

## Çok-Kapılı bir birim-yük depo tasarımında şekil ve orta-çapraz koridor konumunun değerlendirilmesi

### Evaluating the shape and the mid-cross-aisle location in a multi-dock unit-load warehouse design

Mahmut TUTAM<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.  
mahmut.tutam@erzurum.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 17.03.2021  
Kabul Tarihi/Accepted: 20.05.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 19.03.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.49779  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Son yıllarda, e-ticaretin gelişmesi ile her gün binlerce ürün sipariş verilmekte ve sipariş sayısındaki bu ciddi artışa rağmen müşteriler verdikleri siparişlerin aynı-gün veya ertesi-gün teslim edilmelerini beklemektedirler. Müşteri memnuniyetini etkileyen en önemli unsurlardan biri haline gelen teslimat süresindeki bu beklenti verdikleri siparişlerin müşterilere zamanında ulaştırılmaları için depolardaki operasyonların etkili ve verimli bir şekilde yürütülmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Depolarda en fazla zaman birim yüklerin raflara yerleştirilmesi ve raflardan toplanması için harcanmaktadır (depolama ve boşaltma). Depolama ve boşaltma için kat edilen seyahat mesafeleri deponun tasarımına, orta-çapraz koridor konumuna ve operasyon türüne bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada, tek-komut, çift-komut ve çapraz-sevkiyat operasyonlarının beklenen seyahat mesafeleri için ayrı depo uzayında matematiksel formülasyonlar geliştirilmiştir. Geliştirilen kesikli formüller kullanılarak karma-komut operasyonlar için bir tamsayı doğrusal olmayan programlama modeli oluşturulmuş ve oluşturulan optimizasyon modeli iki farklı senaryo için çözülmüştür. Sonuç olarak, depo tasarımının, orta çapraz koridor konumunun ve operasyon türünün beklenen seyahat mesafesi üzerindeki etkisi değerlendirilerek, iki bitişik duvar boyunca birden fazla kapıya sahip bir birim-yük depo tasarımında optimum orta-çapraz koridor konumu ve depo tasarımı belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Çoklu-kapılı birim-yük depo, Orta-çapraz koridor, Tek-komut operasyon, Çift-komut operasyon ve Çapraz-sevkiyat operasyonu.

#### Abstract

In recent years, thousands of products are ordered by online every day with the development of e-commerce and customers expect their orders to be delivered on the same day or the following day despite the significant increase in the number orders. This expectation in delivery times, becoming one of the most important factors that affect customer satisfaction, reveals the requirement of effective and efficient operations in warehouses to deliver orders to customers on time. In warehouses, the most time is spent in storing/retrieving products on/from shelves (storage and retrieval). The expected distances traveled for storing and retrieving vary depending on the warehouse design, the mid-cross-aisle location and operation type. In this study, mathematical formulations of expected distances for single-command, dual-command and cross-docking operations are developed in a discrete storage space. A nonlinear-integer programming model is developed for mixed-command operations by using discrete formulations developed and the optimization model is solved for two different scenarios. As a result, considering the effect on expected travel distance of the warehouse design, the mid-cross-aisle location and the operation type, the optimal location of the mid-cross aisle and warehouse design are determined in a unit-load warehouse having multiple dock doors along two adjacent walls.

**Keywords:** Multi-dock-door unit-load warehouse, Mid-cross-aisle, Single-command operation, Dual-Command operation and Cross-docking operation.

## 1 Giriş

Günümüz dünyasında yaşanan baş döndürücü teknolojik gelişmeler sadece günlük hayatı değil, iş hayatını da derinden etkilemektedir. Özellikle globalleşmenin ve e-ticaretin hızla değiştirdiği pazar koşulları firmaları yalnızca kendi ülkelerindeki rakipleriyle değil, küresel ölçekte tüm firmalarla rekabet etmek zorunda bırakmıştır. Böylece, online pazarlama stratejilerini geliştirerek müşteri potansiyellerini artırmaya yönelik firmalar müşteri taleplerindeki değişimlere uyum sağlamaya çalışmakta ve müşteri memnuniyetini etkileyen en önemli unsurlardan biri haline gelen teslimat sürelerini minimize ederek sipariş verilen ürünleri en kısa sürede (aynı-gün ya da ertesi-gün) müşterilerine ulaştırmak için tüm imkânlarını seferber etmektedirler. Nihayetinde, bu hızlı değişim sürecine süratle adapte olma isteği firmalara ek bir ekonomik yük getirmekte ve satılan birim ürünlerden ettikleri kâr marjlarının zamanla düşmesine sebep olmaktadır. Bu

yüzden, firmalar son yıllarda kâr marjlarını artıracak yeni stratejiler araştırmaya başlamışlardır. Açıkçası, bir firmanın kâr marjını artırmasının en kolay yolu piyasaya sürdüğü ürünün/ürünlerin fiyatında/fiyatlarında artış yapmak olarak gözükmektedir. Kısa vadede iyi bir çözüm gibi gözükse de fiyat artırımını, uzun vadede müşteri kayıplarına ve pazar payının daralmasına sebep olacağı için firmalar tarafından çok fazla tercih edilmemektedir.

Firmaların kâr marjlarını artırmak için uyguladıkları en önemli stratejilerden birisi ürünleri üretirken ve/veya üretilen ürünleri müşterilere ulaştırırken ortaya çıkan ve birim yüke ekonomik olarak katma değer sağlamayan maliyetleri elimine en azından minimize etmeye çalışmaktır. Bu strateji ancak firmaların tedarik zinciri süreçlerini ve lojistik operasyonlarını tekrar tekrar gözden geçirerek iyileştirmeleri ile başarılabilir. Tedarik zinciri yönetimi içerisinde ürün depolama, sipariş-toplama, sipariş paketleme ve siparişi müşteriye gönderme gibi üretilen birim yüke ekonomik bir değer katmayan depolama

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

maliyetlerinin toplam satışlar içerisindeki payının %6 ile %16 arasında olduğu tahmin edilmektedir [1]. Sipariş-toplama faaliyetleri depolama maliyetlerinin en az %20'sini ve en çok %50'sini oluşturmaktadır; bu maliyet depoların tasarımlarının optimize edilmesi ile %10 ile %30 arasında azaltılabilmektedir [2]. Diğer taraftan, depolama faaliyetleri sadece birim yüklerin depolanması, muhafaza edilmesi ve sipariş verildiğinde raflardan toplanarak müşterilere gönderilmesi amacıyla değil; e-ticaretin gelişmesiyle siparişlerinin aynı-gün veya ertesi-gün teslim edilmesini bekleyen müşterilere birim yüklerin zamanında ulaştırılması amacıyla yapılmaktadır. Dolayısıyla, firmalar açısından birim yükler ekonomik olarak değer katmayan, dahası ciddi maliyetler oluşturan depolar, müşteri memnuniyeti açısından ciddi bir önem arz etmektedir.

Depolar içerisindeki en zaman alıcı faaliyet birim yüklerin raflara yerleştirilmesi (depolama) ve raflardan toplanması (boşaltma) faaliyetleridir. Son yıllarda, depolama alanlarının büyümesi ve daha fazla depo kapısına ihtiyaç duyulması Depolama/Boşaltma (D/B) faaliyetleri için depo içerisinde kat edilen mesafeleri ciddi bir şekilde artırmaktadır. Bu artışa bağlı olarak, depolardaki beklenen seyahat süresi artmakta ve birim yüke ekonomik değer katmayan D/B faaliyet süreleri depolardaki toplam faaliyet süresinin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır [3].

D/B faaliyetlerinin paletlerle yapıldığı birim-yük depolarda genellikle üç operasyon türü kullanılmaktadır: tek-komut, çift-komut ve çapraz-sevkiyat. Tek-komut operasyonda ya D/B materyali bir depo kapısındaki bir birim yükü bir depolama lokasyonuna bırakıp tekrar depo kapısına dönmesi ya da bir depo kapısındaki D/B materyalinin sipariş verilen bir birim yükü bir boşaltma lokasyonundan alarak depo kapısına bırakması şeklinde gerçekleşir (depolama lokasyonu ile boşaltma lokasyonu aynı depo lokasyonunu tanımlamakta olup gerçekleştirilecek operasyon türüne göre depo lokasyonu isimlendirilmektedir). Çift-komut operasyonda ise D/B materyali ilk önce bir depo kapısındaki bir birim yükü depolama lokasyonuna bırakması, hemen akabinde (depo kapısına geri dönmeden) sipariş verilen bir birim yükü boşaltma lokasyonundan alarak depo kapısına bırakması şeklinde gerçekleşir. Her iki operasyon türünde de birim yüklerin önce depolanması sonra boşaltılması gerekmektedir. Bu yüzden, D/B faaliyetleri sebebiyle oluşan maliyet ve zaman kayıplarının bir kısmını elimine etmek için çapraz-sevkiyat operasyonları kullanılmaktadır. Ne var ki, çapraz-sevkiyat operasyonunda birim yükler sipariş gelinceye kadar muhafaza edilmez. Birim yükler ya bir araçtan diğer bir araca transfer edilir veya transfer edilmek için çok kısa süreli olarak bekletilir (ürünler depolama alanında değil geçici bir süre için önceden belirlenen ve kapılara yakın bir tampon bölgede tutulabilir) [4].

Tek-komut operasyonu her bir birim yük için hem depolama hem boşaltma faaliyeti gerektirdiği için ciddi bir zaman kaybına sebep olmakta ve bu operasyon türü talepler birleştirilerek (çift-komut operasyon gibi) minimize edilmeye çalışılmaktadır. Diğer taraftan, çift-komut operasyon seyahat zamanlarında ciddi iyileştirmeler sağlanmasına karşın, depolama ve boşaltma işlemlerinin eşleştirilemediği durumlarda (aynı anda depolama ve boşaltma talebi olmaması, aynı anda iki depolama veya iki boşaltma talebi olması gibi) uygulanamamaktadır. Ayrıca, en az maliyet oluşturan ve zaman kaybını minimize eden çapraz-sevkiyat operasyonu birim yüklerin ne zaman talep edilecekleri tahmin edilemediği için her zaman uygulanması mümkün değildir. Bu yüzden, tek-komut, çift-komut ve çapraz-sevkiyat operasyonlarının avantajlarından yararlanmak için depolarda

bu üç operasyon tipi genellikle aynı anda uygulanmaktadır (karma-komut operasyon).

Bir depo içerisinde kat edilen seyahat mesafesinin beklenen değeri deponun şekli, koridor konfigürasyonu, orta-çapraz koridorun konumu, uygulanan operasyon türü vb. özelliklere bağlı olarak değişmektedir [5-7]. Literatürde yapılan çalışmalarda bu özelliklerden birçoğu göz ardı edilerek veya sadece biri düşünülerek modeller oluşturulmuş ve kıyaslamalar yapılmıştır. Bu çalışmada, literatürde yapılan varsayımlar (deponun eninin boyunun iki katı olması, deponun sadece bir duvarında tek bir kapı bulunması, orta-çapraz koridorun deponun tam merkezinde olması, depo kapılarının koridorlara denk gelmesi) aynı anda ortadan kaldırılarak matematiksel formüller türetilmiştir. Özellikle, literatürdeki çalışmalar depolarda tek bir operasyon türünün kullanıldığı varsayımıyla yapılmasına karşın pratikte depoların çoğunda aynı anda tek-komut, çift-komut ve çapraz-sevkiyat operasyonlarının kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden literatürde ilk defa, karma-komut operasyon (tek-komut, çift-komut ve çapraz sevkiyat operasyonlarını aynı anda içeren) uygulanan ve pratikte çokça uygulaması bulunan bir birim-yük deponun optimum tasarımı (iki bitişik duvar boyunca birinden fazla kapıya sahip) araştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları iki farklı karma operasyon türüne göre (tek-komut ve çift-komut operasyon odaklı) verilmesine rağmen, modellerde operasyonlar için verilen olasılık değerleri değiştirilerek farklı karma-komut operasyon türleri için sonuçlar kolayca elde edilebilir.

Çalışmanın bundan sonraki bölümünde orta-çapraz koridorun konumu ve depo tasarımı üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Sonraki bölümde, araştırmada kullanılan depo tasarımı sunulmuş ve matematiksel modeller oluşturulurken kullanılan notasyon tanımlanmıştır. Çalışmanın devam eden bölümünde farklı operasyon türlerinin beklenen seyahat süreleri için ayrı depo uzayında matematiksel modeller türetilmiştir. Daha sonra, geliştirilen kesikli formüller bir tamsayı doğrusal olmayan programlama modelinde amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış ve kısıtlar ilave edilerek optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Sonraki bölümde, pratikte karşılaşılan parametre değerleri kullanılarak iki farklı karma-komut operasyon türü için optimizasyon modeli çözülmüş ve sayısal sonuçlar tartışılmıştır. Son bölümde, elde edilen sonuçlar temelinde orta-çapraz koridor konumunun ve depo tasarımının seyahat mesafesi üzerindeki etkisi özetlenmiş ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2 Literatür taraması

Son yıllarda e-ticaret satışlarının toplam perakende satışlar içerisindeki oranının artışı ile depolardaki rafların yerleşim planı ve koridor konfigürasyonları üzerine onlarca bilimsel çalışma yapılmış ve depolar içerisinde kat edilen mesafelerin minimize edilmesi için farklı öneriler sunulmuştur. Bu bölümde literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiş yapılan çalışmanın önceki makalelerden farkı belirtilmiştir.

Sabit kapasiteye sahip bir depoda bulunan bir ürünün optimum satın alma, depolama ve satış politikalarını bulmak için analitik modeller ilk defa Cahn [8] tarafından geliştirilmiştir. Problemi Charnes ve Cooper [9] lineer programlama ile çözerken, Bellman [10] ve Dreyfus [11] dinamik programlama kullanarak çözmüşlerdir. Mayer [12] literatürde tek-komut operasyon varsayımıyla yapılan çalışmalara ilaveten ilk defa çift-komut operasyonundan bahsetmiş ve çift-komut operasyon türü kullanılması durumunda optimal depo tasarımının eni

boyundan büyük bir dikdörtgen şeklinde olması gerektiği sonucuna varmıştır. Adanmış depolama politikasının uygulandığını ve sipariş başına hacim indeksine göre birim yüklerin depolama lokasyonlarına yerleştirildiğini varsayarak, Malmborg ve diğ. [13] depolarda çift-komut operasyon uygulamasını incelemişler ve dört farklı test problemi üreterek depo tasarımını geliştirmeye çalışmışlardır. Malmborg ve Krishnakumar [14] çift-komut operasyonlar için maliyet modellerini türetmişler ve bir deponun optimize edilmesinin stok seviyesine ve sipariş toplama maliyetlerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Malmborg ve Krishnakumar [15] sipariş başına hacim indeksi temelinde oluşturulan tasarımı L-şekilli ve Organ Borusu tasarımlarıyla karşılaştırmışlardır.

Moder ve Thornton [16] birim-yük depolarda paletlerin yerleştirilmesini ve alan kullanımını etkileyen faktörleri incelemiş ve koridor genişliği ile alan kullanım verimliliğini etkileyen değişkenler temelinde matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Sürekli depo uzayı, rastgele depolama politikası ve tek-komut operasyon varsayımları altında, Francis [17] ilk kez tek-kapılı bir birim-yük deposunda beklenen seyahat süresinin matematiksel modelini geliştirmiştir. Ayrıca, tek-kapı varsayımıyla rektilineer metrikte beklenen seyahat süresini minimize eden optimal şekil faktörünün 2'ye 1 olduğunu ispat etmiştir. Francis [18] beklenen seyahat süresinin minimize edilmesi için yeterli ve gerekli koşulları belirlemiştir. Berry [19] iki farklı depo tasarımı için gerekli temel faktörleri araştırmış ve 10 farklı faktörün depo tasarımını nasıl etkilediğini analiz etmiştir. White ve Francis [20] sürekli depo uzayında bir deponun optimum boyutlarının belirlenmesi için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. White [21] radyal koridor tasarımının beklenen seyahat mesafesi üzerindeki etkisini incelemiş ve radyal koridor modelinde koridor sayısı arttıkça rektilineer hareketin öklid hareketine dönüştüğü sonucuna varmıştır. Mallette ve Francis [22] sürekli uzay varsayımı yerine ayırık uzay varsayımında bir deponun optimum boyutları ve tasarımının belirlenmesi için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Francis ve White [23] kontur çizgilerini kullanarak rektilineer, öklid, çebişev ve kare-öklid metrikleri temelinde seyahat edilen mesafe için matematiksel modeller geliştirmişler ve beklenen seyahat süresini minimize edecek optimum şekil faktörünü belirlemişlerdir.

Bassan ve diğ. [24] literatürde ilk defa D/B lokasyonlarının yerleşim düzenlerini göz önünde bulundurmuş ve Şekil 1(a)'da gösterildiği gibi D/B lokasyonlarının kapıların bulunduğu duvara dikey veya Şekil 1(c)'de gösterildiği gibi yatay olarak yerleştirilmesi durumlarını incelemişlerdir. Birden fazla kapıya sahip depolarda kapıların olabildiğince depo merkezine yakın lokasyonlara yerleştirilmesi gerektiğini göstermişlerdir. Ratliff ve Rosenthal [25] Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi ilk defa çift taraflı seyahat yapılan koridorlara ve bir orta-çapraz koridora sahip bir depo tasarımında sipariş-toplama rotasının belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Goetschalckx ve Ratliff [26] depolarda siparişlerin gruplandırılması durumunu incelemişler; sipariş toplayıcısının aracını koridorun merkezinde bırakıp koridorun her iki tarafında bulunan D/B lokasyonlarına yürüdüğünü varsayarak optimal duruş-kalkış sayısını ve yerlerini belirlemişlerdir. Goetschalckx ve Ratliff [27] koridorun iki tarafına da ulaşmak için aracın sipariş-toplayıcı ile beraber hareket ettiğini varsayarak, koridor içerisinde çapraz ve düz hareket yapılması durumlarını incelemişlerdir. Rana [28] dar koridorlara sahip sipariş-toplama depolarında sipariş-toplama tur sayısını ve her bir

turda toplanacak kutu sayısını belirlemek için bir algoritma geliştirmiştir.

De Koster ve van der Poort [29] yaptıkları çalışmada birden fazla kapıya sahip depo tasarımları için sipariş-toplama rotasını belirlemişlerdir. Roodbergen ve De Koster [30] iki bloklu sipariş-toplama tasarımlarında en iyi sipariş-toplama rotasının lineer zamanda bulunacağını göstermişlerdir. Roodbergen ve De Koster [31] birden fazla bloklu depolarda optimal sipariş-toplama rotasını belirlemek için sezgisel yöntemler geliştirmişlerdir. Depolara eklenecek orta-çapraz koridorların seyahat mesafesini azaltabileceği ama gereğinden fazla koridor eklenmesi durumunda seyahat mesafesinin artacağı sonucuna varmışlardır.

Literatürde ilk defa Berry [19] kapıya dik veya paralel olmayan koridor yerleşiminden bahsetmiş ve diyagonal koridor yerleşimini incelemiştir. Yiğit ve Güner [32] kara havacılık depolarında ihtiyaç duyulan parçaların atölyelere en kısa yoldan dağıtılması için bir tam sayılı programlama modeli oluşturmuş ve LINGO paket programı kullanarak modeli çözmüşlerdir. Gue ve Meller [33] geleneksel bir koridor yapısına sahip olmayan yeni iki depo tasarımı önermişlerdir: balık kılıcı ve uçan-v tasarımları. Pohl ve diğ. [34] önerilen tasarımları simülasyon yöntemi ile analiz etmişler ve balık kılıcı tasarımının %15.9 civarında iyileştirme sağlarken uçan-v tasarımının yaklaşık %12.5 seyahat süresini kısalttığını göstermişlerdir. Gue ve Meller [35] yeni önerilen tasarımların pratikte uygulamalarını göstermiş ve yeni tasarımların depolardaki maliyetleri düşürdüğü için daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Balık kılıcı tasarımı beklenen seyahat mesafesinde daha fazla iyileştirme sağladığı için Pohl ve diğ. [36] bu tasarıma odaklanmış ve çift-komut operasyonlar için %10 ile %15 arasında bir iyileştirme sağladığını bulmuşlardır. Pohl ve diğ. [37] geleneksel olmayan tasarımlarda ürünlerin farklı D/B devir oranına sahip olmasını durumunu incelemişlerdir. Gue ve diğ. [38] birden çok kapıya sahip modifiye ve tersine uçan-v tasarımları için analitik modeller oluşturmuş ve bu tasarımların geleneksel tasarımlara kıyasla %3-%6 arasında daha iyi performans gösterdiklerini belirtmişlerdir. Cardona ve diğ. [39] balık kılıcı tasarımında diyagonal koridorun eğimini bulmak için optimum koşulları belirlemişlerdir. Öztürkoğlu ve diğ. [40] geleneksel olmayan depolarda koridorların herhangi bir açı ile yerleştirilmesi durumunu incelemiş ve bir, iki yada üç çapraz koridor içeren optimum tasarımları bulmuşlardır. Jiang ve diğ. [41] kayar palet raf sisteminin balık kılıcı tasarımına entegre edilmesini incelemiş ve ürünlerin beklenen taşıma süresinde iyileştirme sağlandığı gözlemlemişlerdir. Clark ve Meller [42] önceki çalışmaların göz ardı ettiği deponun yüksekliğini modellere eklemiş ve depo yüksekliği arttıkça geleneksel olmayan tasarımların sağladığı iyileşmenin azaldığını göstermişlerdir.

Öztürkoğlu ve diğ. [43] ağ tabanlı bir tasarım modeli oluşturmuş ve parçacık sürü optimizasyonunu kullanarak çapraz koridorlar için en iyi açığı belirlemeye çalışmışlardır. Cardona ve diğ. [44] balık kılıcı tasarımında optimum koridor açıklıklarını belirlemek için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Bortolini ve diğ. [45] geleneksel olmayan depo tasarımlarında adanmış depolama politikasını incelemiş ve optimum diyagonal koridor sayısını hesaplamışlardır. Öztürkoğlu ve diğ. [7] Chevron tasarımında farklı malzeme akışlarının geleneksel tasarımlara göre beklenen seyahat mesafesinde ne kadar iyileştirme sağladığını araştırmışlardır. Bortolini ve diğ. [46]

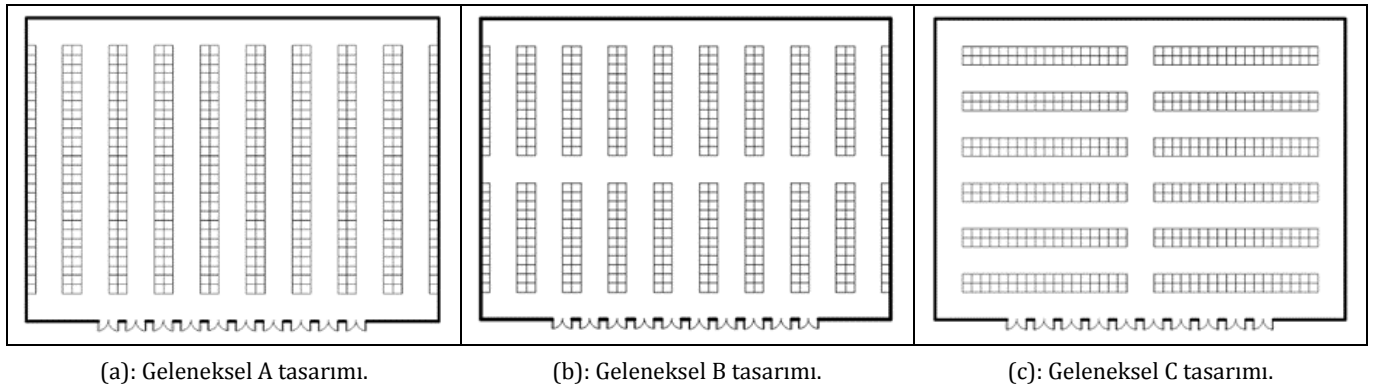
tek- ve çift-komutlu operasyonların herhangi bir kombinasyonu için diyagonal koridorun optimum pozisyonu belirlemek için modeller oluşturmuşlardır. Bortolini ve diğ. [47] üç farklı geleneksel olmayan koridor tasarımının performanslarını geliştirdikleri bir uygulama ile değerlendirmişlerdir. Kocaman ve diğ. [48] toplama ve çapraz koridorların herhangi bir açıda olması durumunu incelemiş ve bu açının optimum tasarım üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Geleneksel olmayan depo tasarımları beklenen seyahat mesafesinde iyileşme sağlamasına rağmen, diyagonal koridor oluştururken raf düzeninde ortaya çıkan problemler ve dahası depo alanında oluşan kayıplar sebebiyle pratikte çok fazla tercih edilmemektedir. Bu yüzden, Pohl ve diğ. [49] bir kapıya sahip geleneksel depo tasarımlarında (Şekil 1'deki Geleneksel A, B ve C Tasarımları) tek-ve çift-komut operasyonlar için beklenen seyahat süresinin matematiksel modellerini çıkarmış ve beklenen seyahat süresini minimize eden optimal şekil faktörünü belirlemişlerdir. Ayrıca, tek kapı varsayımı altında Geleneksel Tasarım B'deki orta-çapraz koridorun konumu inceleyerek, tek-komut operasyonlarda orta-çapraz koridorun beklenen seyahat süresini artırdığı için depo tasarımına eklenmemesi ve çift-komut operasyonlarda orta-çapraz koridorun deponun ortası ile üst-çapraz koridor arasında bir yere yerleştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Berglund ve Batta [51] D/B politikasına bağlı olarak belirlenen D/B lokasyonlarının olasılık kütle fonksiyonları temelinde orta-çapraz koridorun optimal lokasyonunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak, orta-çapraz koridorun en yoğun kullanılan D/B lokasyonuna yakın yerleştirilmesi gerektiğini ve böylece %6 ile %9 arasında bir kazanç sağlanacağını göstermişlerdir. Thomas ve Meller [50] tarafından yapılan araştırmada sonsuz kapı varsayımı ile Geleneksel A Tasarımı için optimal şekil faktörünün 1,5 ile 2,0 arasında olması gerektiği belirtilmiştir.

Son yıllarda inşa edilen depoların çoğunda onlarca (hatta bazılarında yüzden fazla) kapı bulunmaktadır. Bu yüzden, Tutam ve White [5] önceki çalışmaların pratikteki uygulamaları yansıtmadığını iddia etmişler ve tek kapı varsayımı altında yapılan kıyaslamaların doğru sonuçlar ortaya çıkarmadığı göstermişlerdir. Ayrıca, optimal şekil faktörünün (en-boy oranı) kapı sayısına, kapıların yerine ve kapılar arasındaki mesafeye bağlı olarak değiştiği göstererek optimal şekil faktörünün 1.5'den küçük olabileceği gibi 2,0'dan büyük olabileceğini matematiksel olarak ispatlamışlardır. Yaptıkları

çalışmayı genişleterek, Tutam ve White [6] tesis içerisinde rafların kapılara göre yerleşiminin de optimal şekil faktörünü etkilediğini göstermişler ve geleneksel depo tasarımları karşılaştırılarak her birinin en iyi performans gösterdikleri durumları belirlemişlerdir. Toktaş ve Okçuoğlu [52] bir beyaz eşya firmasına ait deponun optimum tasarımını belirlemek için matematiksel modeller oluşturmuşlardır. Ang ve Lim [53] adanmış depolama politikası uygulanan depolarda depolama sınıflarının yerleşimini optimize etmek için frekansa dayalı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Cardona ve Gue [54-55] depo raf yüksekliklerinin palet yüksekliklerinin dağılımına bağlı olarak belirlenmesi durumunu incelemişler ve birden çok raf yüksekliğine sahip tasarımların nasıl oluşturulacağını belirten bir metod önermişlerdir.

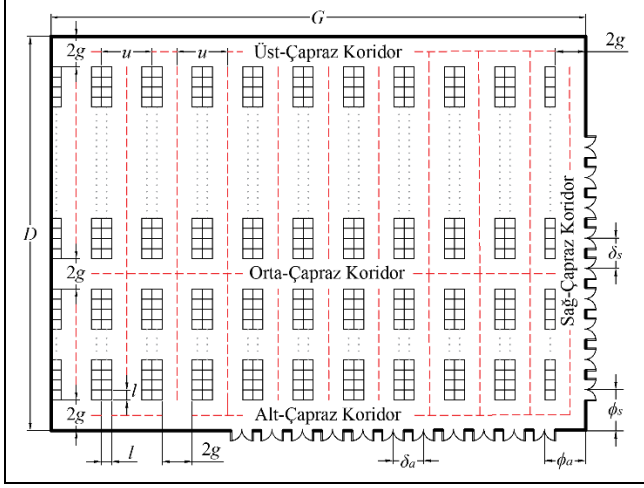
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde depo tasarımlarında yapılan düzenlemeler beklenen seyahat mesafesinin iyileştirilmesine imkân vermektedir. Yapılan çalışmaların birçoğunda depoların tasarımları çeşitli varsayımlar altında incelenmiştir (deponun eninin boyunun iki katı olması, deponun sadece bir duvarında tek bir kapı bulunması, orta-çapraz koridorun deponun tam merkezinde olması, depo kapılarının koridorlara denk gelmesi, tek operasyon türünün kullanılması gibi). Bu varsayımların aynı anda kaldırılması halinde deponun optimal şeklinin nasıl olacağı ve optimal çapraz-koridorunun nasıl konumlandırılacağı ve operasyon türü değiştiğinde optimal tasarımın ve çapraz koridorun nasıl etkileneceği bu çalışmanın araştırdığı sorulardır. Önceki çalışmalardan farklı olarak, literatürde ilk defa, iki bitişik duvarda birden fazla kapıya sahip (her iki duvardaki kapı sayıları farklı olabilir) olan bir birim-yük deposu için farklı depo uzayında kesikli formüller oluşturulmuştur. Ayrıca, pratikte daha fazla uygulanan karma-komut operasyon (tek-komut, çift-komut ve çapraz-sevkiyat operasyonlarının farklı kombinasyonları) için optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu olarak kullanılmak üzere genel bir formülasyon türetilmiştir. Dahası, orta-çapraz koridor konumu için yeni bir karar değişkeni modele eklenerek, optimum şekil faktörünün yanı sıra orta-çapraz koridorun konumu optimum olarak belirlenmiştir. Özetle, bu çalışmada oluşturulan formüller ve optimizasyon modeli kullanılarak bir veya daha fazla duvara yerleştirilen herhangi bir sayıdaki kapı için istenilen operasyon türü veya kombinasyonuna göre optimum depo tasarımı ve çapraz koridor konumu belirlenebilir.



Şekil 1. Geleneksel depo tasarımları.  
Figure 1. Traditional warehouse designs.

### 3 Notasyon

Matematiksel formülasyonların oluşturulurken kullanılan notasyon Şekil 2'de gösterilmiş ve aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:



Şekil 2. Araştırılan depo tasarımı ve notasyon.

Figure 2. Warehouse design considered and notation.

- $g$  = Bir D/B koridor veya bir çapraz koridor genişliğinin yarısı,  
 $l$  = Bir D/B lokasyonu genişliği (D/B lokasyonlarının kare oldukları varsayılmaktadır),  
 $u$  = İki bitişik D/B koridorunun merkezleri arasındaki uzaklık ( $u=2g+2l$ ),  
 $t$  = Toplam D/B koridoru sayısı (sağ-çapraz koridor dahil değil, örneğin Şekil 2'de  $t=10$ ),  
 $s_1$  = Bir D/B koridorunun bir tarafındaki ve bir seviyesindeki alt-çapraz koridor ile orta-çapraz koridor arasında bulunan toplam D/T lokasyonu sayısı,  
 $s_2$  = Bir D/B koridorunun bir tarafındaki ve bir seviyesindeki orta-çapraz koridor ile üst-çapraz koridor arasında bulunan toplam D/T lokasyonu sayısı,  
 $G$  = Depo genişliği ( $G=t u+2 g$ ),  
 $D$  = Depo derinliği ( $D=(s_1+s_2) l+6 g$ ),  
 $A$  = Toplam depo alanı ( $A=G D$ ),  
 $F$  = Şekil faktörü ( $F=G / D$ ),  
 $k_a$  = Alt-Çapraz koridora açılan kapı sayısı,  
 $k_s$  = Sağ-Çapraz koridora açılan kapı sayısı,  
 $\delta_a$  = Alt-Çapraz koridora açılan iki bitişik kapının merkezleri arasındaki uzaklık,  
 $\delta_s$  = Sağ-Çapraz koridora açılan iki bitişik kapının merkezleri arasındaki uzaklık,  
 $\phi_a$  = Sağ-Çapraz koridora açılan kapıların bulunduğu depo duvarı ile bu duvara en yakın alt-çapraz koridora açılan kapının merkezi arasındaki mesafe,  
 $\phi_s$  = Alt-Çapraz koridora açılan kapıların bulunduğu depo duvarı ile bu duvara en yakın sağ-çapraz koridora açılan kapının merkezi arasındaki mesafe,  
 $B[T]$  = Tek-Komut operasyon için beklenen seyahat mesafesi,

- $B[L]$  = İki D/B lokasyonu arasındaki beklenen seyahat mesafesi,  
 $B[C]$  = Çift-Komut operasyon için beklenen seyahat mesafesi,  
 $B[S]$  = Çapraz-Sevkiyat operasyonu için beklenen seyahat mesafesi,  
 $B[K]$  = Karma-Komut operasyon için beklenen seyahat mesafesi.

### 4 Matematiksel model

Bu bölümde optimizasyon modelinde kullanılmak üzere farklı operasyon türleri göz önünde bulundurularak beklenen seyahat mesafesini hesaplayan matematiksel formülasyonlar türetilmiştir. Formüller zemin seviyesinin üzerindeki D/B lokasyonlarına yapılan seyahat göz ardı edilerek iki boyutlu düzlem temelinde oluşturulmuştur. Tek-komut operasyonla beklenen seyahat mesafesi hesaplanırken ilk önce deponun her bir duvarında bulunan kapılar için ayrı ayrı modeller oluşturulmuş ve deponun bir duvarında bulunan kapılardan giren her bir birim yükün uzun vadede deponun diğer duvarında bulunan kapılardan ayrıldığı düşünülerek bir matematiksel formül geliştirilmiştir. Buna ilaveten, iki D/B lokasyonu arasındaki mesafenin beklenen değerini hesaplayan bir matematiksel model türetilmiş ve tek-komut operasyon için geliştirilen modelle toplanarak çift-komut operasyonla beklenen seyahat mesafesini hesaplayan matematiksel model oluşturulmuştur. Ayrıca, çapraz-sevkiyat operasyonları için bir formül oluşturulmuştur. Operasyon türlerinin uygulanma olasılıkları hesaba katılarak oluşturulan formüller temelinde karma-komut operasyon için genel bir matematiksel ifade elde edilmiştir.

#### 4.1 Tek-Komut operasyonlar için beklenen seyahat mesafesi

Tek-komut operasyonla beklenen seyahat mesafesi için matematiksel model oluşturulurken, öncelikle alt-çapraz koridora açılan kapılar için formüller türetilmiş ve sonrasında sağ-çapraz koridora açılan kapılar için oluşturulan modellerle birleştirilmiştir. Her bir D/B lokasyonunun seçilme olasılığının eşit olduğu varsayımıyla, D/B materyali rektilineer bir rota izleyerek yatay (x eksenini doğrultusunda) ve dikey (y eksenini doğrultusunda) seyahat etmektedir. Yatay ekseninde oluşacak toplam seyahat mesafesi hesaplanırken alt-çapraz koridora açılan tüm kapılardan bütün D/B koridorlarına ulaşmak için kat edilen mesafe toplanmış ve iki ile çarpılmıştır (D/B lokasyonuna gidiş ve kapı lokasyonuna geri dönüş). Elde edilen toplam koridor ve kapı sayısının çarpımıyla (kapı sayısı ile toplam koridor sayısının çarpımı kadar kombinasyon olduğundan) bölünerek alt-çapraz koridora açılan herhangi bir kapıdan herhangi bir D/B lokasyonuna ulaşmak için yatay ekseninde kat edilmesi gereken ortalama seyahat mesafesi bulunmuştur (tüm işlemlerde kapılar ve D/B koridorları soldan sağa doğru numaralandırılmıştır). Herhangi bir kapıdan dikey doğrultuda yapılacak seyahat mesafesi tüm kapılar ve koridorlar için aynıdır. Bu yüzden sadece bir kapı ve koridor için dikey doğrultuda yapılacak hesaplama tüm depo için geçerli olacaktır. Dikey ekseninde oluşacak ortalama seyahat mesafesi hesaplanırken herhangi bir kapıdan herhangi bir koridordaki tüm D/B lokasyonuna ulaşmak için kat edilen toplam mesafe hesaplanmış ve toplam D/B lokasyon sayısına bölünmüştür.

Yatay ve dikey doğrultuda yapılan ortalama seyahat mesafeleri toplanarak alt-çapraz koridorda bulunan kapılar için tek-komut operasyon yapıldığında beklenen seyahat mesafesi elde edilmiştir.

$$E[T_a] = \frac{2}{t k_a} \sum_{i=1}^{k_a} \sum_{j=1}^t |G - \phi_a - (k_a - i)\delta_a - (j - 0.5)u| + \frac{2}{s_1 + s_2} \left\{ \sum_{i=1}^{s_1} [2g + l(i - 0.5)] + \sum_{i=1}^{s_2} [l(s_1 + i - 0.5) + 4g] \right\} \quad (1)$$

Alt-çapraz koridordaki kapılar için yapılan hesaplamalardan farklı olarak sağ-çapraz koridorda bulunan kapılar için en kısa süre dikkate alınmalıdır. Herhangi bir D/B lokasyonuna olan en kısa seyahat mesafesini belirlemek için alt-, orta ve üst-çapraz koridorların kullanılması durumları incelenmiş ve minimum seyahat değerini veren koridor seçilecek şekilde formüller türetilmiştir (tüm işlemlerde kapılar ve D/B lokasyonları aşağıdan yukarıya doğru numaralandırılmıştır). Alt-çapraz koridor için yapılan hesaplamalara benzer şekilde, dikey ve yatay doğrultudaki seyahat mesafeleri ayrı olarak hesaplanmış ve toplanarak sağ-çapraz koridora açılan kapılar için tek-komut operasyon yapıldığında beklenen seyahat mesafesi elde edilmiştir.

$$E[T_s] = \frac{2}{k_s(s_1 + s_2)} \left\{ \sum_{i=1}^{k_s} \left\{ \sum_{j=1}^{s_1} \min \left[ \phi_s + (i - 1)\delta_s + l(j - 0.5), |s_1 l - \phi_s - (i - 1)\delta_s + 3g| + l(s_1 - j + 0.5) + g \right] + \sum_{j=1}^{s_2} \min \left[ l(2s_2 + s_1 - j + 0.5) - \phi_s - (i - 1)\delta_s + 6g, |s_1 l - \phi_s - (i - 1)\delta_s + 3g| + l(j + 0.5) + g \right] \right\} + \frac{2}{t} \sum_{i=1}^t [2g + (t - i + 0.5)u] \right\} \quad (2)$$

Depoya bir duvarda bulunan kapılardan gelen tüm birim yüklerin belli bir süre sonra deponun bitişik duvarında bulunan kapılardan gönderildiği varsayımıyla, uzun vadede, depoya giren birim yük sayısı depodan gönderilen birim yük sayısına eşittir. Böylece, tek-komut operasyon için beklenen seyahat mesafesi alt-çapraz koridor ve sağ-çapraz koridor için hesaplanan seyahat mesafelerinin toplamının ikiye bölünmesi ile elde edilir.

$$E[T] = E[T_a]/2 + E[T_s]/2 \quad (3)$$

#### 4.2 İki D/B lokasyonu arasındaki beklenen seyahat mesafesi

İki D/B lokasyonu arasındaki mesafenin hesaplanması bir önceki bölümde olduğu gibi önce yatay ve dikey seyahat mesafeleri için ayrı hesaplanmış ve sonra birleştirilmiştir. İki D/B lokasyonu arasındaki yatay mesafe D/B koridorları arasındaki mesafeye eşittir. Tüm koridorlar arasındaki mesafe toplanarak koridor sayısının karesine bölünmüş ve İki D/B lokasyonu arasındaki beklenen yatay mesafe elde edilmiştir.

$$E[L_1] = \frac{1}{t^2} \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t |i - j|u \quad (4)$$

İki D/B lokasyonu arasındaki dikey mesafeyi hesaplarken D/B lokasyonlarının aynı D/B koridorunda bulunup bulunmadıklarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Eğer her iki D/B lokasyonu da aynı D/B koridorunda yer alıyorsa lokasyonların orta-çapraz koridora göre yerleşimleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$E[L_2] = \frac{1}{(s_1 + s_2)^2} \left\{ \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{j=1}^{s_1} |i - j|l + \sum_{i=1}^{s_2} \sum_{j=1}^{s_2} |i - j|l + 2 \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{j=1}^{s_2} |s_1 - i + j|l + 2g \right\} \quad (5)$$

Eğer her iki D/B lokasyonu da farklı D/B koridorunda yer alıyorsa alt-,orta ve üst-çapraz koridorların kullanılması durumuna göre en kısa seyahat mesafesi göz önünde bulundurularak hesaplama yapılmalıdır. Her iki D/B lokasyonu da orta-çapraz koridorun alt kısmındaysa alt-çapraz veya orta-çapraz koridor kullanılırken, her iki D/B lokasyonunun orta-çapraz koridorun üst kısmında bulunması halinde üst-çapraz veya orta-çapraz koridor kullanılacaktır. D/B lokasyonları orta-çapraz koridorun farklı taraflarında bulunması halinde sadece orta-çapraz koridor kullanılacaktır. Böylece iki D/B lokasyonunun orta-çapraz koridora göre konumuna bakılarak farklı D/B koridorlarında bulunan iki D/B lokasyonu arasındaki beklenen seyahat mesafesi hesaplanmıştır.

$$E[L_3] = \frac{1}{(s_1 + s_2)^2} \left\{ \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{j=1}^{s_1} \min \left[ (i + j - 1)l + 2g, (2s_1 - i - j + 1)l + 2g \right] + \sum_{i=1}^{s_2} \sum_{j=1}^{s_2} \min \left[ (i + j - 1)l + 2g, (2s_2 - i - j + 1)l + 2g \right] + 2 \sum_{i=1}^{s_1} \sum_{j=1}^{s_2} |s_1 - i + j|l + 2g \right\} \quad (6)$$

İki D/B lokasyonunun aynı koridorda olma olasılığı  $1/t$  ile Eş. 5 çarpılır ve iki D/B lokasyonunun farklı koridorlarda olma olasılığı  $(t-1)/t$  ile Eş. 6 çarpılır. Çıkan sonuç toplanarak yatay doğrultudaki beklenen seyahat mesafesi hesaplanır ve dikey doğrultudaki mesafe eklenerek iki D/B lokasyonu arasındaki toplam beklenen mesafe bulunur.

$$E[L] = E[L_1] + \{E[L_2] + (t - 1)E[L_3]\}/t \quad (7)$$

#### 4.3 Çapraz-sevkiyat operasyonları için beklenen seyahat mesafesi

Çapraz-sevkiyat işlemleri depolarda D/B operasyonlarındaki taşıma maliyetlerini minimize ettiğinden en fazla uygulanmak istenen operasyon türü olmasına rağmen siparişlerin ne zaman verileceği tahmin edilemediğinden kısıtlı bir şekilde uygulanan operasyon türüdür. Alt-çapraz koridora açılan tüm kapılardan sağ-çapraz koridora açılan tüm kapılara ulaşmak için kat edilen mesafe toplanmış ve kapı sayılarının çarpımı ile bölünerek çapraz-sevkiyat operasyonu için beklenen seyahat mesafesi hesaplanmıştır.

$$E[S] = \frac{1}{k_a k_s} \sum_{i=1}^{k_a} \sum_{j=1}^{k_s} [(k_a - i)\delta_a + \phi_a + \phi_s - (j - 1)\delta_s] \quad (8)$$

#### 4.4 Çift-komut operasyonlar için beklenen seyahat mesafesi

Çift-komut operasyonda depolanacak bir birim yükün bir depo duvarındaki kapıdan alınarak bir D/B lokasyonuna bırakılması ve daha sonra depo kapısına geri dönmeden sipariş verilen bir birim yükün boşaltma lokasyonundan alınarak depo kapısına bırakılması gerekmektedir. Dolayısıyla, tek-komut operasyona (Eş. 3) ilaveten iki lokasyon arasındaki mesafe kat edilmekte (Eş. 7) ve başlangıç depo kapılarına geri dönüş mesafesi (Eş. 8) eklenerek çift-komut operasyonlar için beklenen seyahat mesafesi hesaplanmıştır.

$$E[C] = E[T] + E[L] + E[S] \quad (9)$$

#### 4.5 Karma-komut operasyonlar için beklenen seyahat mesafesi

Depolarda sadece tek bir operasyon tipi nadiren de olsa görülebilmeye rağmen genellikle tüm operasyon türleri aynı anda uygulanmaktadır. Depolama ve boşaltma operasyonlarının aynı anda bulunması halinde çift-komut operasyon tercih edilirken, eşleşme olmaması durumunda tek-komut operasyon seçilmektedir. Ayrıca, sipariş olması durumunda birim yüklerin araçlardan boşaltıldıktan kısa süre içerisinde çapraz-sevkiyat yapılarak depolama/boşaltma operasyonları yapılmadan gönderilmesi tercih edilecektir. Bir depoda uygulanan operasyon tipinin tek-komut olma olasılığının  $\alpha$ , çift-komut olma olasılığının  $\beta$  ve çapraz koridor operasyonu olma olasılığının  $\gamma$  olduğu varsayılırsa, karma-komut operasyonlar için Eş. 3, Eş. 8 ve Eş. 9 kullanılarak genel bir formül oluşturulabilir. Olasılık hesabı yapılırken her bir operasyon türüne göre olasılık katsayısının düzenlenmesi gerekmektedir. Örneğin, 50 birim yükün depolanması ve boşaltılması için 100 tek-komut operasyon gerçekleştirilmesi gerekirken, sadece 50 çift-komut operasyon veya 50 çapraz-sevkiyat operasyonu gerçekleştirmek gerekir. Eğer 50 depolama ve 50 boşaltma operasyonun %50'si tek-komut operasyonla gerçekleştirilecek (50 tek-komut operasyon) ve geri kalanı çift-komut operasyonla (25 çift-komut operasyon) tamamlanacaksa,  $\alpha = 0.5$  ve  $\beta = 0.25$  olacaktır.

$$E[K] = \alpha E[T] + \beta E[L] + \gamma E[S] \quad (10)$$

#### 4.6 Optimizasyon modeli

Operasyon türüne göre beklenen seyahat mesafesini hesaplayan formüller kullanılarak bir depodaki seyahat mesafesi minimize edilebilir. Önceki çalışmalardan farklı olarak deponun en-boy oranı için belirli bir oran kullanılmamış veya orta-çapraz koridorun deponun tam ortasında olduğu varsayılmamıştır. Depoda bulunan toplam D/B koridoru sayısı ( $t$ ) ile orta-çapraz koridorun altında ve üstünde bulunan depo lokasyon sayıları ( $s_1$  ve  $s_2$ ) değişken olarak tanımlanarak en-boy oranı ile orta-çapraz koridorun konumu optimum olarak bulunmuştur.

$$\text{Amaç Fonk. : } E[K] \quad (11)$$

$$\text{Kısıtlar: } (tu + 2g)[(s_1 + s_2)l + 6g] \leq A \quad (12)$$

$$2g + \frac{\delta_a}{2} < \phi_a < tu + 2g - \frac{\delta_a}{2} \quad (13)$$

$$2g + \frac{\delta_s}{2} < \phi_s < (s_1 + s_2)l + 6g - \frac{\delta_s}{2} \quad (14)$$

$$t, s_1 \text{ ve } s_2 \geq 1 \text{ ve tamsayı}$$

Optimizasyon modelinde amaç depo içerisinde kat edilen mesafenin minimize edilmesidir. Eş. 11 karma-komut operasyon için verilmesine rağmen herhangi bir operasyon türü için hesaplamalar  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  değerleri düzenlenerek yapılabilir (tek-komut operasyonlar için  $\alpha = 1$  ve  $\beta = \gamma = 0$ , çift-komut operasyonlar için  $\beta = 0,5$  ve  $\alpha = \gamma = 0$ , çapraz-sevkiyat operasyonları için  $\gamma = 0,5$  ve  $\alpha = \beta = 0$ ). İlk kısıt (Eş. 12) deponun belli bir alana sahip olmasını garanti eder. Eş. 13 kapıların sağ-çapraz koridora denk gelmemesini ve alt-çapraz koridorun  $k_a$  kadar kapının yerleştirilmesi için yeterince uzun olmasını garanti eder. Benzer şekilde, Eş. 14 kapıların alt-çapraz koridora denk gelmemesini ve sağ-çapraz koridorun  $k_s$  kadar kapının yerleştirilmesi için yeterli uzunlukta olmasını garanti eder. Son kısıt değişkenlerin en az bir değerini alması ve tam sayılı olmasını sağlar.

## 5 Sayısal sonuçlar ve tartışma

Sayısal sonuçlar hesaplanırken, Türkiye'de bulunan depolarda kullanılan ortalama parametre değerleri belirlenmiş ve şu parametre değerleri kullanılmıştır:  $g=1.8$  m,  $l = 1.2$  m,  $u=6$  m,  $A = 20,000$  m<sup>2</sup>. Ayrıca, depo kapıları için  $k_a=5, 23, 41$  ve  $k_s = 5, 23, 41$  değerleri kullanılmıştır. Kapılar arasındaki mesafenin her iki duvar içinde aynı ve 3.6 m olduğu varsayılmıştır ( $\delta_a=\delta_s=3.6$  m). Dahası, kapıların bulunduğu depo duvarı ile bu duvara en yakın alt-çapraz veya sağ-çapraz koridor arasındaki mesafenin 5.4 m olduğu varsayılmaktadır ( $\phi_a=\phi_s=5.4$  m). Verilen parametreler kullanılarak optimizasyon modeli MATHEMATICA programı kullanılarak çözülmüştür.

Karma-komut operasyon uygulayan bir depo için öncelikle tek-komut operasyon odaklı olacak şekilde olasılık değerleri seçilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır ( $\alpha=0.5$ ,  $\beta=0.15$  ve  $\gamma=0.1$ ). Optimal depo tasarımı ile optimal orta-çapraz koridor konumunun kapı sayısına göre değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

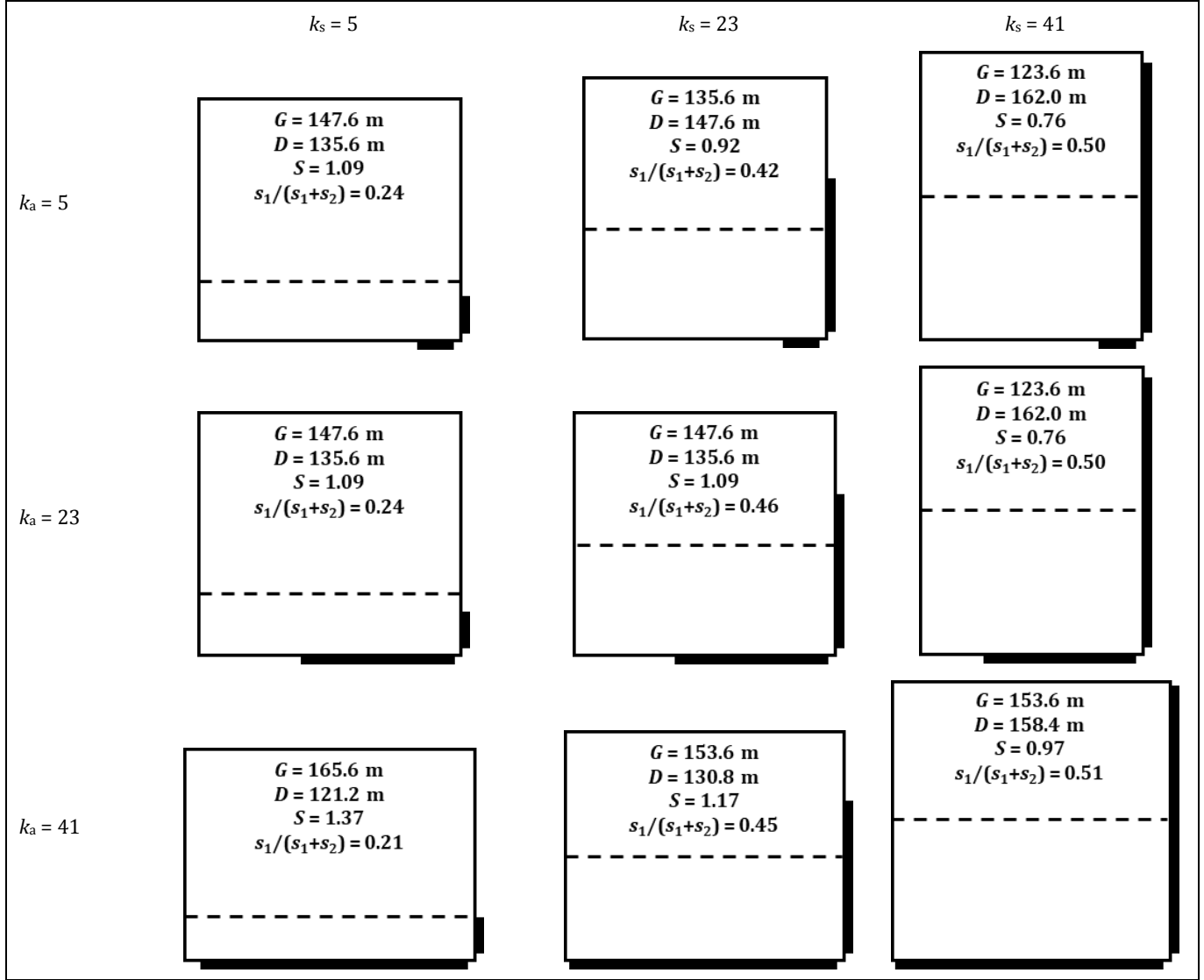
Her iki duvarda da eşit sayıda kapı bulunması halinde optimal şekil faktörü bire yakın bir değer almakta ve optimal orta-çapraz koridorun konumu sağ-çapraz koridorda bulunan kapı sayısına bağlı olarak değişmektedir. Sağ-çapraz koridorda daha fazla kapı bulunması halinde optimal şekil faktörü birden küçük iken, daha az kapı bulunması halinde birden büyük olmaktadır. Her iki duvarda da 41 adet kapı bulunması halinde kapı kısıtları alanın belirlenen değer üzerinde olmasını sağlamaktadır. Sağ-çapraz koridora yerleştirilen kapıların orta-çapraz koridor üzerindeki etkisi daha fazla görülmektedir ve kapı sayısı arttıkça deponun orta-çapraz koridor deponun alt kısmından deponun ortasına doğru hareket etmektedir. Sağ-çapraz koridorda veya alt-çaprazda bulunan kapıların sayısının artırılması beklenen seyahat mesafesinin artmasına sebep olmaktadır.

Eğer olasılık değerleri karma-komut operasyon uygulayan bir depo için çift-komut operasyon odaklı olacak şekilde seçilir ve hesaplamalar yapılırsa ( $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.25$  ve  $\gamma = 0.1$ ), optimal şekil faktörü tek-komut operasyon odaklı depoya aynı olmasına rağmen orta-çapraz koridorun optimum konumunda ciddi bir değişiklik olduğu ve deponun ortasına daha fazla yaklaştığı gözlemlenmektedir (bk. Şekil 4 ve Tablo 2).

Tek-komut operasyon odaklı depoya benzer şekilde, çift-komut odaklı depoda da sağ-çapraz koridorda daha fazla kapı bulunması halinde optimal şekil faktörü birden küçük iken, daha az kapı bulunması halinde birden büyük olmaktadır. Sağ-çapraz koridora yerleştirilen kapıların orta-çapraz koridor üzerindeki etkisinin azaldığı gözlemlenmektedir ve optimal şekil ile

optimal orta-çapraz koridor konumunun kapı sayısına daha az duyarlı olduğu sonucuna varılmaktadır. Her iki duvarda da 41 adet kapı bulunması haricinde, çift-komutlu operasyon odaklı depoda beklenen seyahat süresinin kısaldığı görülmektedir.

Tahmin edildiği üzere, daha fazla çift-komut operasyon yapıldığı için tek-komut odaklı depoda yapılan hesaplamalara göre beklenen seyahat mesafesinde azalma gözükmemektedir.



Şekil 3. Karma-komut operasyon ( $\alpha = 0.5, \beta = 0.15$  ve  $\gamma = 0.10$ ) için optimal şekil faktörü ve optimal orta-çapraz koridor lokasyonu.

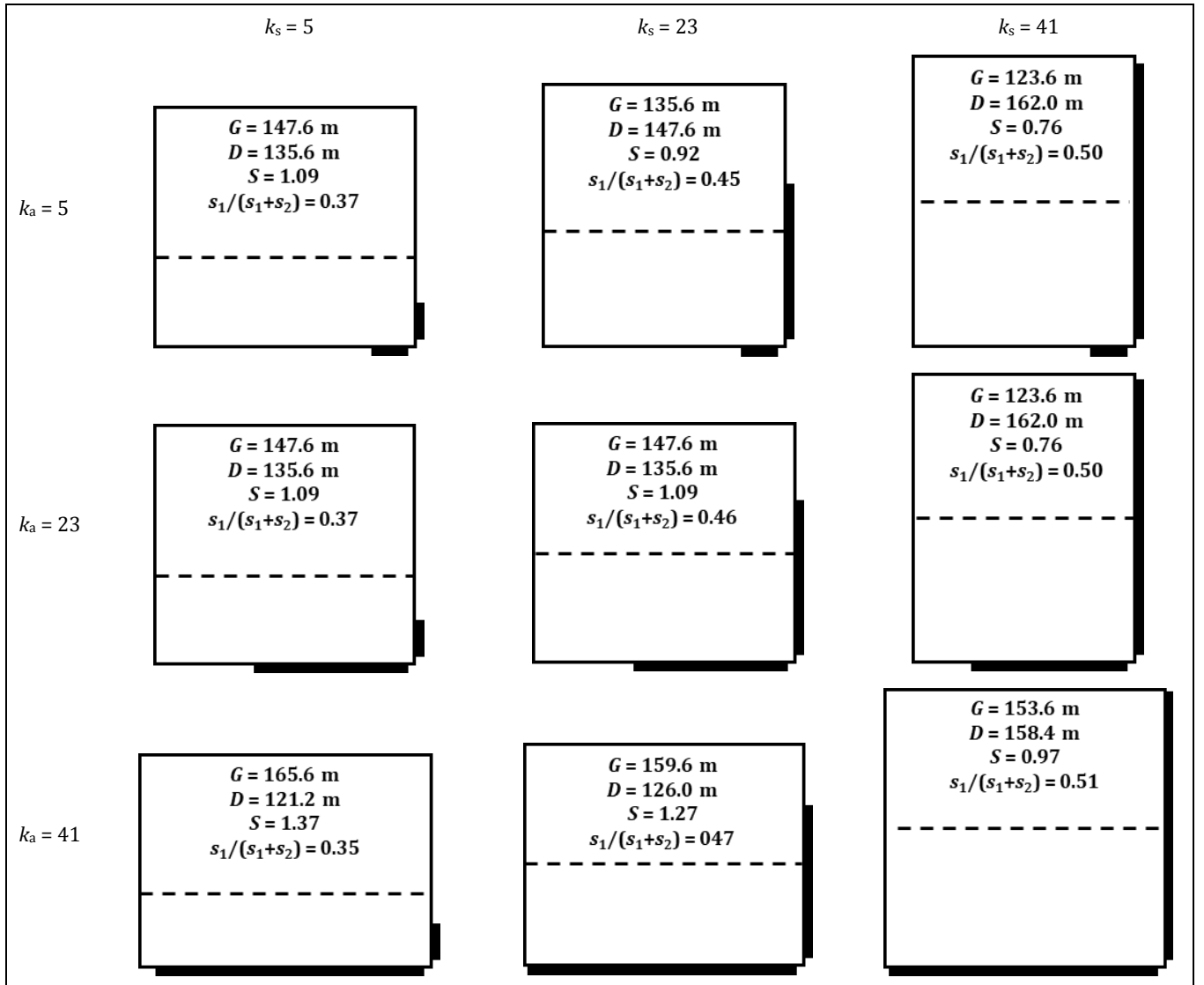
Figure 3. The illustration of the optimal shape factor and optimal mid-cross aisle location for a mixed-command operation ( $\alpha = 0.5, \beta = 0.15$  and  $\gamma = 0.10$ ).

Tablo 1. Karma-komut operasyon ( $\alpha = 0.5, \beta = 0.15$  ve  $\gamma = 0.1$ ) için optimal şekil faktörü ve optimal orta-çapraz koridor lokasyonu

Table 1. Optimal shape factor and optimal mid-cross aisle location for a mixed-command operation ( $\alpha = 0.5, \beta = 0.15$  and  $\gamma = 0.10$ ).

$k_a$	$k_s$	$t$	$s_1$	$s_2$	$E[K]$	$G$	$D$	$A$	$F$	$s_1/s_2$	$s_1/(s_1+s_2)$
5	5	24	25	79	200.02	147.6	135.6	20014.6	1.09	0.32	0.24
	23	22	48	66	202.91	135.6	147.6	20014.6	0.92	0.73	0.42
	41	20	63	63	217.54	123.6	162.0	20023.2	0.76	1.00	0.50
23	5	24	25	79	200.13	147.6	135.6	20014.6	1.09	0.32	0.24
	23	24	48	56	203.80	147.6	135.6	20014.6	1.09	0.86	0.46
	41	20	63	63	219.61	123.6	162.0	20023.2	0.76	1.00	0.50
41	5	27	19	73	211.36	165.6	121.2	20070.7	1.37	0.26	0.21
	23	25	45	55	216.43	153.6	130.8	20090.9	1.17	0.82	0.45
	41	25	63	60	247.85	153.6	158.4	24330.2	0.97	1.05	0.51





Şekil 4. Karma-komut operasyon ( $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.25$  ve  $\gamma = 0.1$ ) için optimal şekil faktörü ve optimal orta-çapraz koridor lokasyonu.

Figure 4. The illustration of the optimal shape factor and optimal mid-cross aisle location for a mixed-command operation ( $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.25$  and  $\gamma = 0.1$ ).

Tablo 2. Karma-komut operasyon ( $\alpha=0.3, \beta=0.25$  ve  $\gamma=0.1$ ) için optimal şekil faktörü ve optimal orta-çapraz koridor lokasyonu

Table 2. Optimal shape factor and optimal mid-cross aisle location for a mixed-command operation ( $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.25$  and  $\gamma = 0.1$ ).

$k_a$	$k_s$	$t$	$s_1$	$s_2$	$E[K]$	$G$	$D$	$A$	$F$	$s_1/s_2$	$s_1/(s_1+s_2)$
5	5	24	38	66	186.31	147.6	135.6	20014.6	1.09	0.58	0.37
	23	22	51	63	193.42	135.6	147.6	20014.6	0.92	0.81	0.45
	41	20	63	63	210.94	123.6	162.0	20023.2	0.76	1.00	0.50
23	5	24	38	66	191.39	147.6	135.6	20014.6	1.09	0.58	0.37
	23	24	48	56	198.99	147.6	135.6	20014.6	1.09	0.86	0.46
	41	20	63	63	217.68	123.6	162.0	20023.2	0.76	1.00	0.50
41	5	27	32	60	205.96	165.6	121.2	20070.7	1.37	0.53	0.35
	23	26	45	51	214.67	159.6	126.0	20109.6	1.27	0.88	0.47
	41	25	63	60	247.62	153.6	158.4	24330.2	0.97	1.05	0.51

## 6 Sonuçlar

Son yıllarda, teknolojinin hızla gelişimiyle birlikte e-ticaretin perakende sektöründeki pazar payı önemli ölçüde artmıştır. Buna bağlı olarak şirketler, müşteri memnuniyetlerini ve dolayısıyla kar marjlarını artırmak için tedarik zinciri yönetimi

tasarımlarını ve lojistik operasyon kararlarını tekrar tekrar gözden geçirmek zorunda kalmaktadırlar. Müşterilerin siparişlerinin mümkün olan en kısa sürede teslimi müşteri memnuniyeti için kritik öneme sahiptir (en fazla bir veya iki gün). Ancak, bu zaman kısıtı, firmalara ciddi bir maliyet oluştururken ürünlere herhangi bir değer katmamaktadır. Bu

nedenle, depolama / boşaltma işlemlerinin maliyeti minimize edilmelidir. Bu çalışmada, ayrı depo uzayında tek komutlu, çift komutlu ve çapraz-sevkiyat operasyonlar için formülasyonlar türetilmiştir. Daha sonra, karma komutlu operasyonlar için doğrusal olmayan tam sayılı bir programlama modeli geliştirilmiş ve optimizasyon modeli iki farklı depo tasarımı (tek komutlu ve çift komut odaklı depolar) için çözülmüştür. Sonuç olarak, orta-çapraz koridorun optimum konumu ve optimum depo tasarımı, iki bitişik duvar boyunca çok sayıda depo kapısı bulunan birim-yük depoları için belirlenmiştir. Sonuçlara göre, depo kapılarının sayısının ve / veya operasyon tipinin, optimum depo tasarımının yanı sıra optimum orta koridor konumunu önemli ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak, orta çapraz koridorun deponun merkezi ile alt çapraz koridor arasında (üst çapraz koridor yerine) yer alması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yapılan çalışmada rastgele bir depolama/boşaltma politikasının uygulandığı varsayılmıştır. Bu nedenle, sınıf-bazlı veya devir-bazlı gibi farklı depolama politikaları incelenebilir. İki farklı depo tasarımı için verilen sayısal sonuçlar, farklı olasılık değerlerine sahip tek-komut, çift-komut ve çapraz-sevkiyat operasyonları için yapılacak gelecek çalışmalara bir temel oluşturabilir. Depo kapılarının bitişik iki duvar yerine karşılıklı iki duvar veya ikiden fazla duvara yerleştirildiği tasarımlar üzerinde çalışmalar yapılabilir.

## 7 Conclusions

In recent years, the ecommerce market share in the retail industry has significantly increased with the advent of technology. Correspondingly, companies must revisit their supply chain management designs and logistics operation decisions repeatedly to increase their customer satisfaction, hence profit margins. Delivery of customers' orders as soon as possible is of critical importance to the customer satisfaction (one or two days at most). However, this time constraint does not add any value to products while creating a serious cost to companies. Therefore, the cost for storage/retrieval operations must be minimized.

In this study, expected distance formulations for single-command, dual-command and cross-docking operations are developed in a discrete storage space. Then, a nonlinear-integer programming model is developed for mixed-command operations and the optimization model is solved for two different warehouse design (single-command and dual-command focused warehouses). As a result, the optimal location of the mid-cross aisle and the optimal warehouse design are determined for unit-load warehouses having multiple dock doors along two adjacent walls. Based on the results, it is observed that the number of dock doors and/or operation type significantly change the optimum warehouse design, as well as the optimum mid-cross-aisle location. Different from earlier studies, we concluded that the middle-cross aisle should be located between the center of the warehouse and the bottom cross-aisle (instead of the top-cross aisle).

In this study, a random storage/retrieval operation is assumed. Therefore, different storage policies such as class-based, turnover-based etc. can be examined. Numerical results provided for two warehouse designs can serve as a base for future studies with different probability values for single-, dual and cross-docking operations. Studies can be made on designs having dock doors placed on two opposite walls or on more than two walls instead of adjacent walls.

## 8 Yazar katkı beyanı

Bu çalışma tek bir yazar tarafından hazırlanmıştır. Dolayısıyla gerçekleştirilen çalışmada; fikrin oluşturulması, literatürün taranması, matematiksel modellerin oluşturulması, sonuçların değerlendirilmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrolü Mahmut TUTAM tarafından yapılmıştır.

## 9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur" "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

## 10 Kaynaklar

- [1] Tompkins JA, White JA, Bozer YA, Tanchoco JMA. *Facilities planning*, 4<sup>th</sup> ed. New York, NY, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Bartholdi JJ, Hackman ST. *Warehouse & Distribution Science*, Release 0.98.1. Atlanta, GA, Supply Chain and Logistics Institute, 2019.
- [3] Drury J. "Towards More Efficient Order Picking". IMM Monograph Report. Cranfield, UK, 1, 1988.
- [4] Ertek G. "Çapraz sevkiyat için temel bilgiler". *Lojistik Dergisi*, 13, 22-27, 2010.
- [5] Tutam M, White JA. "A multi-dock, unit-load warehouse design". *IIE Transactions*, 51(3), 232-247, 2019.
- [6] Tutam M, White JA. "Multi-dock unit-load warehouse designs with a cross-aisle". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 129, 247-262, 2019.
- [7] Öztürkoğlu Ö, Kocaman Y, Gümüsoğlu Ş. "Evaluating Chevron aisle design in unit load warehouses with multiple pickup and deposit points". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 793-807, 2018.
- [8] Cahn AS. "The warehouse problem". *Bulletin of the American Mathematical Society*, 54(11), 1073-1073, 1948.
- [9] Charnes A, Cooper WW. "Generalizations of the warehousing model". *Operations Research*, 6(4), 131-172, 1955.
- [10] Bellman R. "On the theory of dynamic programming-a warehousing problem". *Management Science*, 2(3), 272-275, 1956.
- [11] Dreyfus SE. "An analytic solution of the warehouse problem". *Management Science*, 4(1), 99-104, 1957.
- [12] Mayer HE. "Storage and retrieval of material". *The Western Electric Engineer*, 5(1), 42-48, 1961.
- [13] Malmborg CJ, Balachandran S, Kyle DM. "A model based evaluation of a commonly used rule of thumb for warehouse layout". *Applied Mathematical Modeling*, 10(2), 133-138, 1986.
- [14] Malmborg CJ, Krishnakumar B. "On the optimality of the cube per order index for conventional warehouses with dual command cycles". *Material Flow*, 4(3), 169-175, 1987.
- [15] Malmborg CJ, Krishnakumar B. "A revised proof of optimality for the cube-per-order index rule for stored item location". *Applied Mathematical Modeling*, 14(2), 87-95, 1990.
- [16] Moder JJ, Thornton HM. "Quantitative analysis of factors affecting floorspace utilization of palletized storage". *Journal of Industrial Engineering*, 16(1), 8-18, 1965.
- [17] Francis RL. "On some problems of rectangular warehouse design and layout". *Journal of Industrial Engineering*, 18(10), 595-604, 1967.

- [18] Francis RL. "Sufficient conditions for some optimum-property facility designs". *Operations Research*, 15(3), 448-466, 1967.
- [19] Berry JR. "Elements of warehouse layout". *International Journal of Production Research*, 7(2), 105-121, 1968.
- [20] White JA, Francis RL. "Normative models for some warehouse sizing problems". *AIIE Transactions*, 3(3), 185-190, 1971.
- [21] White JA. "Optimum design of warehouses having radial aisles". *AIIE Transactions*, 4(4), 333-336, 1972.
- [22] Mallette AJ, Francis RL. "A generalized assignment approach to optimal facility layout". *AIIE Transactions*, 4(2), 144-147, 1972.
- [23] Francis RL, White JA. *Facility Layout and Location: An Analytic Approach*. 1<sup>st</sup> ed. New Jersey, USA, Prentice-Hall Inc., 1974.
- [24] Bassan Y, Roll Y, Rosenblatt MJ. "Internal layout design of a warehouse". *AIIE Transactions*, 12(4), 317-322, 1980.
- [25] Ratliff HD, Rosenthal AS. "Order-picking in a rectangular warehouse: a solvable case of the traveling salesman problem". *Operations Research*, 31(3), 507-521, 1983.
- [26] Goetschalckx M, Ratliff HD. "An efficient algorithm to cluster order picking items in a wide aisle". *Engineering Costs and Production Economics*, 13(4), 263-271, 1988.
- [27] Goetschalckx M, Ratliff HD. "Order picking in an aisle". *IIE Transactions*, 20(1), 53-62, 1988.
- [28] Rana K. "Order picking in narrow-aisle warehouses". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 20(2), 9-15, 1990.
- [29] De Koster R, van der Poort E. "Routing order pickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions". *IIE Transactions*, 30(5), 469-480, 1998.
- [30] Roodbergen KJ, De Koster R. "Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle". *European Journal of Operations Research*, 133(1), 32-43, 2001.
- [31] Roodbergen KJ, De Koster R. "Routing methods for warehouses with multiple cross aisles". *International Journal of Production Research*, 39(9), 1865-1883, 2001.
- [32] Yiğit F, Güner E. "Otomatik yönlendirmeli araç (oya) sistemleri ve depo bakımında rotalama problem". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 269-277, 2003.
- [33] Gue KR, Meller RD. "Improving the unit-load warehouse". *Progress in Material Handling Research*, Salt Lake City, Utah, USA, 11-16 June 2006.
- [34] Pohl LM, Meller RD, Gue KR. "An evaluation of two new warehouse aisle designs for dual-command travel". *Proceedings of the 2007 Industrial Engineering Research Conference*, Nashville, Tennessee, USA, 19-23 May 2007.
- [35] Gue KR, Meller RD. "Aisle configurations for unit-load warehouses". *IIE Transactions*, 41(3), 171-182, 2009.
- [36] Pohl LM, Meller RD, Gue KR. "Optimizing fishbone aisles for dual-command operations in a warehouse". *Naval Research Logistics*, 56(5), 389-403, 2009.
- [37] Pohl LM, Meller RD, Gue KR. "Turnover-based storage in non-traditional unit-load warehouse designs". *IIE Transactions*, 43(10), 703-720, 2011.
- [38] Gue KR, Ivanović G, Meller RD. "A unit-load warehouse with multiple pickup and deposit points and non-traditional aisles". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(4), 795-806, 2012.
- [39] Cardona LF, Rivera L, Martínez HJ. "Analytical study of the fishbone warehouse layout". *International Journal of Logistics Research and Applications*, 15(6), 365-388, 2012.
- [40] Öztürkoğlu Ö, Gue KR, Meller RD. "Optimal unit-load warehouse designs for single-command operations". *IIE Transactions*, 44(6), 459-475, 2012.
- [41] Jiang MX, Feng DZ, Zhao YL, Yu MF. "Optimization of logistics warehouse layout based on the improved Fishbone layout". *Xitong Gongcheng Lilun yu Shijian/System Engineering Theory and Practice*, 33(11), 2920-2929, 2013.
- [42] Clark KA, Meller RD. "Incorporating vertical travel into non-traditional cross-aisles for unit-load warehouse designs". *IIE Transactions*, 45(12), 1322-1331, 2013.
- [43] Öztürkoğlu Ö, Gue KR, Meller RD. "A constructive aisle design model for unit-load warehouses with multiple pickup and deposit points". *European Journal of Operations Research*, 236, 382-394, 2014.
- [44] Cardona LF, Diego FS, Rivera L, Martínez HJ. "Detailed design of fishbone warehouse layouts with vertical travel". *International Journal of Production Economics*, 170, 825-837, 2015.
- [45] Bortolini M, Faccio M, Ferrari E, Gamberi M, Pilati F. "Design of diagonal cross-aisle warehouses with class-based storage assignment strategy". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2521-2536, 2019.
- [46] Bortolini M, Galizia FG, Gamberi M, Gualano F. "Integration of single and dual command operations in non-traditional warehouse design". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 2461-2473, 2020.
- [47] Bortolini M, Galizia FG, Gamberi M, Gualano F, Naldi LD. *Non-Conventional Warehouses: Comparison of the Handling Performances*. Editors: Scholz SG, Howlett RJ, Setchi R. Sustainable Design and Manufacturing 2020, 193-203, Singapore, Springer, 2021.
- [48] Kocaman Y, Öztürkoğlu Ö, Gümüšoğlu Ş. "Aisle designs in unit-load warehouses with different flow policies of multiple pickup and deposit points". *Central European Journal of Operations Research*, 29(1), 323-355, 2021.
- [49] Pohl LM, Meller RD, Gue KR. "An analysis of dual-command operations in common warehouse designs". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(3), 367-379, 2009.
- [50] Berglund P, Batta R. "Optimal placement of warehouse cross-aisles in a picker-to-part warehouse with class-based storage". *IIE Transactions*, 44(2), 107-120, 2012.
- [51] Thomas LM, Meller RD. "Analytical models for warehouse configuration". *IIE Transactions*, 46(9), 928-947, 2014.
- [52] Toktaş-Palut P, Okçuoğlu F. "Depo tasarımı ve yerleşimi: bir gerçek hayat uygulaması". *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 14-22, 2019.
- [53] Ang M, Lim YF. "How to optimize storage classes in a unit-load warehouse". *European Journal of Operational Research*, 278, 186-201, 2019.
- [54] Cardona LF, Gue KR. "How to determine slot sizes in a unit-load warehouse". *IIE Transactions*, 51(4), 355-367, 2019.
- [55] Cardona LF, Gue KR. "Layouts of unit-load warehouses with multiple slot heights". *Transportation Science*, 54(5), 1332-1350, 2020.