu ile özellikle son yıllarda online satışlarda önemli ölçüde artışlar yaşanmaktadır. Ayrıca, müşterilerin yüzlerce e-ticaret firması arasındaki küresel rekabetin farkında olması, yüksek kalite, düşük fiyat, hızlı ve ücretsiz teslimat gibi müşteri beklentilerini hiç olmadığı kadar artırmaktadır. Buna karşılık, e-ticaret şirketleri artan beklentileri karşılamak için lojistik sistemlerini yeniden gözden geçirmeye başlamışlardır. Böylece, şirketlerin çoğu yüksek operasyon süreleri ve işçilik maliyetleri ile karakterize edilen sipariş-toplama süreçlerine odaklanmışlardır. Bu yüzden, sipariş-toplama işlemlerini daha verimli ve kârlı hale getirmek için kolaboratif robotlar (kobotlar) birçok depoda kullanılmaya başlanmıştır. Toplama lokasyonları arasındaki uzaklığa bağlı olarak, bir kobot ya sipariş toplayıcı tarafından sürülebilir ya da sipariş toplayıcı yürürken otonom olarak sonraki toplama lokasyonuna hareket edebilir. Bu makale, kolaboratif robotların kullanıldığı depoların optimal tasarımlarını bulmak için iki seviyeli bir programlama modeli önermektedir. Üst-düzey model, sipariş-toplama süresini en aza indiren optimal şekil faktörünü (en-boy-oranı) belirlemek için kullanılırken; alt-düzey model, optimal rota ve iş birliği stratejisini belirlemektedir. Monte Carlo simülasyonu temelinde, toplama listesindeki sipariş sayısı küçükse şekil faktörünün sipariş-toplama tur süresini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Ayrıca, optimal şekil faktörünün toplama listesi büyüklüğüne bağlı olarak değiştiği sonucuna varılmıştır.

Optimizing order-picking warehouse designs using collaborative robots

H I G H L I G H T S

- Optimal collaboration decision (determination to ride the collaborative robot or walk alongside it)
- Optimal route selection (minimization of the tour length)
- Optimal layout design (evaluation of the shape factor, width-to-depth ratio)

Article Info

Research Article

Received: 25.07.2021

Accepted: 16.01.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.974331

Keywords:

Order-picking warehouse,
optimal shape factor,
optimal route,
optimal collaboration,
pick-list size

ABSTRACT

With the rapid integration of digital technologies into e-commerce platforms, online sales have increased dramatically in recent years. Additionally, customers' awareness of the global competition among hundreds of e-commerce companies has increased their expectations such as high quality, low price, fast and free delivery like never before. In response, e-commerce companies have started revisiting their logistics systems to survive in such a business environment by meeting rising expectations and minimizing operational costs. Thus, most companies have been focused on order-picking processes, which are characterized by high operating times and labor costs. Accordingly, collaborative robots (cobots) have been used in many warehouses to make order-picking operations more efficient and profitable. Depending on the distance between pick locations, a cobot can either be ridden by the order picker or autonomously move to the next pick location while the order picker is walking. This paper proposes a bi-level programming model to find the optimal designs of order-picking warehouses employing collaborative robots. The top-level model is used to determine the optimal shape factor (width-to-depth ratio) minimizing the order-picking time; whereas, the bottom-level model determines the optimal route and collaboration strategy. Based on Monte Carlo simulation, it is shown that the shape factor significantly affects the length of an order-picking tour when the pick-list size is small. However, it is concluded that the optimal shape factor varies depending on the pick-list size.

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda internete erişim olanaklarının yaygınlaşması ile sanal ortamlarda daha fazla vakit geçiren bireylerin dijital reklamların da yönlendirmesiyle online alışveriş yapma eğilimlerinde ciddi bir artış gözlemlenmektedir. Ayrıca, e-ticaretin sunmuş olduğu kolaylıkların ve avantajların (ürün yelpazesinin geniş olması, farklı üreticiler tarafından üretilen aynı niteliklere sahip ürünlerin kolayca kıyaslanabilmesi, ürünü kullananların deneyimlerini içeren paylaşımlara kolayca ulaşılabilmesi ve daha rekabetçi bir ortam sunması sebebiyle fiyatların nispeten düşük olması vb.) farkına varan müşteriler, hayat standartlarını yükseltmek ve geleneksel alışveriş için harcadığı zamanı sosyal platformlarında veya alanlarında kullanmak için online alışverişe yönelmektedirler [1]. Dahası, 2025 yılına kadar dünya genelinde %17,5'e ulaşması beklenen e-ticaretin toplam perakende sektörü içerisindeki payı pandemi ile birlikte 2020 yılında %17,8'e ulaşmış ve 2025 yılına kadar %24,5'e ulaşacağı tahmin edilmektedir [2]. Ticaret Bakanlığı tarafından yayınlanan rapora göre, Türkiye'de 2019 yılında bu oran %9,8 iken 2020 yılında %15,7'ye çıkmış ve 2021 yılında %20,4'e ulaşmıştır [3].

Online ticaret hacmindeki bu ciddi artışın yanı sıra son yıllarda yaşanan sosyal, ekonomik ve kültürel değişiklikler neticesinde müşterilerin beklentilerinde de ciddi değişimler yaşanmaktadır (bir veya en fazla iki günde ürün teslimatının talep edilmesi, teslimat zamanının müşterinin isteğine göre belirlenmesi, ürünlerin kişiselleştirilmesi, kişiye özel paketlenmesi vb.). Dahası, bu baş döndürücü toplumsal değişimlere adapte olmak zorunda kalan e-ticaret firmaları, ayrıca globalleşen dünyada sadece kendi ülkelerindeki ulusal firmalarla değil uluslararası rakipleriyle de mücadele etmek zorunda kalmaktadırlar. Nihayetinde, her geçen gün artan sipariş miktarına, müşteri isteklerine ve küresel rekabete maruz kalan firmalar ciddi ekonomik kayıplar yaşamakta ve iş dünyasında kalabilmek için lojistik sistemlerini tekrar tekrar gözden geçirmeleri gerekmektedir. Böylece, daha etkin ve verimli bir tedarik zincirine sahip olmaları gerektiğini düşünen e-ticaret firmaları, özellikle lojistik faaliyetlerindeki operasyon maliyetlerini düşürerek kâr marjlarını artırmanın yollarını araştırmaktadırlar.

Üretilen ürüne ekonomik değer katmayan bazı operasyonlar içeren [4] ve toplam üretim maliyetlerinin yaklaşık %9,6'sını oluşturan lojistik faaliyetlerin [5], e-ticaret şirketleri için ciddi bir maliyet kalemi

oluşturduğu ve sürekli olarak iyileştirilmesi gerektiği aşikârdır. Ulaşım, envanter taşıma, depolama, müşteri servisi ve yönetim gibi maliyet kalemlerinden oluşan lojistik faaliyetlerin [6] müşteri memnuniyeti açısından önemli bir rol oynaması sebebiyle elimine edilmesi mümkün değilken, minimize edilmesi şirketlerin geleceği açısından önem arz etmektedir. Nihayetinde, siparişlerin müşterilere daha hızlı bir şekilde ulaştırılarak memnuniyetlerinin artırılması ve lojistik faaliyetler neticesinde oluşan maliyetlerin minimize edilerek firmaların kâr marjlarının artırılması için bu süreçteki her bir operasyon türünün dikkatle incelenmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir.

Müşteri siparişlerindeki dalgalanmalara karşı önemli bir tampon görevi üstlenen depolama operasyonları lojistik faaliyetler sonucu oluşan maliyetlerin yaklaşık %22'sini oluşturmaktadır [5] ve ürünleri raflara yerleştirme, raflardan toplama (sipariş-toplama), toplanan siparişleri birleştirme veya ayırıştırma, etiketleme ve kargolama gibi operasyonları içermektedir. Depolama operasyonları içerisindeki en maliyetli ve en az katma değer içeren faaliyet [4, 7] sipariş-toplama (order-picking) operasyonlarıdır ve bir depodaki toplam maliyetlerin %20'si ile %50'sini oluşturmaktadırlar [8]. Ayrıca, bir depodaki toplam işçilik maliyetlerinin yaklaşık %40 ile %60'ının sipariş-toplama operasyonları neticesinde olduğu hesaplanmaktadır [9]. Dahası, sipariş-toplama operasyonları depolarda ciddi bir zaman kaybına sebep olmakta ve bu zamanın bir depodaki toplam operasyon süresinin %55'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir [8]. Son yıllarda, depolama alanlarındaki artışa bağlı olarak bu oranın daha da arttığı öngörülebilmektedir. Diğer taraftan, bir depodaki sipariş-toplama maliyetleri depo tasarımının optimize edilmesi ile %10 ile %30 arasında azaltılabileceği belirlenmiştir [10].

Manuel Sipariş-Toplama (MST) sistemlerinde sipariş toplayıcı gün boyunca depo içerisinde tur atmakta ve her bir tur süresince bir manuel sipariş-toplama aracını (manuel trans palet, manuel ürün taşıma arabası vb.) itmekte veya çekmektedir (Şekil 1). Bu hem ciddi bir sipariş-toplama zamanı (dolayısıyla siparişlerdeki zaman limiti düşünüldüğünde daha fazla iş gücü) gerektirmekte hem de her gün onlarca turu tamamlamak için yürüyen sipariş toplayıcılar için ciddi ayak veya diz problemlerine sebep olmaktadır. Benzer şekilde, Binek Sipariş-Toplama (BST) sistemlerinde sipariş toplayıcı her bir ürünü toplamak için bir binek sipariş-toplama (elektrikli/akülü trans paletler veya palet kamyonlar) aracının sürüş kompartımanından inip siparışı



Şekil 1. Depolarda kullanılan manuel [12] ve binek [13] sipariş-toplama araçları
(Manual and ride-on order picking vehicles used in warehouses)

topladıktan sonra tekrar sürüş kompartımanına binmek durumundadır (Şekil 1). Binek aracın manuel araçtan daha hızlı olması sebebiyle sipariş-toplama süreci hızlanacak olsa dahi sipariş toplayıcı günde yaklaşık 1.200 kere sürüş kompartımanına inip bindiği [11] için BST sistemlerinin eklem kıkırdaklarında tahribat/ödem oluşmasına ve kas yorgunluğu sebebiyle uyku bozukluklarına sebep olması kaçınılmazdır.

Sipariş sayısındaki ve depolama yüzey alanlarındaki artışa bağlı olarak yukarıda bahsedilen her iki araç türünde de istenilen performans elde edilemediği için (ekonomik ve/veya ergonomik), sipariş-toplama operasyonlarında iyileştirme sağlamak amacıyla çeşitli Otomatik Depolama ve Boşaltma (OD/B) sistem önerilerinde bulunulmuştur (Birim Yük OD/B sistemi, Mini Yük Otomatik OD/B sistemi, Otonom Araç Temelli OD/B sistemi ve Mekik Tabanlı OD/B sistemi vb.). Ne var ki, OD/B sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle bir kez inşa edilince yıllarca kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır [14]. Dolayısıyla, küçük ve orta büyüklükteki firmaların bu tür depoları inşa etmesi firmaları ciddi bir finansal riskle karşı karşıya bırakmakta ve bu sebeple çoğu depoda OD/B sistemleri tercih edilmeyerek geleneksel depo sistemleri (geleneksel raflar, manuel veya binek araçlar vb.) halen kullanılmaktadır [15]. Bu nedenle, firmalar son yıllarda geleneksel depo yapılarına entegre bir şekilde kullanılabilen ve aynı zamanda sipariş-toplama operasyon verimliliğini artıran robotik sistemlere yönelmeye başlamışlardır. Dahası, robot üreten firma sayısındaki ciddi artış sebebiyle robot fiyatları düşmekte ve böylece depolarda kullanılan robotların sayısı her geçen gün daha da artmaktadır [16].

Depolarda yapılan operasyon türüne bağlı olarak onlarca farklı robot türü (raf veya kutu taşıyıcı, sipariş toplayıcı/ayırıştırıcı/birleştirici/sıralayıcı vb.) bulunmaktadır. Ancak bu çalışma sipariş-toplama operasyonları ile sınırlandırıldığı için özellikle otonom robot içeren Kolaboratif Sipariş-Toplama (KST) sistemlerine odaklanacaktır. KST sistemleri deponun iç dizaynında çok fazla değişiklik yapmadan kolaboratif robotlarla (diğer bir ifadeyle kobotlarla) insanların aynı ortamda beraber sipariş toplamalarına imkân tanımaktadır. Böylece, tasarımları esnek olmayan kobotlarla (bir operasyon için tasarlanan kobotun başka bir operasyonda kullanılabilmesi için ciddi donanımsal ve/veya yazılımsal değişiklik gerekmektedir) verimliliği kobotlara nispeten daha düşük olan insan gücünün (insanların yapabileceği işler kapasite ve/veya güvenlik gibi sebeplerle sınırlı kalmakta) birleştirilmesi ile sipariş-toplama operasyonları daha efektif bir şekilde

gerçekleştirilebilmektedir. Dahası, sipariş-toplama operasyonlarında kobotların kullanılması ile ergonomik problemler ve operasyon süreleri aynı anda minimize edilebilmektedir.

KST sistemlerinde genel olarak kobot ile sipariş toplayıcı koordineli bir şekilde çalışmasına rağmen 3 farklı KST sistemi bulunmaktadır: 1) sipariş toplayıcıyı takip eden (picker-in-lead) kobot içeren sistemler (Sipariş Toplayıcı Yönlendirmeli KST, STY-KST), 2) sipariş toplayıcının takip ettiği (cobot-in-lead) kobot içeren sistemler (Kobot Yönlendirmeli KST, KY-KST) ve 3) sipariş toplayıcının binebildiği otonom (autonomous ride-on cobot) kobot içeren sistemler (Otonom Binilebilir KST, OB-KST) [17]. STY-KST sistemi MST sistemi ile benzer özellikler göstermekte ve kobot sipariş toplayıcıyı takip ettiği için sadece sipariş toplayıcının rotasının optimize edilmesi gerekmektedir. KY-KST sisteminde farklı olarak kobotlar toplama noktalarında sipariş toplayıcıları beklemekte ve sipariş toplayıcılar bu noktalara giderek sipariş-toplama operasyonunu gerçekleştirmektedirler. Bu tür sistemlerde, kobotun rotasının optimize edilmesinin yanı sıra kobotların bekleme zamanının minimize edilmesi amacıyla sipariş toplayıcılar için çizelgeleme probleminin çözülmesi gerekmektedir. Diğer taraftan, OB-KST sisteminde STY-KST ve KY-KST sistemlerinden farklı olarak sipariş toplayıcı kobotu kullanabilmekte veya kobot otonom olarak hareket ederken yanı sıra yürüyebilmektedir. Dolayısıyla, STY-KST ve KY-KST sistemlerinden farklı olarak optimal rotanın yanı sıra optimal iş birliği stratejisinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bahsedilen bariz sistem farklılıkları sebebiyle, bu çalışma sadece OB-KST sistemlerine odaklanmaktadır (Şekil 2). Son yıllarda OB-KST sistemlerini üreten firma sayısında ciddi bir artış gözlemlenmektedir [16] ve bu tür sistemlerde kullanılan kobotlara örnek olarak Optio OSE250P T-Mote (Toyota), Pick-n-Go (Kollmorgen), QuickPick (Crown), N20 series (Linde), NO-N2 (Cat), EasyPILOT ECE 220/ 225 (Jungheinrich), EMP (Witron), 34 STILL iGo neos (Detailresult Groep) gösterilebilir.

OB-KST sisteminin en önemli özelliği sipariş toplayıcı kobota binerek sürebilir veya otonom hareket eden kobotun yanında yürüyebilir. Örneğin, bir toplama lokasyonu uzakta ise sipariş toplayıcı kobota binerek toplama koridoru ortasında bulunan durak notasına kadar kobotu sürebilir ve durak lokasyonunda kobottan inerek toplama lokasyonuna yürüdüktan sonra siparişi alıp tekrar durak lokasyonuna yürüyerek siparişi paleta bırakabilir (her bir toplama lokasyonu için toplama koridorunun merkezinde bir durak lokasyonu bulunmakta ve eğer sipariş toplayıcı kobotu sürmeye karar verirse bu durak lokasyonu biniş lokasyonu olarak



Şekil 2. Depolarda kullanılan bir otonom sipariş-toplama aracı (N20 series, [18]) (An autonomous order picking vehicle used in warehouses)

adlandırılmaktadır). Dikkat edilirse, toplama koridoru siparişlerin toplandığı koridorları ifade ederken çapraz koridor bir toplama koridorundan diğerine geçmek için kullanılan koridoru ifade etmektedir. Aksi belirtilmediği müddetçe, bundan sonra kullanılacak koridor ifadesi toplama koridoru anlamına gelmektedir. Diğer taraftan, eğer bir toplama lokasyonu yakında ise kobot otonom olarak bir sonraki durak lokasyonuna hareket ederken sipariş toplayıcı direkt olarak toplama lokasyonuna yürüyebilir ve siparişi aldıktan sonra durak lokasyonuna yürüterek siparişi paletle bırakabilir. Böylece kobota binmek ve kobottan inmek için zaman harcanmazken sipariş toplayıcının dizlerinde oluşacak baskı da azaltılmış olacaktır.

OB-KST sisteminde kobotu sürme veya kobotun yanında yürüme kararı her bir toplama lokasyonu için değerlendirilirken turun en kısa sürede tamamlanması ve sipariş toplayıcının kobota daha az in-bin yapması hedeflenmektedir. Sipariş toplayıcının kobotu sürmesi durumunda zaman kazancı sağlanabilirken ergonomik açıdan kayıp yaşanmaktadır (yükseğe adım atmak yürümekten daha fazla enerji harcanmasına ve dizlere daha fazla yük binmesine sebep olmaktadır). Diğer taraftan, sipariş toplayıcının kobotun yanında yürüdüğü durumlarda ise ergonomik açıdan kazanç sağlanabilirken zaman kaybı yaşanmaktadır. Bu sebeple zaman ve ergonomik kayıp-kazanç dengesi sağlanarak her bir toplama lokasyonu için yürüme veya kobotu sürme kararının verilmesi gerekmektedir. Dahası, depodaki tur uzunluğunu belirleyen koridor sayısı, koridor uzunluğu ve orta çapraz koridorun bulunup bulunmaması gibi tasarım özellikleri de [19, 20] bu kararda önemli bir rol oynamaktadır.

Şekil 3'te yaklaşık aynı alana ve 2 farklı şekil faktörüne (en-boy oranı) sahip depo tasarımları gösterilmektedir. Her bir tasarım için 10 rastgele sipariş-toplama lokasyonu belirlenerek optimal rota ve iş birliği stratejisi belirlenmiştir. Şekilden görülebileceği üzere, rota ve iş birliği stratejisi her bir tasarımda farklıdır. Bu yüzden, toplama lokasyonları arasındaki mesafelerin bir turdaki toplam sipariş sayısının yanı sıra her bir koridor uzunluğuna ve sayısına bağlı olduğu söylenebilir. Bu da bu makalede cevaplanması planlanan şu araştırma sorularını ortaya çıkarmaktadır: 1) deponun optimal bir şekilde dizayn edilmesi sipariş-toplama tur süresini nasıl etkilemektedir? 2) farklı büyüklükteki toplama listeleri optimal şekil faktörünü nasıl etkilemektedir? ve 3) optimal dizayn edilen OB-KST sistemi MST veya BST sistemlerine göre ne kadar iyileştirme sağlamaktadır?

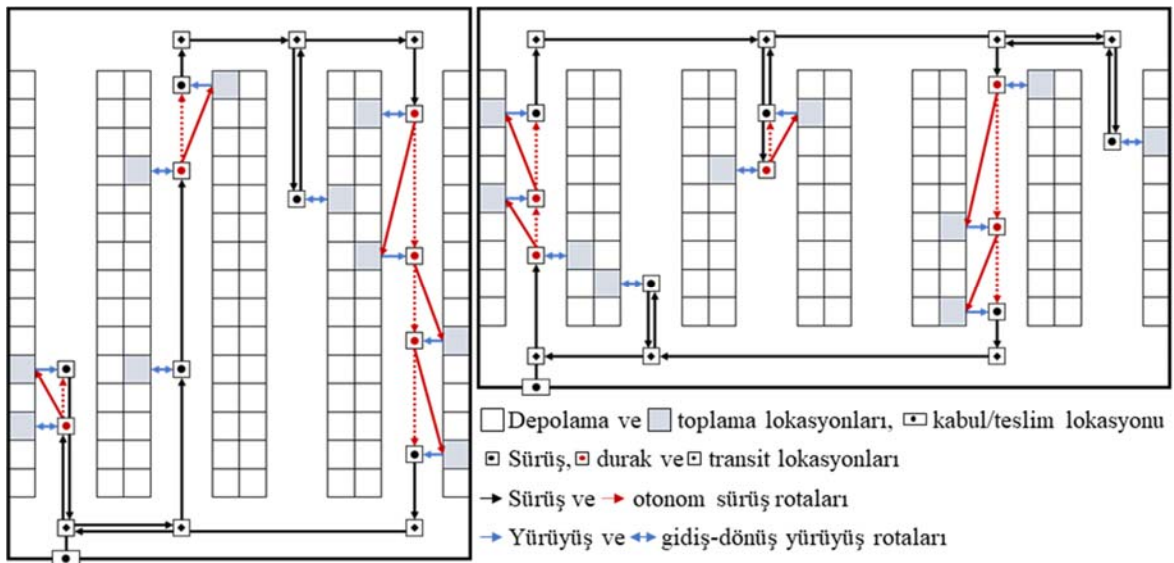
Yukarıda verilen araştırma sorularını cevaplamak için bu makalede iki seviyeli bir programlama modeli önerilmiştir. Üst-düzyem model, ortalama seyahat süresini en aza indiren optimal şekil faktörünü (en-boy oranı) belirlemek için kullanılırken; alt-düzyem model ile üst modelde belirlenen bir depo dizaynı için optimal rota ve iş birliği stratejisi oluşturulmaktadır. Dahası, Monte Carlo simülasyonu temelinde tek- veya orta-çapraz koridor içeren çift-bloklu depo dizaynlarında farklı büyüklükteki toplama listeleri için optimal şekil faktörü bulunmuştur. Böylece, optimal olarak dizayn edilmiş OB-KST sistemi ile MST ve BST sistemleri kıyaslanarak ne kadar kazanç sağlanacağını gösterilmiştir.

Makalenin bundan sonraki bölümünde sipariş-toplama operasyonu için yapılan araştırmalardan bahsedilmiş ve yapılan çalışmanın literatüre katkısı açıklanmıştır. Üçüncü bölümde iki seviyeli bir optimizasyon modeli oluşturulmuş ve modellerde kullanılan notasyon açıklanmıştır. Dördüncü bölüm pratikte kullanılan parametre değerleri temelinde sayısal sonuçları içermekte ve elde edilen bulguları tartışmaktadır. Son bölümde yapılan çalışma ve bulgular özetlenerek, gelecekte yapılabilecek çalışma önerilerinde bulunmaktadır.

2. Literatür Taraması (Literature Review)

Sipariş-toplama operasyonlarındaki değişikliklere daha hızlı adapte olabildikleri için bu operasyonlar genellikle insanlar tarafından gerçekleştirilmektedir [21-23]. Sipariş-toplama Problemi (STP) üzerine yüzlerce çalışma yapılmış ve sipariş-toplama operasyonlarının verimliliğini artırmak için farklı depolama, toplama, rotalama ve birleştirme stratejileri önerilmiştir. STP ile alakalı yapılan çalışmaların özetleri De Koster vd. [24], Tuna ve Tunçel [25], Grosse vd. [21], Van Gils vd. [22], Cergibozan ve Tasan [26], Yener ve Yazgan [27], Jaghbeer vd. [28] ve Masae vd. [23] gibi literatür tarama makalelerinde bulunabilir.

Ratliff ve Rosenthal [29] STP'nin Gezin Satıcı Problemi'nin (GSP) bir özel türü olduğunu belirtmişler ve polinomsal zamanda çözülebilmesi için Dinamik Programlama (DP) temelli bir algoritma önermişlerdir. Goetschalckx ve Ratliff [30, 31] farklı sipariş-toplama ve rotalama stratejilerini incelemişler ve sipariş-toplama operasyonlarının daha verimli yapılabileceğini belirtmişlerdir. Hall



Şekil 3. Farklı şekil faktörlerine sahip iki depo tasarımı için optimal tur ve iş birliği stratejileri (Optimal routing and collaboration strategies for two warehouse designs having different shape factors)

[32] sipariş-toplama operasyonları için farklı rotalama stratejileri önermiştir. Caron vd. [33] Sipariş Başına Küp Dizini (SBK, COI – Cube-Per-Order Index) bazlı depolama stratejisi ile farklı rotalama stratejileri için analitik modeller geliştirmişler ve simülasyonla geliştirilen modellerin doğruluğunu göstermişlerdir. De Koster ve Van der Poort [34] tek bloklu depo dizaynları için optimal ve sezgisel rotalama stratejilerini karşılaştırmışlardır. Petersen [35, 36] simülasyon temelinde farklı rotalama ve depolama stratejilerini test etmiş ve sipariş-toplama operasyonlarında önemli ölçüde kazanım sağlanabileceğini göstermişlerdir. Caron vd. [20] sipariş-toplama operasyonları için optimal depo dizaynı üzerine araştırma yapmışlardır.

Roodbergen ve De Koster [37] orta-çapraz içeren çift-bloklu sipariş-toplama depolarında optimal rotalama stratejisinin polinomsal zamanda elde edilebileceğini göstermişlerdir. Roodbergen ve De Koster [38] çok bloklu depolarda optimal rotalama stratejisinin bulunabilmesi için farklı sezgisel yöntemler önermişler ve çok fazla çapraz koridor eklemenin sipariş-toplama zamanlarını uzatacağı sonucuna varmışlardır. Gue vd. [39] dar koridor dizaynı depolarda sipariş-toplama yoğunluğunu incelemişler ve bir sipariş-toplama deponunun maliyet ve servis performansını değerlendirmişlerdir. Hsieh ve Tsai [40] sipariş-toplama operasyonlarındaki verimliliği artırmak için depo tasarımı, rotalama ve depolama stratejisi, ve toplama listesinin büyüklüğü gibi faktörleri göz önünde bulundurarak optimal depo şeklini belirlemişlerdir. Tunç vd. [41] bir firmanın depo sistemini incelemiş ve sipariş-toplama tekniğinin doğru seçilmesi ile yaklaşık %32 zamansal iyileştirme sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Pan ve Wu [42, 43] birden çok sipariş toplayıcının aynı ortamda çalıştığı durumları farklı depolama stratejileri altında incelemiş ve sipariş-toplama rotalarındaki yoğunluğu hesaplamışlardır. Glock ve Grosse [44] U-şekilli bir depo dizaynı için depolama ve rotalama stratejilerini incelemişlerdir. Özçakar vd. [45] bir lojistik firmasındaki sipariş-toplama problemini Clarke-Wright sezgisel yöntemini uygulayarak çözmüşler ve sonuçlarını Genetik Algoritma (GA) ile yapılan çözümle karşılaştırmışlardır. Chen vd. [46] rotalardaki sıkışıklığı göz önünde bulundurarak iki sipariş toplayıcı için optimal rotalama stratejisini karınca koloni algoritması kullanarak belirlemişlerdir. Rao ve Adil [47] çift-bloklu bir deponun her bir bloğunun her bir koridoruna bir sipariş toplayıcı yerleştirilmesi durumunu incelemişler ve farklı depo parametreleri için optimal sipariş-toplama süresini analiz etmişlerdir.

Thomas ve Meller [48] literatürde ilk defa sipariş-toplama operasyonlarındaki kapı lokasyonlarının depo dizaynları üzerindeki etkisini göstermek için analitik modeller geliştirmişlerdir. Çelik ve Süral [49] balık kılıçığı depo tasarımında devir (turnover) bazlı depolama yapılmasının sipariş-toplama performansına etkisini incelemişlerdir. Şahin ve Eroğlu [50] sipariş-toplama ve araç rotalama problemlerini aynı anda hiyerarşik olarak çözebilen GA tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Çelik ve Süral [51] sipariş-toplama sürecinde koridor değiştirimin zaman ve performans kaybına sebep olduğunu belirtmişler ve geliştirdikleri bir koridor içindeki veya koridorlar arasındaki dönüşleri minimize edecek optimizasyon modelinin polinomsal zamanda çözülebileceğini göstermişlerdir. Öztürkoğlu ve Hoşer [52] kesikli koridor yapısına sahip yeni bir depo tasarımı için sipariş-toplama operasyonlarını minimize eden polinomsal zamanlı ve DP esaslı bir algoritma önerisinde bulunmuşlardır. Kiriş vd. [53] sipariş-toplama için kat edilen toplam mesafeyi ve sipariş-toplama teslim zamanını minimize etmek için iki amaçlı bir model oluşturmuş ve GA ile oluşturdukları modeli çözmüşlerdir.

Bottani vd. [54] sipariş-toplama depolarının dizayn edilmesi için kullanılabilecek Excel tabanlı bir yazılım programını oluşturmuşlar ve belirli bir alana sahip bir depodaki sipariş-toplama süresinin farklı

parametreler (rotalama stratejisi, şekil faktörü, çapraz koridor sayısı ve toplama listesi büyüklüğü) için bu programla hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Öztürkoğlu ve Hoşer [55] farklı depolama stratejileri, toplama listesi büyüklükleri, şekil faktörleri, depo alanı büyüklükleri ve bunlar arasındaki etkileşimin sipariş-toplama performansı üzerindeki etkisini istatistiksel olarak incelemişlerdir. Diefenbach ve Glock [56] ekonomik veya ergonomik hedef fonksiyonlarına sahip karma tamsayı programlama modelleri geliştirmiş ve hem deponun şeklini optimize etmişler hem de oluşturulan U-şekilli sipariş-toplama alanlarının depo içerisine yerleşimini incelemişlerdir.

Çobanoğlu vd. [57] sipariş-toplama operasyonlarında siparişlerin toplanma sıklıklarını dikkate alarak bir depolama yeri atama problemi önermişler ve problemi çözümlenerek sipariş-toplama operasyonlarında %50 civarında iyileştirme yapılabileceğini göstermişlerdir. Shekari Ashgari ve Gue [58] sipariş-toplama operasyonları için bulmaca-tabanlı (puzzle-based) bir taşıma sistemi önermişler ve böyle bir sistemin kullanılması ile sipariş-toplama operasyonlarının verimliliğinin %77 artırılabilceğini hesaplamışlardır. Özden vd. [59] depo dizaynlarını kolaylaştırmak için optimale yakın sonuçlar veren açık-kaynaklı bir yazılım programı geliştirmişlerdir. Özden vd. [60] görünürlük grafiği (visibility graph) temelinde yaptıkları çalışma ile literatürde yapılan sipariş-toplama süre hesaplamalarının %10-20 civarında daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Azadeh vd. [15] ve Boysen vd. [61, 62] yaptıkları literatür taramasında KST sistemlerinin depolardaki sipariş-toplama faaliyetlerinin geliştirilmesine katkıda bulunacağını ve robot-insan iş birliğine dayalı bu sistemlerin araştırılması gereken önemli konulardan biri olduğunu belirtmişlerdir. Dolayısıyla, KST sistemleri ile alakalı sınırlı sayıda çalışma yapılmış [63] ve bu çalışmaların tamamı STY-KST veya KY-KST sistemlerine odaklanmıştır. Literatürde ilk defa Meller vd. [64] bir KY-KST sistemini incelemiş ve kobot kullanımının sipariş-toplama listelerinin küçük olduğu depolar için daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Kaveh vd. [65] dinamik alan stratejisinin sipariş-toplama operasyonu üzerindeki etkisini incelemişler ve dinamik bir stratejinin operasyon maliyetini %7 civarında azaltacağını hesaplamışlardır. Löffler vd. [66] STY-KST sistemi üzerine yaptıkları çalışmada sipariş-toplama süresinin %20 civarında iyileştirebileceğini göstermişlerdir. Zhang vd. [67] KST sistemlerinin potansiyelini göstermek için simülasyon temelinde bir çalışma yapmışlardır. Son olarak, Pasparakis vd. [68] oluşturdukları gerçek bir deney tasarımı ile STY-KST ve KY-KST sistemlerini verimlilik, toplama doğruluğu ve toplama hızı temelinde karşılaştırmışlardır.

Literatür taramasından anlaşılacağı üzere literatürde yapılan araştırmaların çoğu halen MST ve BST sistemleri içeren tasarımlar üzerine odaklanmaktadır ve KST sistemleri üzerine çalışmalar son yıllarda artmaya başlamıştır. Bu yüzden, pratikte KST sistemi içeren dizaynlarda ciddi bir artış olmasına rağmen STY-KST veya KY-KST sistemleri ile alakalı yapılan çalışmalar sınırlı kalmakta ve OB-KST sistemi ile alakalı literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmanın ana katkısı OB-KST sistemi kullanılan depoların tasarımını optimize etmek için iki seviyeli bir optimizasyon modeli geliştirmesidir. Böylelikle, optimal depo tasarımı belirlenirken aynı zamanda optimal rota ve iş birliği stratejisi oluşturulmaktadır. Ayrıca, tek- veya çift-bloklu depo tasarımlarında farklı toplama-listesi büyüklükleri için optimal tasarlanan bir OB-KST sisteminin MST ve BST sistemlerine kıyasla sipariş-toplama süresini ne kadar iyileştirdiği sayısal hesaplamalarla gösterilmiştir.

3. Optimizasyon Modeli (Optimization Model)

Bu bölümde OB-KST sistemi için iki seviyeli bir optimizasyon modeli geliştirilmektedir. Üst-düzyer modelde belirli bir yüzey alanına

sahip bir depodaki ortalama sipariş-toplama süresini minimize eden koridor sayısı belirlenmektedir. Üst-düzye modelde oluşturulan her bir farklı koridor sayısına sahip tasarım için alt-düzye model ile optimal rota ve iş birliği stratejisine karar verilmektedir. Dolayısıyla, optimal şekil faktörüne bağlı olarak üst-düzye modeldeki değişkenin alabileceği değer sayısı kadar alt-düzye model çözülmektedir. Diğer bir ifadeyle, üst-düzye modeldeki her bir tasarım için alt-düzye model çözümlenerek optimum rota ve iş birliği stratejisi ile tasarımının ortalama sipariş-toplama süresi bulunmakta ve sonuç üst-düzye modele aktarılmaktadır. Daha sonra, üst-düzye modele aktarılan tüm tasarımlar karşılaştırılarak en iyi sonucu veren koridor sayısına karar verilmektedir. Optimizasyon modeli oluşturulurken OB-KST sisteminin uygulandığı depolarda yapılan gözlemlere uygun olarak aşağıdaki varsayımlarla yapılmıştır:

- Tüm koridorların genişlikleri eşittir ve sipariş-toplama operasyonlarının Kabul/Teslim (K/T) lokasyonu deponun en soldaki koridorunun karşısında yer almaktadır (Şekil 3).
- Otonom olarak hareket ederken veya sipariş-toplayıcı tarafından sürülürken kobotun hızı sabittir ve ivmelenme/yavaşlama gibi hız değişimleri göz ardı edilmektedir.
- Kobot koridorların tam merkezinde hareket etmekte ve duraklar arası mesafe rektilineer uzaklık olarak hesaplanmaktadır.
- Sipariş toplayıcı eğer iki toplama lokasyonu arasında yürümeye karar verirse koridor merkezinde bulunan durak lokasyonu ile toplama lokasyonu arasında direkt olarak hareket etmekte ve bu mesafe öklid uzaklık olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda kobot otonom olarak hareket etmekte ve sipariş toplayıcıdan önce durak lokasyonuna ulaşmaktadır.
- Eğer iki toplama lokasyonu farklı koridorlarda bulunuyorsa, sipariş toplayıcının yürütmesine izin verilmemekte ve bu iki toplama lokasyonu arasındaki mesafe rektilineer uzaklık olarak hesaplanmaktadır.
- Koridorlar içerisinde her iki yöne hareket sağlanmakta ve sipariş toplayıcı veya kobot herhangi bir koridor içerisinde gerekirse yön değiştirmektedir.
- Sipariş toplayıcı her seferinde en fazla bir toplama lokasyonuna uğramakta ve bir turda bulunan aynı siparişler birleştirilerek sadece bir seferde toplanmaktadır.
- Bir siparişin raftan alınma süresi MST, BST ve OB-KST sistemlerinin her biri için aynı olduğundan ve tur rotalarını değiştirmeyeceğinden hesaplamalara dahil edilmemektedir. Her bir toplama lokasyonundaki siparişin raftan alınma süresinin bilinmesi durumunda toplama lokasyonlarındaki siparişlerin raflardan alınma sürelerini gösteren bir parametre dizisi tanımlanarak amaç fonksiyonuna eklenebilir.
- Sipariş-toplama aracı herhangi bir büyüklükteki toplama listesinde bulunan tüm siparişleri alacak kapasiteye sahiptir.

3.1. Üst-Düzye Optimizasyon Modeli (Top-Level Optimization Model)

Deponun optimal olarak şeklinin belirlenmesi için belli bir depolama yüzey alanına sahip bir tasarımdaki ortalama sipariş-toplama süresini minimize eden koridor sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Deponun belli bir yüzey alanına sahip olduğunun varsayılması tasarımlar arasındaki kıyaslamaların doğru yapılabilmesi için önem arz etmektedir. Dolayısıyla, depo yüzey alanı bilindiğinden koridor uzunluğu kolayca yüzey alanı ve koridor sayısına bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Böylece, koridor uzunluğu bir eşitlik kısıtı olarak modele eklenerek model sadece koridor sayısına bağlı olarak çözülebilmektedir. Ayrıca, pratikte yapılan gözlemler neticesinde deponun şekli faktörünün en az 0,2 ve en fazla 5,0 olacağı düşünülmekte ve buna bağlı olarak koridor sayısının alabileceği minimum ve maksimum değerler belirlenmektedir. Böylelikle üst-model için gerçek hayattaki uygulamalar temelinde çözüm uzayı sınırlandırılmaktadır. Buna göre n koridora sahip bir tasarımdaki

ortalama sipariş-toplama süresini ($E [T_n]$) minimize etmek için oluşturulan üst-düzye model, kullanılan parametre ve karar değişkenleriyle birlikte aşağıda verilmektedir.

3.1.1. Parametreler (Parameters)

- v : bir koridorun genişliği (m)
- a : yan yana bulunan iki koridorun merkezleri arasındaki uzaklık (m)
- A : toplam depolama yüzey alanı (m^2)

3.1.2. Karar Değişkenleri (Decision variables)

- n : toplam koridor sayısı
- L : bir koridorun uzunluğu (m)

3.1.3. Optimizasyon Modeli (Optimization model)

Min

$$E [T_n] \quad (1)$$

$$k.s. (a n) (L + 2v) = A \quad (2)$$

$$0,2 \leq (a n) / (L + 2v) \leq 5,0 \quad (3)$$

$$n \in \mathbb{N}^+ \text{ and } L > 0 \quad (4)$$

Yukarıda verilen modelde Eş. 1 ile ortalama sipariş-toplama süresinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Eş. 2 toplam alanın belirli bir yüzey alanına eşit olması koşulunu ifade etmektedir. Eş. 3 deponun şekil faktörünün 0,2 ile 5,0 arasında bir değer alması kısıtını göstermektedir. Son olarak, Eş. 4 koridor sayısının bir pozitif tam sayı olmasını ve koridor uzunluğunun sıfırdan büyük olmasını garanti etmektedir.

3.2. Alt-Düzye Optimizasyon Modeli (Bottom-Level Optimization Model)

Farklı koridor sayısı ve uzunluğuna sahip her bir tasarım için optimal rota ve iş birliği stratejisinin farklı olduğu Şekil 3'te gösterilmiştir. Dolayısıyla, üst-düzye modeldeki değişken değerleri (koridor sayısı ve uzunluğu) değiştikçe alt-düzye modelde rotanın yeniden oluşturulması ve iş birliği stratejisinin yeniden belirlenmesi gerekmektedir. Dikkat edilirse, üst-düzye modeldeki karar değişkenleri alt-düzye modelde sadece zaman matrisi hesaplamalarında birer parametre olarak kullanılmaktadır. Böylece, üst-düzye modeldeki her bir farklı koridor sayısına sahip tasarım için oluşturulan zaman matrisi temelinde alt-düzye model çözümlenmekte ve en iyi sonuç üst-düzye modele aktarılarak en iyi tasarımın bulunması için kullanılmaktadır. Literatürde belirtildiği üzere STP GSP'nin özel bir varyantı olarak düşünülmektedir. Literatürde tanımlanan önceki problemlerden farklı olarak, rota oluşturulurken sipariş toplayıcı ve kobot arasındaki en iyi iş birliği stratejisinin de belirlenmesi gerekmektedir. Daha önce, sipariş-toplama aracının kullanılması durumunda araca binip inmenin hem zaman kaybına hem de daha fazla ergonomik problemlere sebep olduğu belirtilmişti. Bu yüzden, modele sipariş-toplama aracıma her bir iniş/biniş için harcanan zaman ilave edilmiş ve bu zaman 2 ile çarpılarak ergonomik problemler için de ayrıca zaman ceza olarak kullanılmıştır. Böylece, her bir tasarım için çözümlenmesi gereken ve optimal rota ile iş birliği stratejisini bulan model aşağıda verilmiştir.

3.2.1. Kümeler (Clusters)

- I : toplama lokasyonları (0 değeri K/T lokasyonuna karşılık gelmektedir; $i, j \in I$)

3.2.2. Parametreler (Parameters)

- v : bir koridorun genişliği (m)
 p : toplama listesinde bulunan sipariş sayısı (K/T noktası hariç)
 b : sipariş-toplama aracına her bir iniş/biniş için harcanan zaman (s)
 k : binek sipariş-toplama aracının veya kobotun ortalama sürüş hızı (m/s)
 s : sipariş toplayıcının ortalama yürüyüş hızı (m/s)
 $d_{i,j}$: durak lokasyonları i ve j arasındaki rektilineer uzaklık (m)
 $t_{i,j}$: durak lokasyonu i ve toplama lokasyonu j arasındaki öklid uzaklık (m)

3.2.3. Karar değişkenleri (Decision variables)

- $x_{i,j}$: 1, eğer kobot durak lokasyonları i ve j arasında sürülürse; 0, aksi taktirde
 $y_{i,j}$: 1, eğer sipariş toplayıcı durak lokasyonu i ve toplama lokasyonu j arasında yürürse; 0, aksi taktirde
 u_i : durak lokasyonu i 'nin ziyaret edildiği sıra

3.2.4. Optimizasyon modeli (Optimization model)

Min

$$\sum_{i \neq j, i=0}^p \sum_{j=0}^p \left[\left(\frac{d_{i,j}}{k} + \frac{v}{s} + 2b \right) x_{i,j} + \left(\frac{t_{i,j}}{s} + \frac{v}{2s} \right) y_{i,j} \right] \quad (5)$$

$$\text{k.s. } \sum_{i=0}^p (x_{i,j} + y_{i,j}) = 1 \quad \begin{array}{l} j \neq i, \\ j = 0, 1, \dots, p \end{array} \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^p (x_{i,j} + y_{i,j}) = 1 \quad \begin{array}{l} i \neq j, \\ i = 0, 1, \dots, p \end{array} \quad (7)$$

$$u_j - u_i \geq (p+1)(x_{i,j} + y_{i,j}) - p \quad \begin{array}{l} i \neq j, \\ i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, p \end{array} \quad (8)$$

$$1 < u_i < p \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

$$x_{i,j}, y_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} i = 0, 1, \dots, p \\ j = 0, 1, \dots, p \end{array} \quad (10)$$

$$u_i \in \mathbb{Z} \quad i = 1, \dots, p \quad (11)$$

Amaç fonksiyonu Eş. 5 ile optimal rota ve iş birliği stratejisi belirlenerek toplam sipariş-toplama zamanının minimize edilmesi hedeflenmektedir. Eş. 6 her bir durak lokasyonuna sadece bir durak lokasyonundan varılmasını garanti ederken, Eş. 7 her bir durak lokasyonundan başka bir durak lokasyonuna sadece bir çıkış olmasını gerektirmektedir. Sipariş toplayıcı için oluşabilecek alt turların elimine edilmesi için Miller-Tucker-Zemlin [69] tarafından tanımlanan Eş. 8 ve Eş. 9 kısıtları kullanılmaktadır. Son olarak, Eş. 10 karar değişkenlerinin sıfır veya bir değerlerini almasını sağlarken, kukla değişkeninin bütünlüğü Eş. 11 ile garanti edilmektedir.

4. Sayısal Sonuçlar ve Tartışma (Numerical Results and Discussion)

Üst-düzey modelde çözüm uzayı sınırlı olduğu için her bir koridor sayısı için alt-düzey model çözülerek tam enümersiyon metoduyla (tüm alternatiflerin karşılaştırılması) optimal sonuç bulunabilir. Diğer

tarafтан, GSP'nin bir varyantı olan alt-düzey modelin bir NP-Zor problem olduğu aşikârdır. Dolayısıyla, alt-düzey modelin büyük sipariş-toplama listeleri (65'ten büyük) için makul bir zaman içerisinde (120 dakika) çözülebilmesi mümkün değildir. O yüzden, Ratliff ve Rosenthal [29], Roodbergen vd. [37] ve Öztürkoğlu ve Hoşer [52] tarafından kullanılan DP modeli temelinde problem çözülmüş ve sayısal sonuçlar hesaplanmıştır.

Sonuçlar elde etmek için ortalama depo parametre değerleri belirlenmiş ve hesaplamalar bu parametreler ile yapılmıştır. Her bir toplama ve çapraz koridor genişliği 2,7 metre olarak belirlenmiştir. Ayrıca, yan yana bulunan iki koridorun merkezleri arasındaki uzaklık 5,3 metredir. Depolama yüzey alanı orta büyüklükte bir depo alanı düşünülerek 5.000 m² olarak alınmıştır. Dolayısıyla, şekil faktörünün minimum ve maksimum değerleri kullanılarak $(0,2 \leq (a \cdot n) / (L + 2v) \leq 5,0)$ koridor sayısının en az 6 (şekil faktörü 0,2) ve en fazla 29 (şekil faktörü 4,72) olacağı belirlenmiştir. Böylece, toplamda 24 farklı tasarım içerisinde en kısa sipariş-toplama süresini veren tasarım optimum olarak seçilmiştir. Elbette ki, yüzey alanı ve izin verilen şekil faktörü aralığı değiştirilerek bu sayı artırılabilir veya azaltılabilir.

Toplama listesinde bulunan sipariş sayısı rota ve iş birliği stratejisini değiştireceği için optimal koridor sayısını da değiştireceği öngörülebilir. O yüzden, toplama listesi büyüklüğünün 5 ile 160 arasında 5'er artarak değiştiği durumlar incelenmiştir. Böylece, 32 farklı liste büyüklüğü için sonuçlar hesaplanmıştır. Sipariş toplayıcının araçtan inmek veya araca binmek için attığı bir adım için fazladan 1 saniye harcadığı düşünülmüş ve ergonomik ceza uygulamak amacıyla bu süre 2 ile çarpılarak modele yansıtılmıştır. Binek sipariş-toplama aracının/kobotun ve sipariş toplayıcının ortalama hızlarının sırasıyla 1,8 ve 0,7 m/s olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca, durak lokasyonları arasındaki rektilineer veya durak lokasyonları ile toplama lokasyonları arasındaki öklid uzaklıklar hesaplanarak uzaklık matrisleri oluşturulmuştur.

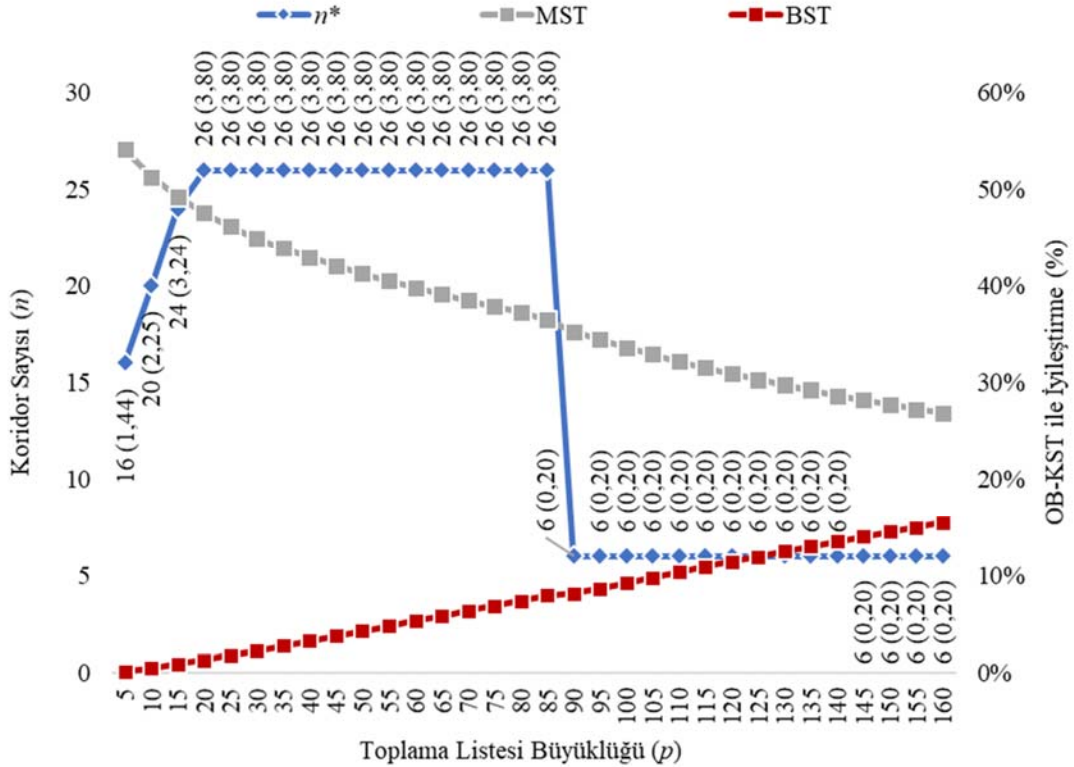
Sipariş-toplama listesi büyüklüğüne bağlı olarak sipariş-toplama listelerinin oluşturulmasında Monte Karlo simülasyonu kullanılmıştır. Özellikle, her bir sipariş-toplama listesindeki siparişlerin koridor ve koridor içerisindeki raf lokasyonları rastgele örnekleme belirlenmiş, her bir tasarım ve sipariş-toplama listesi büyüklüğü için 1.000 tekrar yapıldıktan sonra tur sürelerinin ortalamaları ile standart sapmaları hesaplanmıştır. Diğer taraftan, MST ve BST sistemlerinin performansları OB-KST sistemi ile doğru bir şekilde kıyaslamak için rastgele koridor ve raf lokasyonu üretmek için ortak bir tohum (seed) değeri kullanılmıştır. Böylece her bir tasarım ve sipariş büyüklüğü için 3 farklı sistem içinde çözüm yapılmıştır. Ayrıca, tasarımların tek-veya çift-bloklu olma durumları incelenmiştir. Toplamda, $24 \times 32 \times 1.000 \times 3 \times 2 = 4.608.000$ problem çözülerek sonuçlar hazırlanmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar %95 güvenle %1'den daha az bir yarı güven genişliğine (half-width) sahiptir.

Önceki bölümde tanımlanan alt-düzey optimizasyon modeli Ratliff ve Rosenthal [29], Roodbergen vd. [37] ve Öztürkoğlu ve Hoşer [52] tarafından kullanılan DP modeli temelinde Delphi 10.4 Topluluk Sürümü kullanılarak kodlanmıştır. Sonuçlar 64-bit Windows 10 işletim sistemi, 4 çekirdek, 8 GB RAM ve Intel i7-4790 3.60 GHz işlemcili bir bilgisayar kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 1'de tek- ve çift-bloklu depolarda her bir sistem türü ve tasarımı için yapılan 1.000 tekrarın sipariş-toplama listesi büyüklüğüne bağlı olarak ortalama çözüm süreleri saniye olarak verilmiştir.

İlk olarak orta-çapraz koridor bulunmayan tek-bloklu tasarım incelenmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere sipariş-toplama listesinin büyüklüğüne göre optimal şekil faktörü değişmektedir. Sipariş-toplama listesi büyüklüğünün 5, 10 ve 15 olması durumlarında

Tablo 1. Tek- ve çift-bloklı depolarda farklı sipariş-toplama listesi büyüklükleri için ortalama çözüm süreleri (s)
(Average solution times (s) for different pick-list sizes in one-block and two-blocks warehouses)

Tek-blok depo tasarımı						Çift-blok depo tasarımı									
Toplama Listesi Büyüklüğü	Tek-blok depo tasarımı			Toplama Listesi Büyüklüğü	Çift-blok depo tasarımı										
	MST	BST	OB-KST		MST	BST	OB-KST								
5	0,07	0,08	0,09	85	2,53	2,56	2,01	5	0,07	0,07	0,07	85	1,14	1,12	0,88
10	0,10	0,11	0,12	90	2,92	2,94	2,27	10	0,09	0,09	0,09	90	1,28	1,25	0,97
15	0,14	0,16	0,16	95	3,35	3,35	2,55	15	0,11	0,11	0,11	95	1,42	1,40	1,06
20	0,20	0,21	0,21	100	3,83	3,84	2,88	20	0,14	0,15	0,14	100	1,58	1,53	1,14
25	0,26	0,28	0,27	105	4,38	4,34	3,25	25	0,18	0,18	0,17	105	1,77	1,68	1,25
30	0,33	0,36	0,34	110	4,95	4,89	3,61	30	0,22	0,22	0,21	110	1,94	1,84	1,34
35	0,42	0,45	0,43	115	5,57	5,47	4,00	35	0,27	0,27	0,25	115	2,14	2,02	1,44
40	0,53	0,56	0,52	120	6,27	6,20	4,47	40	0,32	0,33	0,29	120	2,37	2,21	1,55
45	0,64	0,68	0,62	125	7,02	6,86	4,94	45	0,39	0,38	0,34	125	2,59	2,49	1,66
50	0,78	0,83	0,74	130	7,85	7,60	5,46	50	0,45	0,45	0,40	130	2,84	2,64	1,77
55	0,94	0,99	0,87	135	8,70	8,42	6,05	55	0,53	0,53	0,45	135	3,09	2,88	1,89
60	1,13	1,18	1,02	140	9,65	9,33	6,64	60	0,61	0,61	0,52	140	3,38	3,13	2,02
65	1,34	1,40	1,21	145	10,59	10,24	7,25	65	0,69	0,69	0,58	145	3,67	3,39	2,14
70	1,59	1,64	1,36	150	11,67	11,22	7,94	70	0,80	0,79	0,65	150	3,98	3,66	2,28
75	1,86	1,91	1,55	155	12,83	12,23	8,68	75	0,90	0,89	0,72	155	4,33	3,92	2,42
80	2,18	2,21	1,77	160	14,08	13,36	9,48	80	1,01	1,00	0,80	160	4,68	4,21	2,55

**Şekil 4.** OB-KST sistemi ile tek-blok depo tasarımı için optimal şekil faktörü ve iyileştirme oranı
(Optimal shape factor and percentage improvement for one-block warehouse design with AR-COP system)

optimal koridor sayısı (şekil faktörü) sırasıyla 16 (1,44), 20 (2,25) ve 24 (3,24) olacaktır. Eğer sipariş-toplama listesi büyüklüğü 20 ile 85 arasında ise optimal koridor sayısı 26 ve optimal şekil faktörü 3,80 olacaktır. Diğer taraftan sipariş-toplama listesi büyüklüğü 90'dan

fazla ise optimal koridor sayısı 6 ve optimal şekil faktörü minimum değer olan 0,20 olacaktır. Sipariş-toplama listesi küçük olduğunda optimal şekil faktörünün büyük olmasının sebebi uzunluğu kısa olan daha fazla koridorun bulunması ile koridorların bazılarında sipariş

düşmektedir. MST sistemine kıyasla optimal OB-KST sistemi en fazla %65,3'e kadar performansta iyileşme sağlamakta ve bu oran minimum %30,8'e kadar düşmektedir. Benzer şekilde BST sistemine kıyasla optimal OB-KST sistemi %22,7'ye kadar daha iyi performans göstermekte ve bu oran farklı sipariş-toplama listesi büyüklüğüne göre %12'ye kadar düşmektedir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Son yıllarda hızla gelişen dijital teknolojilerin sunmuş olduğu araçlar sayesinde online alışveriş platformları daha erişilebilir olmaya ve dolayısıyla daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Dahası, onlarca online alışveriş platformu arasındaki rekabetin farkında olan müşteriler her geçen gün daha fazla talepkâr olmaktadır. Bu yüzden, e-ticaret firmaları artan sipariş miktarı, müşteri istekleri ve küresel rekabete karşı sundukları ürünleri/hizmetleri iyileştirmek ve ürünlerin müşterilere ulaştırılması sürecinde gerçekleştirilen tüm faaliyetleri sürekli gözden geçirmeleri gerekmektedir. Bu nedenle, lojistik faaliyetler içerisinde yüksek operasyon süresi ve işçilik maliyetine sebep olan sipariş-toplama operasyonlarının iyileştirilmesi amacıyla son yıllarda depolarda kolaboratif robot (kobot) kullanımında artış gözlemlenmektedir. Kobotlar toplama noktaları arasındaki mesafe uzunsa sipariş toplayıcılar tarafından sürülebilirken, kısa mesafelerde otonom olarak kullanılabilir. Deponun şekline bağlı olarak toplama noktaları arasındaki mesafeler değişeceğinden kobotun sürülmesi veya otonom olarak kullanılması kararı her depo tasarımı için farklı olacaktır. Bu makale, kolaboratif robotların kullanıldığı depoların optimal tasarımlarını bulmak için iki seviyeli bir programlama modeli önermektedir. Üst-düzye model, sipariş-toplama süresini en aza indiren optimal şekil faktörünü (en-boy oranı) belirlemek için kullanılırken; alt-düzye model, optimal rota ile iş birliği stratejisini belirlemektedir.

Monte Carlo simülasyonu temelinde yapılan sayısal hesaplamalar sonucunda, şekil faktörünün sipariş-toplama tur süresini önemli ölçüde etkilediği ve optimal şekil faktörünün toplama listesi büyüklüğüne bağlı olarak değiştiği sonucuna varılmıştır. Sipariş-toplama listesinin küçük olduğu durumlarda deponun daha fazla toplama koridoruna sahip olmasının daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir (sipariş bulunmayan koridorlar turdan çıkarılacağı için sipariş-toplama süresinin kısaldığı öngörülebilir). Diğer taraftan, sipariş-toplama listesinin büyük olduğu durumlarda, tüm toplama koridorları ziyaret edileceği için toplama koridorları arasında geçiş yapmak için kullanılan çapraz koridorlarda harcanan zamanın kısaltılması adına optimal tasarımda daha az sayıda koridor olmasının daha fazla fayda sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Otonom Binilebilir Kolaboratif Sipariş-Toplama (OB-KST) sistemi için bulunan optimal tasarımın optimal Manuel Sipariş-Toplama (MST) ve Binilebilir Sipariş-Toplama (BST) sistemleri ile kıyaslaması yapılmıştır. Tek-bloklu depolarda, OB-KST sisteminin MST ve BST sistemlerine kıyasla sırasıyla %54,1 ve %15,5'e kadar iyileştirme sağladığı gösterilmiştir. Benzer şekilde, çift-bloklu depolarda bu iyileştirme oranının %53,1 (MST'ye kıyasla) ve %15,1 (BST'ye kıyasla) civarında olduğu hesaplanmıştır. Bu da OB-KST sisteminin MST veya BST sistemine göre büyük oranda sipariş-toplama süresinde iyileştirme sağladığını göstermektedir.

Yapılan çalışmada sadece araca biniş-iniş durumları ergonomik olarak düşünülmüştür. OB-KST sisteminin ergonomik olarak daha detaylı (yürüme ve kobotu ayakta sürmenin gibi) incelenmesi düşünülmektedir. Bu çalışmanın sınıf-bazlı veya devir-bazlı gibi farklı depolama stratejileri altında da incelenmesi planlanmaktadır. Birden fazla siparişin aynı anda toplanması durumunda deponun tasarımının nasıl değişeceği üzerine araştırma yapılması ayrıca düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma kapsamında incelenen Otonom Binilebilir Kolaboratif Sipariş-Toplama sistemi ile alakalı değerli bilgi paylaşımı için Dr. René De Koster'a teşekkür ederiz. Ayrıca, önerileriyle bu makalenin geliştirilmesine katkıda bulunan hakemlere şükranlarımızı sunarız. Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından desteklenmiştir [Hibe Numarası: 1059B191900637].

Kaynaklar (References)

1. Cop R., Oyan D., Küçük Yerleşim Yerlerindeki Tüketicilerin, İnternette Ürün Satın Alma Davranışları Üzerine Bir Uygulama, Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim Fakültesi Dergisi, 3 (1), 98-115, 2010.
2. Statista. E-Commerce Share of Total Global Retail Sales from 2015 to 2024. Key Figures of E-Commerce. <https://www.statista.com/statistics/534123/e-commerce-share-of-retail-sales-worldwide>. Released May, 2022. Retrieved April, 2023.
3. Ticaret Bakanlığı. 2021 Yılı İstatistikleri (Ocak-Aralık). E-ticaret Bilgi Platformu. <https://www.eticaret.gov.tr/istatistikler>. Yayın tarihi Temmuz, 2022. Erişim tarihi Nisan, 2023.
4. Gyllengahm K., Making Material Handling More Efficient - Reduction Of Non-Value-Adding Activities At A Wood Products Company, Master's Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Forest Sciences, Department of Forest Economics, Uppsala, 2020.
5. Establish. Logistics Cost and Service 2014. The Establish Davis Database - Logistics Cost And Service. <https://www.establishinc.com/establish-davis-database>. Released October, 2014. Retrieved April, 2023.
6. Lojistik Sözlük. Lojistik - Logistics. <http://www.lojistiksozluk.com/lojistik.html>. Yayın tarihi Kasım, 2011. Erişim tarihi Nisan, 2023.
7. Bild A., Svensson S., How third-party logistics provider can reduce non-value adding activities and total cost in the material handling process, Degree Project, Linnaeus University, Business Administration Program, Supply Chain Management, Kalmar, 2019.
8. Tompkins J.A., White J.A., Bozer Y.A., Tanchoco J.M.A., Facilities Planning, John Wiley & Sons, New York, USA, 2010.
9. Miller A. Order Picking for the 21st Century Voice vs. Scanning Technology. Manufacturing & Logistics IT Magazine. https://www.logisticsit.com/absolutenm/articlefiles/688-voice_vs_scanning.pdf. Released, 2004. Retrieved April, 2023.
10. Bartholdi J.J., Hackman S.T. Warehouse & Distribution Science: Release 0.98.1. Supply Chain and Logistics Institute. Released, August 2019. Retrieved April, 2023.
11. Crown Equipment Corporation. Crown QuickPick™ Remote: [Order Picking Technology]: Productivity, Motivation, Safety. Order Picking Technology QuickPick Remote Crown Lift Trucks UK. <https://www.crown.com/uk/forklifts/pdfs/brochures/order-picker-quickpick-remote-brochure-GB.pdf>. Released, August 2013. Retrieved April, 2023.
12. Eusebio D. How to Use a Pallet Jack: A Step-by-Step Guide. BigRentz-Think Big Blog. <https://www.bigrentz.com/blog/how-to-use-pallet-jack>. Released, May 2022. Retrieved April, 2023.
13. Associated. Case Handling Technologies and Applications. Automation. <https://www.associated-solutions.com/automation/case-handling>. Released, 2021. Retrieved April, 2023.
14. Roodbergen K.J., Vis I.F.A., A Survey of Literature on Automated Storage and Retrieval Systems, European Journal of Operational Research, 194 (2), 343-362, 2009.
15. Azadeh K., De Koster R., Roy D., Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments, Transportation Science, 53 (4), 917-945, 2019.
16. LogisticsIQ. Warehouse Automation Market. Research. <https://www.thelogisticsiq.com/research/warehouse-automation-market>. Released May, 2022. Retrieved April, 2023.
17. De Koster R. Cobot Order Picking Systems. INFORMS. <https://www.informs.org/Resource-Center/Video-Library/Webinars/Cobotic-Order-Picking-Systems>. Released March, 2021. Retrieved April, 2023.

18. Linde Material Handling. Saving Time and Energy in the Order Picking Process. Products. https://www.linde-mh.com/en/technical/News-Detail_4816317.html. Released Jun, 2021. Retrieved April, 2023.
19. Öztürkoğlu Ö., Hoşer D., A New Warehouse Design Problem and A Proposed Polynomial-Time Optimal Order Picking Algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1569-1588, 2018.
20. Caron F., Marchet G., Perego A., Optimal Layout in Low-Level Picker-To-Part Systems, *International Journal Production Research*, 38 (1), 101-117, 2000.
21. Grosse E.H., Glock C.H., Neumann W.P., Human Factors in Order Picking System Design: A Content Analysis, *IFAC-PapersOnLine*, 28 (3), 320-325, 2015.
22. Van Gils T., Ramaekers K., Caris A., De Koster R., 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, 2018.
23. Masae M., Glock C.H., Grosse E.H., Order Picker Routing in Warehouses: A Systematic Literature Review, *International Journal of Production Economics*, 224, 107564, 2020.
24. De Koster R., Le-Duc T., Roodbergen K.J., Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review, *European Journal of Operational Research*, 182 (2), 481-501, 2007.
25. Tuna G., Tunçel G., Depo Yönetiminde Sipariş Toplama Sistemleri: Bir Literatür Araştırması, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 14 (42), 15-31, 2012.
26. Cergibozan Ç., Tasan A.S., Order Batching Operations: An Overview of Classification, Solution Techniques, and Future Research, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30 (1), 335-349, 2019.
27. Yener F., Yazgan H.R., Optimal Warehouse Design: Literature Review and Case Study Application, *Computer and Industrial Engineering*, 129, 1-13, 2019.
28. Jaghbeer Y., Hanson R., Johansson M.I., Automated Order Picking Systems and The Links Between Design and Performance: A Systematic Literature Review, *International Journal of Production Research*, 58 (15), 4489-4505, 2020.
29. Ratliff H.D., Rosenthal A.S., Order-Picking in A Rectangular Warehouse: A Solvable Case of The Traveling Salesman Problem, *Operations Research*, 31 (3), 507-521, 1983.
30. Goetschalckx M., Ratliff H.D., An Efficient Algorithm to Cluster Order Picking Items in A Wide Aisle, *Engineering Costs and Production Economics*, 13 (4), 263-271, 1988.
31. Goetschalckx M., Ratliff H.D., Order Picking in An Aisle, *IIE Transactions*, 20 (1), 53-62, 1988.
32. Hall R.W., Distance Approximations for Routing Manual Pickers in A Warehouse, *IIE Transactions*, 25 (4), 76-87, 1993.
33. Caron F., Marchet G., Perego A., Routing Policies and COI-Based Storage Policies in Picker-to-Part Systems, *International Journal of Production Research*, 36 (3), 713-732, 1998.
34. De Koster R., Van Der Poort E., Routing Orderpickers in A Warehouse: A Comparison Between Optimal and Heuristic Solutions. *IIE Transactions*, 30 (5), 469-480, 1998.
35. Petersen C.G., An Evaluation of Order Picking Routeing Policies, *International Journal of Operations and Production Management*, 17 (11), 1098-1111, 1997.
36. Petersen C.G., The Impact of Routing and Storage Policies on Warehouse Efficiency, *International Journal of Operations and Production Management*, 19 (10), 1053-1064, 1999.
37. Roodbergen K.J., De Koster R., Routing Order Pickers in A Warehouse With A Middle Aisle, *European Journal of Operational Research*, 133 (1), 32-43, 2001.
38. Roodbergen K.J., De Koster R., Routing Methods for Warehouses With Multiple Cross Aisles, *International Journal of Production Research*, 39 (9), 1865-1883, 2001.
39. Gue K.R., Meller R.D., Skufca J.D., The Effects of Pick Density on Order Picking Areas With Narrow Aisles, *IIE Transactions*, 38 (10), 859-868, 2006.
40. Hsieh L., Tsai L., The Optimum Design of A Warehouse System on Order Picking Efficiency, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28 (5-6), 626-637, 2006.
41. Tunç S., Kutlu B., Zincidi A., Atmaca E., Improvement of Order Picking Process in Warehouse System, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23 (2), 357-364, 2008.
42. Pan J.C.H., Wu M.H., A Study of Storage Assignment Problem for An Order Picking Line in A Pick-and-Pass Warehousing System, *Computers and Industrial Engineering*, 57 (1), 261-268, 2009.
43. Pan J.C.H., Wu M.H., Throughput Analysis for Order Picking System With Multiple Pickers and Aisle Congestion Considerations, *Computers and Operations Research*, 39 (7), 1661-1672, 2012.
44. Glock C.H., Grosse E.H., Storage Policies and Order Picking Strategies in U-Shaped Order-Picking Systems With A Movable Base, *International Journal of Production Research*, 50 (16), 4344-4357, 2012.
45. Özçakar N., Görener A., Arkan V., Depolama Sistemlerinde Sipariş Toplama İşlemlerinin Genetik Algoritmalarla Optimizasyonu, *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 23 (71), 118-144, 2012.
46. Chen F., Wang H., Qi C., Xie Y., An Ant Colony Optimization Routing Algorithm for Two Order Pickers With Congestion Consideration, *Computers and Industrial Engineering*, 66 (1), 77-85, 2013.
47. Rao S.S., Adil G.K., Optimal Class Boundaries, Number of Aisles, and Pick List Size For Low-Level Order Picking Systems, *IIE Transactions*, 45 (12), 1309-1321, 2013.
48. Thomas L.M., Meller R.D., Analytical Models for Warehouse Configuration, *IIE Transactions*, 46 (9), 928-947, 2014.
49. Çelik M., Süral H., Order Picking Under Random and Turnover-Based Storage Policies in Fishbone Aisle Warehouses, *IIE Transactions*, 46 (3), 283-300, 2014.
50. Şahin Y., Eroğlu A., Sipariş Toplama ve Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemlerinin Hiyerarşik Çözümü, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Tasarım Dergisi*, 3 (1), 15-28, 2015.
51. Çelik M., Süral H., Order Picking in a Parallel-Aisle Warehouse With Turn Penalties, *International Journal of Production Research*, 54 (14), 4340-4355, 2016.
52. Öztürkoğlu Ö., Hoşer D., A New Warehouse Design Problem and A Proposed Polynomial-Time Optimal Order Picking Algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1569-1588, 2018.
53. Kiriş Ş., Deliktaş D., Üstün Ö., Order Picking Problem in A Warehouse with Bi-Objective Genetic Algorithm Approach: Case Study, *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 19 (1), 69-77, 2018.
54. Bottani E., Montanari R., Rinaldi M., Development and Testing of Software Tool for Warehouse Design and Picking Optimisation, *International Journal of Management and Decision Making*, 18 (2), 119, 2019.
55. Öztürkoğlu Ö., Hoşer D., An Evaluation of Order-Picking Tour Efficiency in Two-block Warehouses, Operations and Supply Chain Management: An International Journal, 74-87, 2019.
56. Diefenbach H., Glock C.H., Ergonomic and Economic Optimization of Layout and İtem Assignment of A U-Shaped Order Picking Zone, *Computers and Industrial Engineering*, 138, 106094, 2019.
57. Çobanoğlu İ., Güre İ., Bayram V., Data Driven Storage Location Assignment Problem Considering Order Picking Frequencies: A Heuristic Approach, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27 (4), 520-531, 2021.
58. Shekari Ashgari M., Gue K.R., A Puzzle-Based Material Handling System for Order Picking, *International Transactions in Operational Research*, 28 (4), 1821-1846, 2021.
59. Özden S.G., Smith A.E., Gue K.R., A Computational Software System to Design Order Picking Warehouses, *Computers and Operations Research*, 132, 105311, 2021.
60. Özden S.G., Smith A.E., Gue K.R., A Novel Approach for Modeling Order Picking Paths, *Naval Research Logistics*, 68 (4), 471-484, 2021.
61. Boysen N., De Koster R., Weidinger F., Warehousing in the E-Commerce Era: A Survey. *European Journal Operational Research*, 277 (2), 396-411, 2019.
62. Boysen N., De Koster R., Fülller D., The Forgotten Sons: Warehousing Systems for Brick-and-Mortar Retail Chains, *European Journal Operational Research*, 288 (2), 361-381, 2021.
63. Da Costa Barros Í.R., Nascimento T.P., Robotic Mobile Fulfillment Systems: A Survey on Recent Developments and Research Opportunities, Robotics and Autonomous Systems, 137, 103729, 2021.
64. Meller R., Nazzal D., Thomas L.M., Collaborative Bots in Distribution Centers, 15th IMHRC Proceedings, 17, 2018.
65. Azadeh K., Roy D., De Koster R., Dynamic Human-Robot Collaborative Picking Strategies, *Innovation and Management Science eJournal*, 2020.

66. Löffler M., Boysen N., Glock C., Schneider M., Picker Routing in AGV-Assisted Order Picking Systems, *INFORMS Journal on Computing*, 34 (1), 440-462, 2022.
67. Zhang M., Semar T., Grosse E.H., Winkelhaus S., Glock C.H., Mensch-Roboter-Kollaboration in der Kommissionierung, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetr.*, 116 (6), 372-376, 2021.
68. Pasparakis A., De Vries J., De Koster R., In Control or under Control? Human-Robot Collaboration in Warehouse Order Picking, *Innovation and Management Science eJournal*, 2021.
69. Miller C.E., Zemlin R.A., Tucker A.W., Zemlin R.A., Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems, *Journal of the ACM*, 7 (4), 326-329, 1960.

