

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ROBOTİK SIKIŞTIRILMIŞ KUTUYA TOPLAMA DEPO  
SİSTEMLERİNDE TOPLAMA POLİTİKALARININ YAPAY ARI  
KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Furkan YENER**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ŞUBAT 2023**



**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ROBOTİK SIKIŞTIRILMIŞ KUTUYA TOPLAMA DEPO  
SİSTEMLERİNDE TOPLAMA POLİTİKALARININ YAPAY ARI  
KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Furkan YENER**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Harun Reşit YAZĞAN**

**ŞUBAT 2023**



Furkan YENER tarafından hazırlanan “ROBOTİK SIKIŞTIRILMIŞ KUTUYA TOPLAMA DEPO SİSTEMLERİNDE TOPLAMA POLİTİKALARININ YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması 08.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

<b>Jüri Başkanı :</b>	<b>Prof. Dr. Cemil ÖZ</b> Sakarya Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi :</b>	<b>Prof. Dr. Harun Reşit YAZĞAN</b> Sakarya Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi :</b>	<b>Doç. Dr. Özer UYGUN</b> Sakarya Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi :</b>	<b>Prof. Dr. Alpaslan FIĞLALI</b> Kocaeli Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi :</b>	<b>Prof. Dr. Serol BULKAN</b> Marmara Üniversitesi	.....



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ROBOTİK SIKIŞTIRILMIŞ KUTUYA TOPLAMA DEPO SİSTEMLERİNDE TOPLAMA POLİTİKALARININ YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(06/02/2023).

Furkan YENER





*Eşime ve sevdiklerime*



## TEŞEKKÜR

Yükseköğrenimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan ve zamanını ayırıp sabırla bana yol gösteren, bu zorlu süreçte desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Harun Reşit YAZĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora tez çalışmam süresince bana zaman ayırdıkları, beni dinledikleri, değerlendirme ve yorumlarıyla tez çalışmamın gelişme sürecine sağladıkları katkılardan dolayı tez izleme jürimde yer alan Prof. Dr. Cemil ÖZ ve Doç. Dr. Özer UYGUN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca doktora tez çalışmamda ve diğer akademik çalışmalarında her zaman fikir alışverişi yapabildiğim; manevi desteklerini, kıymetli zamanlarını, bilgi ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen ekip arkadaşı hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Sena KIR, Arş. Gör. Serap ERCAN CÖMERT ve Arş. Gör. Gülseli İŞLER'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam boyunca tezin her aşamasında yanımda olan annem ve babam Zişan-Muammer YENER'e ve kardeşim, Uzm. Fizyoterapist Numan YENER'e ve abim Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER'e ve değerli eşi Doç Dr. Tuba YENER'e teşekkürü borç bilirim.

Teşekkürlerimin en özelini ise; bu süreçte yorulduğum ve umutsuzluğa kapıldığım zamanlarda benim için enerji ve mutluluk kaynağı olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bana en büyük desteği ve sevgiyi vererek yanımda olan eşim Ecz. Zeynep Cemre YENER'e sunuyorum.

Furkan YENER



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....</b>	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>SİMGELER .....</b>	<b>xv</b>
<b>TABLO LİSTESİ .....</b>	<b>xvii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ .....</b>	<b>xix</b>
<b>ÖZET .....</b>	<b>xxi</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>xxiv</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama Sistemleri .....	10
1.2. Problem .....	13
1.3. Literatüre Tezin Katkısı.....	15
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>19</b>
2.1. Toplayıcının Ürüne Hareket Ettiği Sistemler .....	19
2.2. Ürünün Toplayıcıya Hareket Ettiği Sistemler .....	23
2.3. Yeni Nesil Sıkıştırılmış Depolar .....	27
2.4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması .....	30
2.5. Yeniden Düzenleme .....	34
2.6. Çalışmanın Literatüre Katkısı .....	35
<b>3. ROBOTİK SIKIŞTIRILMIŞ KUTUYA TOPLAMA SİSTEMLERİ .....</b>	<b>37</b>
3.1. Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama Sistemi Parametreleri .....	38
3.1.1. Kutu Toplama Zamanı .....	38
3.1.2. Kutu Yükleme Zamanı .....	39
3.1.3. Ürün Toplama ve Yükleme Frekansı .....	39
3.1.3.1. Toplama frekansı.....	40
3.1.3.2. Yükleme frekansı .....	40
3.1.4. Robotik Kutuya Toplama Sistemi Notasyonları .....	40
3.2. Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama Sistemi Kabulleri .....	43
<b>4. DİNAMİK ÇOKLU PERİYOTTA DEPO YERİ ATAMA PROBLEMİ.....</b>	<b>44</b>
4.1. 0 - 1 Tam Sayılı Doğrusal Matematiksel Model .....	45
4.2. 0 - 1 Tam Sayılı Karesel Matematiksel Model .....	46
4.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması .....	47
4.4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması Parametre Optimizasyonu.....	49
4.5. Depo Yeri Atama Sezgiseli .....	51
<b>5. YENİDEN DÜZENLEME .....</b>	<b>53</b>
<b>6. BENZETİM .....</b>	<b>55</b>
6.1. Benzetim Kavramı.....	55
6.2. Benzetim Çeşitleri .....	56

6.3. Benzetim Modeli .....	57
<b>7. SONUÇLAR VE İSTATİSTİK.....</b>	<b>59</b>
7.1. Sonuçlar.....	59
7.2. İstatistiksel Analiz .....	61
<b>8. SONUÇ VE TARTIŞMA.....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>65</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>77</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>85</b>

## **KISALTMALAR**

<b>AAÇP</b>	: Atölye Akış Çizelgeleme Problemi
<b>COI</b>	: Cube-per-order Index
<b>DYAP</b>	: Depo Yeri Atama Problemi
<b>G/Ç</b>	: Giriş ve Çıkış
<b>GSP</b>	: Gezgin Satıcı Problemi
<b>MBF</b>	: Malzeme Bilgi Formu
<b>OYA</b>	: Otomatik Yönlendirmeli Araç
<b>ÖOKP</b>	: Örtücü Olmayan Konum Problemi
<b>RSKT</b>	: Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama
<b>TMD</b>	: Tehlikeli Madde Depoları
<b>YAK</b>	: Yapay Arı Kolonisi
<b>YDA</b>	: Yüksek Depolama Araçları





## **SİMGELER**

<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>m<sup>3</sup></b>	: Metre küp
<b>P</b>	: Anlamlılık değeri



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1.</b> Toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler ile ilgili çalışmalar.....	21
<b>Tablo 2.2.</b> Ürünün toplayıcıya hareket ettiği sistemler ile ilgili çalışmalar. ....	25
<b>Tablo 2.3.</b> Sıkıştırılmış depolar ile ilgili çalışmalardır.....	28
<b>Tablo 2.4.</b> YAK algoritması ile ilgili çalışmalardır.....	32
<b>Tablo 3.1.</b> RSKT sistemlerinin notasyonları ve açıklamaları verilmiştir.....	41
<b>Tablo 4.1.</b> YAK’da kullanılan parametrelerin en yüksek ve en düşük değerleridir..	50
<b>Tablo 4.2.</b> DYAP çözümü için YAK algoritması parametrelerin değerleridir.....	51
<b>Tablo 7.1.</b> RSKT sistemi için benzetim sonuçlarıdır. ....	60



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Depo operasyonları ve depo yönetimi kavramları gösterilmiştir. ....	4
Şekil 1.2. RSKT sistemlerinin genel görüntüsüdür. ....	11
Şekil 3.1. RSKT sistemi iki boyutlu gösterimidir. ....	37
Şekil 4.1. Çoklu periyotta dinamik DYAP gösterimidir. ....	44
Şekil 4.2. YAK algoritması akış şemasıdır. ....	49
Şekil 4.3. Depo atama sezgiseli akış şemasıdır. ....	52
Şekil 6.1. RSKT sistemleri için oluşturulmuş benzetim modelidir. ....	58



# ROBOTİK SIKIŞTIRILMIŞ KUTUYA TOPLAMA DEPO SİSTEMLERİNDE TOPLAMA POLİTİKALARININ YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, depo tasarımı ve depo operasyonları yönetimi konuları günümüzde yaşanan teknolojik gelişmeler göz önüne alınarak araştırılmıştır. Tamamen otomasyona dayalı sistemler arasında yer alan Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama (RSKT) sistemleri detaylı olarak incelenmiş ve sistemin yapısal özelliklerini temsil eden notasyonlar üretilmiştir. Günümüzde tamamen birbirinden ayrılmaya başlamış olan toplayıcının ürünlere hareket ettiği sistemler ve ürünlerin toplayıcıya hareket ettiği sistemlerin farkları dikkate alınarak, RSKT sisteminin, sipariş toplama süreci detaylı olarak analiz edilmiş hem araştırmacılara hem de uygulayıcılara yararlı olacak sonuçlar ortaya çıkarılmıştır.

Ürünlerin toplayıcıya hareket ettiği sistemlerin gelişmesi ile geleneksel toplama ekipmanlarının kullanımı için bulunan geniş koridorlara ihtiyaç kalmamıştır. Bu sayede depolarda daha çok ürün depolanabilmektedir. Yeni nesil bu depolar sıkıştırılmış depolar olarak isimlendirilmektedir. Yeni nesil sıkıştırılmış depolar, bilişim sistemleri açısından gelişmiş, robotlar, mekikler ve asansörler gibi toplama ekipmanlarının kullanıldığı yapılardır. Yeni nesil sıkıştırılmış depoların bir örneği olan RSKT sistemleri depolama alanı verimliliğini artırır. Bu sistemlerde kurulum ve genişleme gibi işlemler sırasında sevkiyat devam edebilir. İnsan temelli ürün kayıpları ortadan kalkar. Talep değişimine veya mevsimsel etkilere göre önlemler kolaylıkla düzenlenebilmektedir. Çok düşük enerji kullanımı sayesinde daha yeşile duyarlı sistemlerdir.

Depo içerisinde incelenebilecek birçok problem çeşidi bulunmaktadır; ancak bu tezin odak noktası Depo Yeri Atama Problemi (DYAP)'ni dinamik bir yapıda incelemek, sipariş toplama sisteminin verimliliğini artırmak amacıyla yeniden düzenleme yaklaşımının performansını analiz etmek olacaktır.

Dinamik DYAP, depoya gelen her bir ürünün genel verimlilik anlayışına uygun ve stratejik hedefler doğrultusunda depo yerlerine atanması problemidir. Bu problemi çözmek için kullanılan geleneksel yöntemlerin yapısı, gelen ürünleri depolamayı ve konumlarına atamayı hedefleyen basit kurallar dizisinden oluşur. Depolarda kullanılan geleneksel metotlar yerine bu çalışma kapsamında DYAP'yi çözmek için yapay zekâ teknikleri arasında yer alan Yapay Arı kolonisi algoritması (YAK) kullanılmış ve yeni bir depo yeri atama sezgiseli geliştirilmiştir.

Toplama ve yükleme işlemleri sırasında geçen toplam süreyi en küçükleyen 0-1 tam sayılı doğrusal bir matematiksel model kurulmuştur. Matematiksel modelin NP-zor yapısı nedeniyle bal arısı kovanlarının sahip oldukları sürü zekâsını taklit ederek bu yapıdaki problemlere, kısa sürede en iyi sonuca yeterince yakın sonuçlar üreten, meta-

sezgisel algoritmalarından biri olan YAK algoritması kullanılmıştır. YAK algoritmasında besin kaynakları muhtemel çözümleri göstermektedir, besin kaynağının kalitesi ile ilgili bilgiler üyelik fonksiyonu ile hesaplanmaktadır.

Depolarda sipariş toplama işlemi sırasında farklı noktalara gerçekleştirilen seyahatler toplamı bir sipariş rotasını oluşturmaktadır. Aynı sipariş içerisinde sıkça bulunan ürünlerin depo içerisinde yakın yerlere yerleştirilmesi ile sipariş süreleri azaltılabilir. Bu amaçlar doğrultusunda K-DYAP isminde matematiksel modelin karesel formu geliştirilmiştir. Sipariş teslim süresini ve sipariş toplama süresini azaltacak çözümler bulmak ve bunları uygulamaya geçirmek hem bilimsel hem de yönetsel katkılar sağlar.

Geleneksel depolarda sipariş toplama maliyetini oluşturan bileşenler incelendiğinde, toplama işleminde kullanılan işçilik maliyetinin deponun en önemli maliyet kalemlerinden biri olduğu ortaya çıkmıştır. Geleneksel depolarda yeniden düzenleme işlemi için daha fazla işçi istihdam etmek ya da fazla mesai yaptırmak gerekmekteydi. Fakat yeni nesil sıkıştırılmış depolarda toplama işlemi robotlar tarafından yapılmaktadır. Bu nedenle yeniden düzenleme işlemi insansız olarak, mesai saatleri dışında veya sipariş toplama süreci ile eş zamanlı olarak rahatlıkla yapılabilir. Bu çalışma kapsamında RSKT sisteminde yeniden düzenleme işleminin sipariş toplama süresini önemli oranlarda düşürdüğü benzetim tekniği kullanılarak ispatlanmıştır.





# **DETERMINATION OF PICKING POLICIES IN ROBOTIC COMPACT BIN PICKING STORAGE SYSTEMS WITH ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM**

## **SUMMARY**

In this thesis, the subjects of warehouse design and operations management are investigated by considering technological developments. Robotic Compact Bin Storage (RCBS) systems, which are among the systems based entirely on automation, have been examined in detail, and notations representing the structural features of the system have been produced. Considering the differences between the systems, pickers to parts and parts to pickers have begun to separate today. The order-picking process of the RCBS system has been analyzed in detail, and results that will be beneficial to both researchers and practitioners have been revealed.

In this thesis, new methods and concepts are presented to model order picking systems and analyze their performance in the RCBS system. Specifically, in this thesis, SLAP is dynamically investigated in multiple periods with the help of heuristic and metaheuristic algorithms. In addition, significant savings have been achieved in total travel times and labor hours in terms of OPP in RCBS systems. Significant gains in collection times have been achieved by testing the rearrangement approach at different levels. At the same time, the structure of the RCBS system, which provides higher collection efficiency compared to the traditional storage methods used, has been examined in detail. The effect of the improvements on the system has been tested using the simulation technique. The concepts and models discussed in this thesis offer warehouse researchers and practitioners new perspectives to understand and improve order picking system performance.

Picker to parts systems where the pickers go to the address of the relevant product and transport the products to the loading area with the help of various equipment in corridors with a certain plan. Forklifts, pallet trucks or special collection baskets are used as collection equipment in these warehouses. The systems in which the picker moves to the product are also called traditional manual warehouses in the literature. Studies on traditional manual warehouses are frequently encountered in the literature.

In parts to picker systems, an automatic vehicle takes the product from its address and delivers it to the order picker. After the products are received by the order picker, the remaining products, if any, are taken back to the address. The picking elements used in these systems are faster than picker to parts systems. For this reason, the order completion time is shortened in parts to picker systems

With the development of parts to picker systems, wide corridors are no longer needed to use traditional picking equipment. In this way, more products can be stored in warehouses. These new-generation warehouses are called compact warehouses. New-generation compact warehouses are advanced in information systems, where

collecting equipment such as robots, shuttles, and lifts are used. RCBS systems, an example of new-generation compact warehouses, increase storage space efficiency. In these systems, shipment may continue during operations such as installation and expansion. Human-based product losses are eliminated. Measures can be easily arranged according to demand change or seasonal effects. They are more green-sensitive systems thanks to their very low energy use.

The Storage Location Assignment Problem (SLAP), one of the several sorts of problems that can be examined in the warehouse, will be the focus of this thesis. In order to improve the effectiveness of the order picking system, the performance of the rearrangement strategy is investigated.

Dynamic SLAP is the problem of determining the locations of each product coming to the warehouse by the general efficiency understanding and according to the strategic targets. The traditional methods used to solve this problem consist of a simple set of rules aimed at storing incoming products and assigning them to their location. Instead of the traditional methods used in warehouses, the Artificial bee colony algorithm, which is among the artificial intelligence techniques, was used to solve SLAP within the scope of this study, and a new warehouse location assignment heuristic was produced.

A 0-1 integer linear mathematical model has been established, which minimizes the time spent during the picking and loading operations. Due to the NP-hard nature of the mathematical model, the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, one of the meta-heuristic algorithms, produces near-optimal solutions in a short time by imitating the swarm intelligence of honey bee hives, has been used. In the ABC algorithm, the food sources show possible solutions, and the information about the quality of the food source is calculated with the membership function.

An order route is the sum of the operations performed between different points during the warehouse order-picking process. Order times can be reduced by placing products found in the same order in close places in the warehouse. For these purposes, the Quadratic form of the Q-SLAP mathematical model was produced. Congestion in the picking area increases order delivery time and order completion time. Finding solutions to reduce congestion and putting them into practice provides scientific and managerial contributions.

Congestion in the picking area increases order lead time and completion time. Finding solutions to reduce congestion and putting them into practice provides great advantages for OPP. Re-arrangement approach has been developed in the literature, which will provide the opportunity to be operationally prepared by noticing such situations in advance. In the years when this approach was tested, due to the use of traditional warehouses, the effects of the measures taken on labor costs and order delay were at an acceptable level. The re-arrangement approach, which can only be performed with robots in RCBS systems, has been analyzed in terms of various performance criteria.

The components that make up the cost of order picking in the warehouses are examined. It has been revealed that the labor cost used in the picking process is one of the highest costs of the warehouse. In traditional warehouses, rearrangements require more workers or overtime. However, in the new generation compact warehouses, the

picking process is done by robots. For this reason, the rearrangement process can be unmanned, outside working hours, or simultaneously with the order-picking process.

In the RCBS system, robots can visit more than one point for an order and queue in front of the stations to prepare different orders. Exact analysis of such systems is difficult today. A simulation model is developed to dynamically predict the performance of the RCBS system (for example, the average completion time of the order in the system, the average total picking time, the average total reorder time, the average total loading time, the simulation time, etc.) under different storage strategies. Within the scope of this study, it has been shown that the rearrangement process in the RCBS system reduces the order-picking time using the simulation technique.

## 1. GİRİŞ

Hammadde, yarı mamul ve bitmiş ürünlerin, bir yerden başka bir yere nakledilmeyi beklerken fiziksel olarak tutulduğu ve depolandığı tedarik zincirinin alanlarına depo denir. Müşteri taleplerindeki dalgalanmalar, üretim ve tüketim oranları arasındaki farklılıklar, üretim tesisleri ile pazar arasındaki coğrafi uzaklık gibi nedenlerle belirli miktarda stok tutma ihtiyacı bulunmaktadır. Bu nedenle, tedarik zincirinin en önemli yapı taşlarından biri olan depoları kurmak ve yönetmek önem arz etmektedir. Piyasa koşulları dikkate alındığında, müşteri memnuniyetini en üst düzeye çıkarmak için tedarik zincirindeki süreçlerin kesintiye uğramadan devam etmesi ve bununla birlikte maliyetleri en aza indirmek önemlidir (Van den Berg ve Zijm, 1999).

Günümüzde şirketlerin üretim kapasitelerini artırmayı, envanter seviyelerini azaltmayı amaçladıkları görülmektedir. Bu amaç doğrultusunda depolara yeni hedefler belirlenmiştir. Depoların stratejik öneminin fark edilmesinin ardından envanter seviyelerinin azaltılması, müşteri servis performanslarının iyileştirilmesi ile müşteri siparişlerinin daha kısa sürede ve eksiksiz şekilde karşılanabilir hale gelmesi gibi verimlilik artışını sağlayacak stratejik hedefler ön plana çıkmıştır (Gue ve ark, 2007).

Son yıllarda müşteri siparişleri içerisindeki ürün çeşitleri artarken sipariş içerisindeki ürün miktarları azalmıştır. Bunların yanında sipariş verme sıklığı artarken, siparişlerin tam zamanında teslim edilmesi beklenmektedir. Bu nedenlerle tedarik zincirinde bulunan tüm işletmeler lojistik operasyonlarını günümüz ihtiyaçlarına uygun seviyelerde planlaması gerekmektedir. Bu akış içerisinde en önemli süreçlerden biri de depolama sürecidir (Baker ve Canessa, 2009).

Son zamanlarda tedarik zincirlerinin önemli bir yapı taşı konumuna gelmiş olan depolar, sevk zamanlarının kısaltılması ve müşteri sipariş sürelerinin azaltılmasını sağlayan, ticari değeri olan ürünleri korumak ve saklamak amacıyla yapılmış fiziksel yapılarıdır. Tam ve yarı mamul üreticileri, ithalat ve ihracat firmaları, ticari işletmeler, toptan ve perakende satıcılar, otomotiv, gıda, sağlık, perakende, tekstil, vb. sektörlerde hizmet veren üreticiler gibi pek çok işletme tarafından kullanılmakta olan depolar, daha çok şehirlerin endüstriyel bölgelerinde yer almaktadır (Kennedy ve ark. 2002).

İçerisindeki ürünlerin taşınması amacıyla vinç, forklift gibi araçlar ve depolarken kullanılan paletler ve kutular, depo için önemli ekipmanlardır. Depolar, depo yöneticisi, sevkiyat sorumlusu, bilgisayar operatörü ve toplama ekipmanı operatörü vb. alanında uzman kişilerin çalıştığı işletme birimleridir.

Depolanacak ürünlerin özelliklerine göre depolar farklılaşabilir. Kimyasal içerikleri nedeniyle kolay yanabilen, toksik, korozif veya aşındırıcı, oksitleyici, patlayıcı maddeler ve sıkıştırılmış gazların depolandığı depolara Tehlikeli Madde Depoları (TMD) denilmektedir. Bu depolarda oluşabilecek riskler göz önüne alınarak çeşitli önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu depolarda çeşitli ekipmanlar yardımıyla veya katı kurallar koyularak önlemler alınmıştır (Salihoğlu, 2010). Kimyasal ürünlerin herhangi bir durumda birbirleriyle etkileşim göstererek risk oluşturmasının engellemesi gerekmektedir. Depolanacak olan kimyasal ürünlerin Malzeme Güvenlik Bilgi Formları (MBF) depolanma koşulları ile ilgili detaylı bilgiler içermektedir. Bu bilgi formlarındaki kurallar doğrultusunda ürünlerin TMD içerisinde uygun yerlere yerleştirilmesi gerekmektedir.

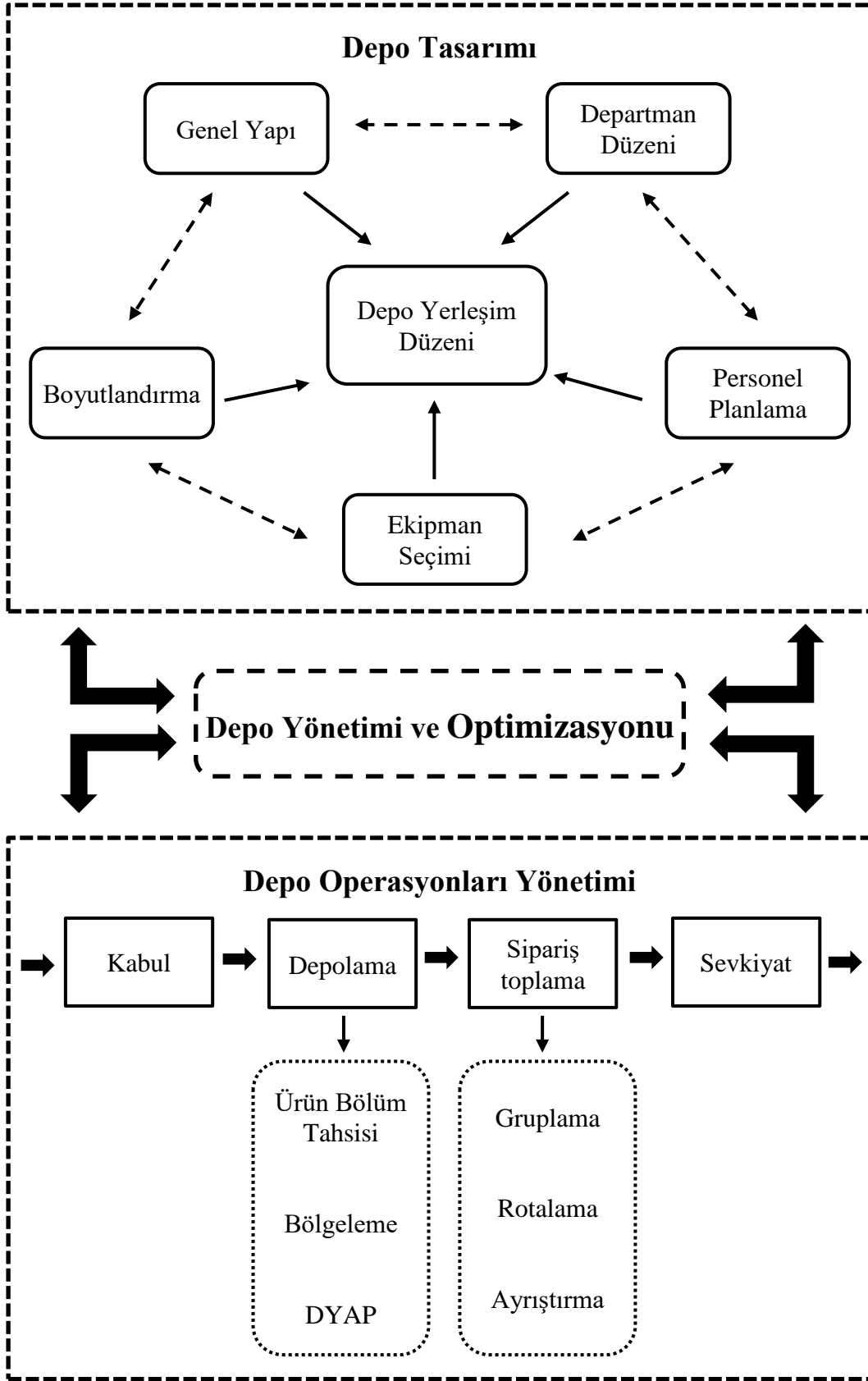
Günümüzde kullanılan depoların önemli bir bölümü de soğuk hava depolarıdır. Soğuk hava depoları genellikle uygun sıcaklıkta ilaç, gıda ve tarım ürünleri saklamak için kullanılır. Depoyu istenilen sıcaklıkta tutmak için kullanılan havalandırma sistemleri enerji maliyetlerini yükseltmektedir. Soğuk hava depolarında maliyetlerin %60-70'i soğutma için kullanılan enerji maliyetleridir (Cheng ve Zhai 2018). Soğuk hava depolarında; depo duvarlarının yalıtım açısından uygun olmaması, soğuk hava perdeleri kullanılmaması, depoda sıcaklık seviyelerinin otomatik kontrol cihazları ile takip edilmemesi, soğutma ekipmanlarının bakımlarının zamanında yapılmaması gibi çeşitli nedenlerle enerji verimliliği düşük olabilir (Sun ve ark. 2019).

E-ticaret depolarında ürünlerin son kullanıcılara hızlı ve güvenilir bir şekilde teslim edilmesi için depo yönetimi etkin bir şekilde ele alınması ve günümüz ihtiyaçlarını karşılayacak operasyonlar planlanması gerekmektedir. Küresel olarak dünyamızı değiştiren ve dönüştüren COVID-19 salgını ile online platformlardan yapılan alışveriş alışkanlığında artış gözlenmiştir. Aynı zamanda salgının etkisiyle birlikte işletmelerin konumlarından kaynaklı olarak pazar paylarında büyük değişimler meydana gelmiştir.

Bu nedenle e-ticaret depolarında gerçekleşen süreçlerde iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır.

Coğrafi konumu nedeniyle son yıllarda salgının da etkisiyle daha fazla tercih sebebi olmaya başlayan Türkiye'nin, uluslararası ticaret açısından Avrupa kıtasına olan yakınlığı büyük avantaj sağlamaktadır. E-ticaret depolarının pazar paylarının artması ile birlik hem dijitalleşmeye olan ilgi artmış hem de depolama çözümlerine yapılan yatırımlarda artış gözlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında bir e-ticaret deposunun depo yönetimi ve optimizasyonu konularında çözümler üretilmiştir.

Depolar, tedarik zincirinin kurtarıcısı rolünü üstlenen ve aynı zamanda maliyetlerin büyük bir kısmından sorumlu olan fiziksel birimlerdir. Bu nedenle "Depo Tasarımı" ve "Depo Operasyonları Yönetimi" kavramları tedarik zincirlerinin verimliliği için daha da kritik hale gelmektedir. Depo tasarımı sırasında bazı kararlar doğru alınmaz ise büyük verimlilik kayıpları ortaya çıkabilir (Koster ve ark, 2007). Depo tasarımı ve depo operasyonları yönetimi ile ilgili bileşenler ve ilişkileri detaylı olarak Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Depo operasyonları ve depo yönetimi kavramları gösterilmiştir.



Depolarda esas olarak kabul, depolama, sipariş toplama ve sevkiyat faaliyetleri bulunmaktadır. Depolarda gerçekleştirilen depo operasyonlarının sürece uygun şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Bu düzenlemenin ise depo tasarımı sırasında oluşturulan depo yerleşim düzenlemesi aşamasında düşünülmesi gerekmektedir (Baker ve Canessa, 2009).

Depo yerleşim düzeni, depolanacak ürün çeşidi ve özelliklerine uygun depolama yöntemi ve raf sistemlerinin seçimi, seçilen rafların uzunluklarının, yüksekliklerinin ve derinliklerinin belirlenmesi, depolama alanı boyutlarının belirlenmesi, sipariş toplama yönteminin ve ekipmanlarının seçilmesi, sevkiyat ve teslimat noktalarının belirlenmesi, Giriş/Çıkış (G/Ç) noktalarının belirlenmesi gibi durumların tespitinden oluşan bir tasarım sürecidir (Revillot Narvaes ve ark. 2020). Depo yerleşim düzenlemesinin zor ve karmaşık bir süreç olmasının temel nedeni ise yukarıda sayılmakta olan kararların birbirleri ile çelişebilir olması ve çok fazla seçeneğin bulunmasıdır. Bu nedenle yerleşim düzeni kararları beraber ele alınması gereken konulardır (Gu, 2005).

Depo içerisinde fiziksel tasarımında alınan kararlar ilerleyen zamanlarda verimlilik açısından bir girdi ve kısıt olarak karşımıza çıkacaktır. Örnek olarak koridorların sayısı, uzunluğu ve yüksekliği toplama işlemini direkt olarak etkilemektedir. Tek yönlü ve uzun koridorlar tasarladığımızda doğal olarak toplama turları uzayacaktır. Yeni koridorlar eklemek veya koridorları çift yönlü yapmak için genişletmek gibi kararlar toplama rotalarını kısaltılabilir ama bu durum depolama kapasitesini azaltacaktır (Kulak ve ark. 2012).

Depo tasarım problemi temel olarak ikiye ayrılmaktadır; birincisi depodaki toplama sürecini hangi yöntem veya yaklaşım ile yapılacağı ile ilgili tasarım ve ikincisi ise deponun fiziksel tasarımıdır. Sipariş toplama tasarımı, deponun çıktı kapasitesinin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Depodan gelen siparişlerin teslimat zamanları, siparişin toplama süresine bağlıdır. Bu nedenle sektöre ve ürün çeşidine uygun bir sipariş toplama tasarımının önemi ortaya çıkmaktadır (Battini ve ark. 2015).

Depoların fiziksel tasarımı yeni bir depo tasarımı, mevcut bir deponun genişletilmesi veya mevcut bir deponun yeniden tasarlanması olarak üç şekilde gerçekleşebilir.

Mevcut bir depoyu başarılı bir şekilde yeniden tasarlamak için, deponun mevcut durumunun ayrıntılı bir analizini yapmak çok önemlidir. Gu ve ark. (2010) çalışmalarında yeni bir ürün grubu için bir depo tasarlamak istendiğinde geçmiş veri olmadığı için veri toplama sürecinin daha zor olduğunu belirtmişlerdir.

Depolarda karşımıza çıkan üç önemli fonksiyon hareket, depolama ve bilgi transferidir. Ürünleri teslim alma, depo alanına transfer etme, sipariş toplama, seçme, biriktirme, sınıflandırma ve sevkiyat gibi bileşenler hareket fonksiyonunu oluşturur. Depoya gelen ürünlerin kabul işlemleri, ilgili depo kayıtların tamamlanması, ürünler ile ilgili gerekli kontrollerin yapılması teslim alma işlemini oluşturur. Yukarıda bahsedilmiş tüm bu işlemler sırasında bilgi transferi eksiksiz ve hatasız gerçekleşmesi gerekir. Aksi durumlarda, depolarda sık karşımıza çıkan bazı ürünlerin depo içerisinde bulunamaması gibi durumlar karşımıza çıkabilir.

Depolama sistemleri araştırmaları tedarik zinciri boyunca hızlı ve güvenilir hizmet sürelerine ulaşmak için, talebe dayalı bir organizasyon yürüttüğü gerçeğini yansıtarak ilgi kazanmıştır. Bu eğilim, depo yönetimi ve operasyonları konularına olan ilgiyi büyük ölçüde artırmıştır. Ürünlerin toplanması, bir depodaki tüm iş faaliyetlerinin %60'ını ve tüm işletme giderlerinin %65'ini oluşturabilir (Gademann ve van de Velde, 2005). Bu, depo iyileştirmeleri için sipariş toplamanın yüksek potansiyelini gösterir. Bir deponun tüm alanları aynı toplama maliyetine sahip değildir. Ancak, daha geniş alanlar ve ayrıca G/Ç noktasından daha uzak alanlar daha yüksek toplama maliyetine sahiptir, çünkü toplayıcıların ürünleri toplamak için daha uzun mesafeler kat etmesi gerekir.

Literatürde genellikle paralel koridorlu sırt sırta raf sistemi olan depolar üzerine yapılan çalışmalar göze çarpmaktadır (Henn ve Wäscher, 2012). Farklı yerleşim tiplerine sahip ve üç boyutlu olarak incelenmesi gereken depolar üzerine yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır (Hsu ve ark, 2005). Literatürde karşımıza çıkan iki farklı sipariş toplama stratejisi vardır. Bunlardan ilki toplayıcının her bir siparişi ayrı ayrı toplamasıdır. Bu şekilde her bir sipariş için bir toplayıcı gezinme rotası oluşacaktır. Diğer bir sipariş toplama stratejisi ise toplayıcının birden çok siparişi beraber toplamasıdır (Matusiak ve ark, 2014). İki veya daha fazla siparişin tek bir toplama gezisinde birlikte toplandığı toplama yöntemi sipariş gruplandırma olarak adlandırılır.

Bu nedenle sipariş toplama sistemlerinde iki temel problem karşımıza çıkmaktadır. Bunlar sipariş gruplama ve toplama rotası belirlemedir (Kulak ve ark, 2012).

Grup oluşturmada kullanılan kriterler, siparişler arasındaki ilişkiler, ürünler arasındaki mesafeler ya da siparişlerin zaman pencereleri olabilir. Sipariş gruplamada toplayıcı bir defada birden fazla siparişi beraber toplamış olacaktır (Yener ve ark. 2016).

Siparişleri gruplama işlemi sırasında her siparişin toplama süresinin, zaman kısıtlamalarının ve kapasite limitini karşılayacak ve toplam gezinme süresini en aza indirmek için sipariş emirlerini partilere ayıran ve her parti için uygun bir operasyonel politika belirleyen bir sipariş gruplama modeli geliştirilmesi gerekecektir (Pan ve Liu, 1995).

Günümüzün küreselleşen rekabet ortamında firmaların ön sıralarda yer alabilmeleri için işletme maliyetlerini düşürmekle beraber müşteri memnuniyetini de maksimum seviyede tutmaları gerekmektedir. Bu gerekliliğin yerine getirilmesinde depo operasyonlarının etkinliği büyük önem taşımaktadır. Depo operasyonlarının iyileştirilebilmesi için öncelikle problemlerin iyi analiz edilmesi gerekir. Bu anlamda Sipariş Toplama Problemi (STP)'ne yönelik yapılan çalışmalar operasyonel maliyetin azaltılmasına büyük katkı sağlamaktadır. Bu iyileştirmelerin arasında sipariş toplayıcısının gezinme mesafesinin en küçüklenmesi üzerinde önemle durulmuştur. Bu işlem çoğu çalışmada sipariş gruplama problemini de içine alarak yerine getirilmiştir (Ardjmand ve ark. 2019).

Sipariş gruplamada bahsi geçen grup, bir turda toplanmak üzere küme haline getirilmiş sipariş listesini ifade etmektedir. Dolayısıyla sipariş gruplama problemi aslında toplayıcının her sipariş için gitmesi gereken toplam seyahat mesafesini ve toplama süresini, siparişleri grup halinde toplayarak en aza indirmeyi amaçlayan bir strateji iken bu grupların neye göre oluşturulacağı sorunu bu stratejiyi bir problem haline getirmiştir. Sipariş grupları rastgele oluşturulursa depo içerisinde birbirine uzak bölümlerde yer alan ürünleri içeren siparişlerin hazırlanma süresinde gecikmeler oluşabilir (Xiang ve ark. 2018).

Depolarda aynı zamanda çok sayıda malzeme tipi içeren siparişler olabilir ve bu siparişlerde yer alan malzemeler deponun çok farklı noktalarında yer alabilir. Yalnızca

bir toplayıcı tarafından siparişin toplanması sipariş toplama süresini uzatabilir. Bu durumlarda bölgesel olarak farklı sipariş toplayıcılarını kullanmak daha kısa sürede sipariş toplama imkânı verecektir. Bu hareketleri ortadan kaldırmak için geliştirilen bölgesel toplama yöntemi tek bir rota ile siparişin toplanması yerine siparişte yer alan malzemelerin aynı anda birkaç depo çalışanı tarafından toplanmasını içerir. Sipariş bölgelere ayrıldığı için toplayıcı sadece kendi bölgesindeki kısa bir mesafeyi kat etmek durumundadır (Zhang ve ark. 2017).

Öncelikle depo ve sipariş toplama işlemi bölgelere ayrılır ve daha sonra bölgelerden toplanmış olan malzemeler ait oldukları siparişlere göre birleştirilir. Bölge toplama stratejisinin uygulandığı durumlarda tüm toplayıcıların iş yükü aynı olmalıdır (Koo, 2009). Bölgesel toplama yöntemi, sipariş toplama alanındaki trafik sorununu azaltmaktadır. Sipariş toplayıcı depodaki tüm toplama alanı yerine, bir bölgede çalışacağı için, ait olduğu bölgeyi ve ürünleri daha yakından tanımaktadır (Yu ve Koster, 2009).

Bölgesel toplama sonrasında siparişlerin tekrar birleştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu durum bölgelerden toplanmış olan malzemelerin daha sonra ait oldukları siparişlere göre birleştirilmesini gerektirir. Günümüzde bu dezavantajı ortadan kaldırmak için konveyörler ve sipariş sıralayıcılar gibi sistemler bulunmaktadır. Bölgelere ayırma işlemi sırasında malzemeler fiziksel özelliklerine, talep görme seviyelerine, uygunluk seviyelerine veya varış noktalarına göre kümelere atanır (Kim ve Smith, 2012). Bölgelerin sayısı, büyüklüğü ve içerisindeki ürünlerin kararı gibi değişkenlerin sipariş toplama süresini azaltacak şekilde dikkatlice belirlenmesi gerekir (Kuo ve ark. 2016). Bölgeleme yapılması sonucunda depolarda depolama maliyetlerinde bir azalma meydana gelebilir.

Günümüzde depolar, sadece ürünlerin saklandığı ve muhafaza edildiği yerler değildir. Depolarda ürünlerin kabulü, rafa yerleştirilmesi, sipariş hazırlanması, gerekli ise elleçleme, paketleme, kontrol ve sevkiyat gibi işlemlerinin gerçekleştirildiği alanlardır. Toplama işlemi, siparişi alınan ürünlerin buldukları stoklama alanından manuel olarak veya otomatik sistemlerle toplanarak sevkiyat noktasına getirilmesini kapsamaktadır (Hwang ve Cho, 2006). Deponun verimliliğini etkileyen en önemli işlem sipariş toplama değildir. Siparişteki ürünlerin depodaki stok alanlarından teslim alınıp

sevkiyat alanına iletilmesi ve müşteriye gönderilmesi işlemleri sipariş toplama faaliyetini oluşturur (Tappia ve ark. 2017).

Bir şirketin günümüz pazarında rekabet etme yeteneğini artırmak için, sipariş teslim sürelerini kısaltması çok önemlidir. Bu nedenle esnek ve verimli bir sipariş toplama sisteminin geliştirilmesi gerekmektedir. Sipariş toplama süreci, müşteri siparişinde belirtilen sayıda ürünün toplanması ve hazırlanması olarak tanımlanabilir (Gademann ve van de Velde, 2005; Frazelle, 1989). Bu nedenle işletmelerin bu süreçleri etkin bir şekilde gerçekleştirmelerinin önemi vurgulanmaktadır.

Sipariş toplama, gün içerisinde sürekli tekrarlanan bir süreçtir. Sipariş toplama sırasında küçük iyileştirmeler uygulandığında bile işletme maliyetleri azalmaktadır. Sipariş toplama; deponun yapısına, alınacak siparişlere, ürünlerin fiziksel özelliklerine ve toplama işleminde kullanılan ekipmanlara göre değişiklik gösterebilir (Wutthisirisart ve ark. 2015). Sipariş toplama; gezinme, arama, toplama ve hazırlama gibi farklı bileşenlerden oluşmaktadır. Gezinme en çok zaman alan bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır. İşçilik maliyeti en çok gezinmeden kaynaklanmaktadır ve katma değer yaratmayan bir aktivitedir (Kim ve ark. 2003).

Dallari (2006) sipariş toplama sistemlerinin sınıflandırılması, uygun depo toplama sisteminin seçilmesi için yaptığı çalışmada farklı ürün tiplerine, sipariş hacimlerine ve ürün yapılarına göre sınıflandırmalarda bulunmuştur. Ürün hacmi 0,5 m<sup>3</sup>'ten küçük ürünler için günlük toplanacak sipariş miktarına ve depolanacak ürün miktarına göre uygun olan sipariş toplama sistemleri üzerinde durmuştur (Dallari, 2006; Aly, 2010).

Depolar, sipariş toplama ve yükleme sistemine göre manuel, yarı otomasyonlu sistemler ve tam otomasyona dayalı sistemler olmak üzere üç tipte sınıflandırılabilir. Sipariş toplama süreci depolama alanında kullanılan ekipmanlara, operasyonlara ve politikalara bağlı olarak değişmektedir. Farklı sipariş toplama şekillerini aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür (Jin ve ark. 2020).

- Toplayıcının ürünlere hareket ettiği sistemler
- Ürünlerin toplayıcıya hareket ettiği sistemler

Depolanacak olan ürünün, toplam sipariş içerisindeki frekansı, depolanacak palet miktarı, ağırlığı, hacmi, kutu ebatları, saklama koşullarındaki özel durumlar gibi tüm özel ve genel kısıtları bir arada düşünerek depo adresine karar verme işlemine Depo Yerine Atama Problemi (DYAP) denir. DYAP için kullanılan bazı temel yaklaşımlar aşağıda sınıflandırılmıştır (Zaerpour ve ark. 2013; Kim ve ark. 2003; Petersen ve Aase 2004; Yu ve Koster 2009).

- Rastgele stoklama: Benzer ürün grupları uygun olan boş alanlara eşit olasılıklarla rastgele atanmaktadır. Olumsuz yönü, ürünlere ulaşmak için kat edilen mesafenin artmasıdır.
- En yakın yere stoklama: Ürünler operatör tarafından ilk görülen boş alana atanır. Olumsuz yönü, deponun arka tarafındaki alanlar boş kalmaktadır.
- Tahsis edilmiş alanda stoklama: Her ürün önceden belirlenen bir alana atanır. Olumsuz yönü, stokta bulunmayan ürünün alanının kullanılamamasından dolayı depolama alanı kullanım verimliliği düşmektedir.
- Tam devir stoklama: Ürünler devir hızlarına göre stoklanır, yüksek devir hızına sahip ürünler yakın yerlere, düşük devirli ürünler uzak yerlere atanır.
- Grup ve sınıf tabanlı stoklama: Ürünler arasındaki ilişkilere göre yapılan sınıflandırma "grup tabanlı" atamadır. Sınıf tabanlı stoklama ise Pareto analizinden veya farklı analizlerden yararlanılarak yapılabilir.

Geleneksel toplama ve yükleme ekipmanlarıyla birlikte tasarlanabilecek depolarda ne kadar verimlilik çalışması yapılsa da çoğu sektörün ihtiyaçları karşılanamamaktadır. Bu nedenle günümüzde artık akıllı depo sistemi olarak isimlendirilen ve günümüz teknolojisinin nimetleri olarak sayılabilecek robotlar, mobil bilgisayarlar ve yapay zeka gibi bazı teknolojilerden faydalanılan, ürünün toplayıcıya robotlar tarafından taşındığı ve istasyonlarda siparişlerin hazırlandığı sistemler kullanılmaktadır.

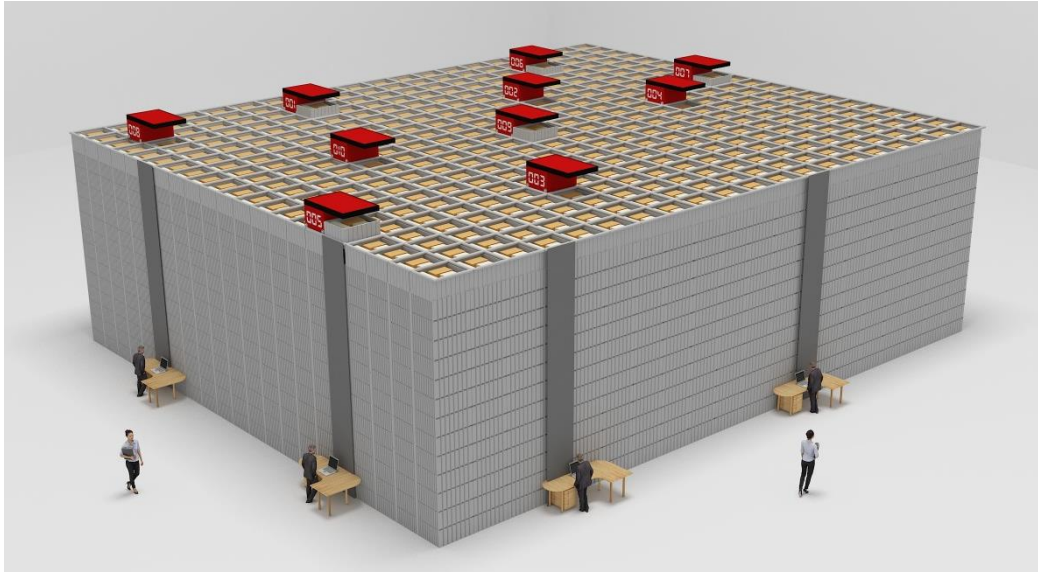
### **1.1. Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama Sistemleri**

Depolarda kullanılan sistemler tarihsel gelişimine göre sıraladığında üç farklı sistem karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki toplayıcıların ürünlere hareket ettiği manuel depolar, ikincisi ürünlerin toplayıcılara hareket ettiği yarı otomasyonlu depolar ve

üçüncüsü de yine ürünlerin toplayıcılara hareket ettiği tam otomasyona dayalı depolardır (Van den Berg ve Zijm, 1999).

Günümüzde depolarda insan yerine sipariş toplayıcı olarak robot, mekik veya asansör gibi bilişim teknolojisi yardımı ile istenilen ürünü sipariş toplayıcıya yönlendirilen araçlar kullanılması, raflar arasında büyük koridorlar bırakılmasını gereksiz hale getirmiştir. Eskiden insanların forkliftlerle ürünleri taşıdığı koridorlar artık depolama alanı olarak kullanılmaktadır. Bu tarz depolara, sıkıştırılmış depolar denilmektedir. Sıkıştırılmış depolarda deponun büyük bir bölümü depolama alanına ayrılır ( Mirzaei ve ark. 2017).

Robotlar, kutular, sevkiyat noktaları ve bunları yöneten bir bilişim sistemiyle kurulmuş olan üç boyutlu depolamaya imkân veren tam otomasyona dayalı depolara Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama (RSKT) sistemleri denilmektedir (Şekil 1.2).



**Şekil 1.2.** RSKT sistemlerinin genel görüntüsüdür.

RSKT sistemlerinin ürünlerin depolandığı kutuları, robotlar aracılığı ile istasyonlara taşıma süreçleri detaylı bir şekilde planlanmalıdır. Bu sistemlerde ürünlerin toplama ve yükleme işlemlerini istasyonlarda gerçekleştiren sipariş toplayıcılarının hareket etmeleri gerekmez. Birden fazla robot ile farklı kutulara çok kısa sürelerde ulaşılması sağlanmaktadır.

RSKT sistemlerin avantajları:

- Depolama alanı verimliliğini artırır.
- Kurulum, genişleme gibi işlemler sırasında sevkiyat devam edebilir.
- Ürün kayıpları ortadan kalkar.
- Mevsimsel etkilere göre kolay düzenlenebilmektedir.
- Çok düşük enerji kullanımı nedeniyle yeşile daha duyarlı bir sistemdir.
- Robotlar bataryalarını kendi kendilerine doldurabilirler.
- İş gücünden kazanç sağlarlar.

RSKT sistemlerinin tasarım aşamasında öncelikle aşağıdaki özellikler analitik tekniklerle belirlenmelidir.

- Deponun fiziksel yapısı
- Teslimat ve sevkiyat noktaları
- Sipariş toplama istasyonlarının yeri ve sayısı
- Robot sayısı
- Robot rotaları ve trafiği
- Robotların boşta bekleme yerleri
- Robot şarj istasyonlarının yerleri

RSKT sistemlerinin temel amacı, iç lojistiğin kalitesini artırmaktır. RSKT, robotlar tarafından işletilen otomatik bir depolama sistemidir. İş gücü ihtiyacını azaltabilmesi, depolama kullanımını en üst düzeye çıkarabilmesi ve günde 24 saat çalışabilmesinin yanı sıra yeşil bir enerji ürünü olması nedeniyle başarı elde etmiştir.

RSKT sistemi, alüminyum bir ızgara içinde üst üste istiflenmiş kutulardan oluşmaktadır. Ardından robotlar, kutuları mantıksal bir sırada toplar, düzenler ve depolar. Gelişmiş algoritmalarla robotlar, sorunsuz işlemler için sensörler aracılığıyla iletişim kurar. Bu sistem için birim başına toplama süresini azaltmanın kilit faktörlerinden biri, robotların her zaman yüksek frekanslı ürünleri ızgaranın en üst



seviyelerine yerleřtirmesi, dūřuk frekanslıları ise ızgaranın alt seviyelerine yerleřtirmesidir.

Her hūcre, ūst ūste depolanan belirli sayıda kutudan oluřmaktadır. Iızgaranın ūstünde robotlar yatay ve dikey olarak hareket etmektedir. Depo ihtiyaçlarını gōz ūnnde bulundurularak, RSKT ızgarası farklı yūkseklilik ve ūekil konfigūrasyonlarında ūretilenmektedir.

Kutular, ūrūnlerin depolandığı temel modūldūr. Kutular farklı ebatlarda tasarlanabilir ve belirli ūzellikleri elde etmek için farklı malzemelerden ūretilir, ūrneğın elektronik endūstrisi için anti-statik kutular kullanılmaktadır. Tūm kutuların ızgaralara sırasıyla yerleřtirilmesi, ızgaralar arasında kullanılmayan bořluk bırakılmaması, depolama alanı verimliliğini artırır.

Sipariř hazırlama istasyonları, robotlar tarafından kutuların getirildiğı ve operatōrler tarafından sipariřlerin hazırlandığı alanlardır. İstasyonlar, ızgaranın çeřitli bōlgelerine istenilen sayıda konumlandırılabilir. Bir robot bir kutuyu bir istasyona teslim ettiğinde, istasyon bu kutuyu daha ūnce kullanılan kutu ile deėiřtirir ve robot diėer kutuyu depoya geri gōtūrūr. Bōylece, yeni kutular arka arkaya teslim edilir ve operatōr nadiren kutular için beklemek zorunda kalır. Her istasyonda ūrūn bilgilerini ve miktarlarını gōsteren bir operatōr paneli bulunmaktadır.

Robotlar, RSKT sistemlerinin en ūnemli bileřenidir. Bunlar, kutuları hareket ettiren iřçiler olarak dūřūnülebilir. Bir robotun iki eksen boyunca hareket etmesini saėlayan iki takım tekerleėi vardır. Bu, tūm robotların ızgara ūzerinde herhangi bir konuma ulařmasını mūmkūn kılar. Robot, ızgarada depolanan kutuları almak, tařımak ve yerleřtirmek için bir asansōrle donatılmıřtır. Robot, kontrol sistemi ile kablosuz baėlantı ūzerinden iletiřim kurar ve gerektiğinde otomatik olarak ūarj olur.

## **1.2. Problem**

DYAP, ūrūnlerin depo içerisinde uygun alanlara ve bōlgelere yerleřtirilmesi problemidir. Temel olarak depoları ūrūn adresleri sabit ve belirli olanlar ve ūrūn adresleri ortak kullanılan depolar olarak ikiye ayırabiliriz. Depo adresleri sabit ve belirli olan depolarda herhangi bir ūrūn depoda bulunsun ya da bulunmasın, o ūrūn

için depoda belirlenmiş bir raf ve hücre ayrılmaktadır. Bu tarz depolarda matematiksel model yardımıyla her bir ürün için depo içerisindeki dolaşma mesafesini en az yapacak ürün yerleşimini elde edebiliriz. Ürün adresleri ortak kullanılan depolarda ise depo içerisindeki bir hücre bir dönem A ürünü için kullanılırken başka dönem B ürünü için kullanılmaktadır. Günümüzde depoların çoğunda, depo içerisindeki alanlar farklı ürünler için farklı zamanlarda ortak kullanılmaktadır (Fontana ve Nepomuceno, 2017).

Depo tasarımı ve yönetimi konularında kapsamlı olarak incelenen DYAP, depolanacak ürünün tüm özel ve genel kısıtlarını dikkate alarak bir ürün için bir depo adresi tahsis etme süreci olarak tanımlanabilir. DYAP, toplam siparişteki sıklığı, depolanacak palet sayısı, ağırlığı, hacmi, kutu boyutları, saklama koşulları ve istisnalar gibi birçok ürün özelliği dikkate alınarak yapılır.

Gu ve ark. (2007) çalışmasında DYAP'yi bilinen bilgi seviyesine göre aşağıdaki gibi sınıflandırmıştır.

- DYAP/II depolama alanı ile ilgili bilgiler; fiziksel biçimi ve yerleşim şekli bilinmektedir.
- DYAP/PI depolama yerleri ile ilgili bilgiler; fiziksel boyutları, ulaşım şekilleri ve yerleri bilinmektedir.
- DYAP/NI Depolanacak ürünler ile ilgili bilgiler; ürünlerin fiziksel özellikleri, ürünlerin talepleri, miktarları, geliş ve gidiş zamanları bilinmektedir.

STP, bir dizi ürünü bir depoda minimum sürede toplama problemidir. STP, zaman ve iş gücü maliyeti nedeniyle şu anda tedarik zincirinde önemli bir darboğazdır. STP, belirli bir sıra ile sipariş içerisindeki ürünlerin toplanması olduğu için sipariş toplayıcının her sipariş için bir rota oluşturmasına neden olabilir. STP literatürde esas olarak Gezgin Satıcı Problemi (GSP)'ne benzetilerek ele alınmaktadır. Hem STP hem de DYAP için üretilmiş matematiksel modeller NP-zor modellerdir (Abdel-Hamid ve Borndörfer, 1994; Frazelle ve Sharp, 1989; Gu, 2005).

Depo içindeki ürünlerin konumu, depo operasyonlarının verimliliğini etkiler. Ancak maliyet açısından en kritik süreç toplama sürecidir. Toplama işlemi, ürünlerin veya toplayıcıların hareketine göre ikiye ayrılır. Toplayıcının ürüne hareket ettiği

sistemlerde, toplayıcı koridorları kullanarak belirli bir ürünü veya birden fazla ürünü toplayarak, sevkiyat alanına teslim eder. Literatürde toplayıcıların verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yaygındır. Son zamanlarda teknolojiadaki gelişmelerle birlikte ürünlerin depolarda hareketine tanık oluyoruz. Ürün aramak için artık toplayıcıların depo içinde dolaşmasına gerek bulunmamaktadır. Ürünlerin toplayıcıya hareket ettiği bu sistemler son yıllarda sıkça kullanılmaya başlanmıştır (Mirzaei ve ark. 2017).

Bu tez çalışması kapsamında hem DYAP hem de STP problemleri analiz edilerek çözümler üretilmeye çalışılacaktır.

### **1.3. Literatüre Tezin Katkısı**

Tedarik zincirlerindeki yeni trendlerle birlikte teknolojik gelişmelerin de depolama sistemlerine büyük katkıları vardır. Eskiden manuel olarak yapılan birçok işlem artık mekanize ve hatta otomatik hale gelmiştir. Yeni nesil depolama sistemlerinde, gelen ürünleri paletlere istiflemek için robotlar kullanılabilir. Bu şekilde, her bir paletin içeriği, paleti depolama alanındaki boş bir yere atayan merkezi bilgisayara iletilir. Gelen paletleri depolama alanına taşımak için konveyörler veya Otomatik Yönlendirmeli Araçlar (OYA) ve paleti depolama alanında doğru konumda depolamak ve almak için Yüksek Depolama Araçları (YDA) kullanılabilir. Bilgi teknolojisi ve depo yönetimi yazılım sistemlerinin geliştirilmesi, yukarıdaki süreçleri sorunsuz bir şekilde entegre eder. Depolarda otomasyon sistemlerinin kullanımının artması işçilik maliyetlerinden tasarruf edilmesini, hataların azaltılmasını ve daha yüksek verimlilik değerlerinin elde edilmesini sağlar. Witron, Swisslog ve Vanderlande gibi Avrupa'daki birçok büyük depolama çözümü sağlayıcısı, bu tür otomatikleştirilmiş depo çözümleri üretmişlerdir. Yeni tedarik zinciri trendlerinin depolama üzerindeki etkisine ilişkin tartışma, sipariş toplama sürecindeki yeni zorlukları ortaya çıkarmıştır. Bu yeni zorlukların üstesinden gelmek için, depolama araştırmacıları ve uygulayıcıları sürekli olarak yeni toplama sistemleri ve depolar için toplama politikaları geliştirmeye ve uygulamaya çalışılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, RSKT sisteminde sipariş toplama sistemlerini modellemek ve performansını analiz etmek için yeni yöntemler ve kavramlar sunmaktadır. Spesifik

olarak, bu tezde, DYAP sezgisel ve metasezgisel algoritmalar yardımıyla çoklu periyotta dinamik olarak incelenmiştir. Ayrıca RSKT sistemlerinde STP açısından toplam seyahat sürelerinde ve işçilik saatlerinden önemli ölçüde tasarruf sağlanmıştır. Yeniden düzenleme yaklaşımını farklı seviyelerde test ederek toplama sürelerinde önemli kazanımlar sağlanmıştır. Aynı zamanda kullanılan geleneksel depolama yöntemlerine kıyasla daha yüksek toplama verimi sağlayan RSKT sisteminin yapısı detaylarıyla incelenmiştir. Sistem üzerindeki iyileştirmelerin etkisi benzetim tekniği kullanılarak test edilmiştir. Bu tezde tartışılan kavramlar ve modeller, depo araştırmacıları ve uygulayıcılarına sipariş toplama sistemi performansını anlamaları ve iyileştirmeleri için yeni bakış açıları sunar.

1. Depo sistemlerinde depolama alanı maliyetlerini düşürmek önemli endişe kaynağıdır. Depo alanının tamamında, depolama alanı için ayrılan bölgenin artırılması depolama alanı maliyetlerini düşürecektir. RSKT sistemleri geleneksel depolara kıyasla depolama alanı verimlilikleri yüksektir. Aynı zamanda depolarda DYAP'yi uygun yöntemlerle çözerek depolama alanı daha verimli kullanılmış olacaktır. Bu çalışma kapsamında YAK algoritması ve depo yeri atama sezgiseli kullanılarak DYAP çoklu periyotta dinamik olarak çözülmüştür.

2. Geleneksel toplayıcıdan parçaya sipariş toplama yöntemleri, sipariş toplayıcılar zamanlarının çoğunu koridorlarda seyahat ederek geçirdikleri için daha az verimliliğe yol açar. Fakat sıkıştırılmış depolarda bu alanlar depolama alanı olarak kullanıldığı için depolama maliyetleri düşecektir. RSKT sistemlerinin yapısı detaylı olarak incelenerek sistemin avantajları detaylı olarak analiz edilmiştir.

3. Toplama alanındaki tıkanıklık, sipariş teslim süresini ve tamamlama süresini uzatır. Sıkışıklığı azaltacak çözümler bulmak ve bunları uygulamaya geçirmek STP açısından büyük avantajlar sağlar. Literatürde bu tarz durumları önceden fark ederek operasyonel olarak hazırlanma imkanı sunacak yeniden düzenleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Öyle ki bu yaklaşım test edildiği yıllarda geleneksel depolar bulunmasından dolayı alınan önlemlerin işçilik maliyetleri üzerindeki etkileri sipariş gecikmesi göze alınabilecek seviyedeydi. RSKT sistemlerinde istasyonlardan bağımsız olarak gerçekleştirilebilecek yeniden düzenleme yaklaşımının çeşitli performans kriterleri açısından analizi yapılmıştır.

4. RSKT sisteminde, robotlar bir sipariş için birden fazla noktayı ziyaret edebilir ve birden çok sipariş işlenmek üzere istasyonların önünde kuyruk oluşturabilir. Bu tür sistemlerin kesin analizi zordur. Farklı depolama stratejileri altında dinamik olarak RSKT sisteminin performansını (örneğin, siparişin sistemdeki ortalama tamamlanma süresi, ortalama toplam toplama süresi, ortalama toplam yeniden düzenleme süresi, ortalama toplam yükleme süresi, benzetim süresi vb.) tahmin etmek için bir benzetim modeli geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının giriş bölümünde depolar ile ilgili genel bilgilerin yanı sıra RSKT sistemleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada incelenen problemler detaylıca anlatılmıştır. Literatür taraması bölümünde toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler ve ürünün toplayıcıya hareket ettiği sistemler ile ilgili çalışmalar, yeni nesil sıkıştırılmış depolar, YAKA ve yeniden düzenleme ile ilgili literatür detaylı olarak tablolar yardımıyla verilmiştir. RSKT sistemi bölümünde, RSKT sistemi ile ilgili bazı parametreler incelenmiş ve sistem notasyonları verilmiştir. RSKT sistemi ile ilgili yapılmış kabuller paylaşılmıştır. Dinamik çoklu periyotta depo yeri atama problemi bölümünde RSKT sistemleri için bazı matematiksel modeller verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan YAKA ve algoritmada kullanılan parametrelerin optimizasyonu anlatılmıştır. Ayrıca depoya gelen yeni ürünler için depo yeri atama sezgiseli üretilmiştir. Yeniden düzenleme bölümünde, bu tezin literatüre önemli katkılarından biri olan yeniden düzenleme ve iyileştirme kavramları tartışılmıştır. Benzetim bölümünde bu tez çalışması için üretilmiş benzetim modelinin yanında benzetim kavramı ile ilgili bilgiler paylaşılmıştır. Sonuçlar ve istatistik bölümünde, tez çalışmasının sonuçları ve sonuçların istatistiksel ispatları paylaşılmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde ise bu tez ile elde edilmiş olan sonuçların endüstriye katkıları tartışılmış ve farklı sektörlere uygulanması ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.



## **2. LİTERATÜR TARAMASI**

Literatürde, depo tasarımı ve sipariş toplama problemlerini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler ve ürünün toplayıcıya hareket ettiği sistemler olarak sınıflandırılabilir. Toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemlerin kullanıldığı geleneksel manuel depoların daha fazla işçilik gerektiren sistemler olmasından dolayı işletme maliyetleri yüksektir. Buna karşılık ürünün toplayıcıya hareket ettiği sistemler, robotlar, taşınabilir bilgisayarlar, otomatik depolama sistemleri vb. gibi teknolojik ekipmanlar kullanılması nedeniyle yüksek kurulum maliyetine ancak düşük işletme maliyetine sahiptir.

### **2.1. Toplayıcının Ürüne Hareket Ettiği Sistemler**

Ürünlerin depo içerisinde belirli bir plan doğrultusunda toplanması sırasında toplayıcıların ilgili ürünün adresine giderek ürünleri aldığı ve yükleme alanına çeşitli ekipmanlar yardımıyla taşıdığı sistemlerdir. Bu depolarda toplama ekipmanı olarak forklift, transpalet veya özel toplama sepetleri kullanılmaktadır. Toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler literatürde geleneksel manuel depolar olarak da isimlendirilmektedir. Literatürde geleneksel manuel depolar üzerine yapılmış çalışmalara sıkça rastlanmaktadır (Caron ve ark. 2000).

Geleneksel manuel depolar göreceli olarak kurulum maliyeti açısından düşük, toplama maliyeti açısından yüksek sistemlerdir. Rosenblatt ve Roll, (1984) çalışmasında kurulum, depolama ve toplama maliyetlerini göz önüne alarak en uygun depo tasarımı analitik teknikler ve benzetim kullanarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada göz önüne alınan üç temel maliyet kalemi; yatırım maliyeti, depolama maliyeti ve sipariş toplama maliyetidir.

Yoon ve Sharp (1995) çalışmasında deponun fiziksel tasarımında en önemli kararlar arasında sayılabilen depo kapasitesi, koridor sayısı, toplama elemanı sayısı gibi parametreleri analitik formüller ile hesaplamışlardır. Pandi ve Palekar (1993)

siparişlerin yetiştirilebilme zamanını göz önünde bulunduracak şekilde bir kuyruk modeli üretmiş ve küçük örnekler için çözmüşlerdir. Aynı zaman da kapı sayısı ve yeri gibi alternatifler benzetim modeli üzerinde test edilerek bulunmuştur. Brockmann ve Godin (1997) esnek bir depo tasarlamak için, malzeme depolama çeşitlerine, malzeme taşıma ekipmanlarına, depo yönetim sistemine ve toplama sırası gibi bileşenler üzerinde yapılacak iyileştirmeler ile daha esnek bir depo tasarlamayı amaçlamışlardır. Caron ve ark. (2000) manuel toplama işlemlerinin yapıldığı bir depoda yerleşim planı için benzetim kullanmışlardır. Heragu ve ark. (2005) ürün bekleme alanı ve fonksiyonel alanların büyüklüklerinin belirlenmesi için matematiksel model önermişlerdir. Bozer (1985) deponun çıktı performansını yükseltmeyi amaçlayan sipariş tasarımları önermiştir ve farklı sezgisellerin performansları benzetim ile karşılaştırılmıştır. Lai ve ark. (2002) farklı büyüklüklerde kâğıt makaralarının stoklanması planlanan bir depo için talep kısıtını göz önüne alarak depo raflarının büyüklüklerini ve miktarlarını hesaplamak için doğrusal programlama temelli bir model önermişler ve iki aşamalı sezgisel ile çözmüşlerdir.

Toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler ile ilgili yapılmış olan bazı çalışmalar incelenerek; problem, amaç fonksiyonu, ekipman tipi ve depo tipine göre Tablo 2.1’de sınıflandırılmıştır.



**Tablo 2.1.** Toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler ile ilgili çalışmalar.

<b>Yazar (Yıl)</b>	<b>Problem</b>	<b>Amaç fonksiyonu</b>	<b>Ekipman Tipi</b>	<b>Depo Tipi</b>
Chen ve Lu, (2012)	Denizcilik	En az toplam seyahat mesafesi	Rıhtım vinci ve kamyon	Rıhtım
Kim ve Smith, (2012)	Araştırma makalesi	En az toplama süresi	Konveyör ve forklift	Dikdörtgensel
Pan ve ark. (2012)	Araştırma makalesi	En az sipariş tamamlama süresi	Forklift	Dikdörtgensel
Ene ve Öztürk, (2012)	Otomotiv	En az seyahat maliyeti	Forklift	Dikdörtgensel
Chuang ve ark. (2012)	İlaç sektörü	En az toplama mesafesi	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Chiang ve ark. (2014)	Perakende	En az toplam seyahat mesafesi	Forklift	Dikdörtgensel
Pan ve ark. (2014)	Araştırma makalesi	En az toplam seyahat süresi	Forklift	Dikdörtgensel
Zhang ve ark. (2014a)	Denizcilik	En az toplam ceza	Rıhtım vinci	Rıhtım
Zhang ve ark. (2014b)	Denizcilik	En az toplam beklenen ceza	Rıhtım vinci	Rıhtım
Battini ve ark. (2015)	Mobilya sektörü	En az toplam seyahat mesafesi	Forklift	Dikdörtgensel
Pan ve ark. (2015)	Perakende	En az boşta kalma süresi	Konveyör ve forklift	Dikdörtgensel
Wutthisirisart ve ark. (2015)	Araştırma makalesi	En az toplam seyahat mesafesi	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Qin ve ark. (2015)	Çiçekçilik	En az toplam seyahat mesafesi	Toplayıcı	Dikdörtgensel

**Tablo 2.1. (Devamı)** Toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler ile ilgili çalışmalar.

<b>Yazar (Yıl)</b>	<b>Problem</b>	<b>Amaç fonksiyonu</b>	<b>Ekipman Tipi</b>	<b>Depo Tipi</b>
Bortolini ve ark. (2015)	İçecek sektörü	En az seyahat süresi	Forklift	Dikdörtgensel
Quintanilla ve ark. (2015)	Araştırma makalesi	En çok depo alanı kullanılabilirliği	Forklift	Dikdörtgensel
Zhang (2016)	Perakende	En az toplam seyahat mesafesi	Forklift	Dikdörtgensel
Battini ve ark. (2016)	Araştırma makalesi	En az sipariş işlem süresi	Forklift	Dikdörtgensel
Larco ve ark. (2017)	Otomotiv	En az çevrim süresi	Konveyör ve toplayıcı	Dikdörtgensel
Pang ve Chan, (2017)	Bilgisayar parçaları	En az toplam seyahat mesafesi	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Rao ve Adil, (2017)	Ofis ürünleri	En az toplam seyahat mesafesi	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Klodawski ve ark. (2018)	Araştırma makalesi	En az toplayıcı çalışma süresi	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Mehrjerdi ve ark. (2018)	Araştırma makalesi	En az grup işlem süresi	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Manzini ve ark. (2019)	Araştırma makalesi	En az ikmal maliyeti	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Bottani ve ark. (2021)	Araştırma makalesi	En az toplam seyahat mesafesi	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Klumpp ve Loske, (2021)	Elektronik	En az verimlilik skoru	Toplayıcı	Dikdörtgensel
Yang ve ark. (2022)	Araştırma makalesi	En az operasyon maliyeti	Toplayıcı	Dikdörtgensel

Toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler, sipariş teslim sürelerinin kısalması ve depo alanı maliyetlerinin yükselmesi nedeniyle birlikte sanayinin ihtiyaçlarını karşılayamamaya başlamışlardır.

## **2.2. Ürünün Toplayıcıya Hareket Ettiği Sistemler**

Ürünün toplayıcıya hareket ettiği sistemlerde otomatik bir araç, ürünü bulunduğu adresinden alarak toplayıcıya ulaştırır. Getirilen ürünlerin bir kısmı veya tamamı toplama elemanı tarafından alındıktan sonra varsa kalan ürünler tekrar adresine götürülür. Bu sistemlerde kullanılan toplama elemanları, toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemlere göre daha hızlı toplama işlemi yaptığından bu sistemlerde sipariş tamamlanma süresi kısalmaktadır.

Mantel ve Ladeweerd (1995) OYA'lar ile toplama işleminin yapıldığı bir depo ortamı için gezinme rotalarını, kullanılacak OYA sayısını ve operasyonel OYA kontrol parametrelerine göre farklı depo versiyonlarını üretmişlerdir. Bu depolarda sezgisel algoritmaların performanslarını benzetim yardımıyla test etmişlerdir. King ve Kim (1995) OYA sistemlerinin nesne temelli modellemesini yapacak bir yaklaşım önermişlerdir. Beinschob ve ark. (2017) OYA dağılımı ve dolaşımı ile ilgili zaman, maliyet ve kullanılan personel sayısını azaltacak özgün bir sistem kurmuşlardır. Bu sayede manuel yönlendirilerek kullanılan OYA'lar, kendiliğinden rotalanabilir bir duruma dönmüştür. Bechtsis ve ark. (2017) OYA'ların sadece depolarda değil tedarik zincirinin tamamında yaygın olarak kullanılmasını önermişlerdir. Bechtsis ve ark. (2017) tedarik zincirinde OYA'ların işlevlerini çevresel, stratejik ve taktiksel olarak incelemiş ve yıllara, konulara ve dergilere göre çalışmalarını sınıflandırarak sunmuşlardır. Li ve ark. (2017) çalışmasında çoklu OYA rotalaması ve planlaması ile ilgili bir model geliştirmiştir. OYA sistemlerinin rotalarında hareket edebilmeleri ve hassas hareketleri sağlayabilmeleri amacıyla yeni teknolojilerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur.

Bloemer (1993) çalışmasında robotik palet taşıma ekipmanlarının bulunduğu bir depo tasarlamak istemiş ve çalışmasında palet taşıma robotu isimli bir prototip tasarlamıştır. Yuan (2016) kullanılan robotların hızlarını, sayılarını belirlemek için bir model önermiştir. Santos ve ark. (2016) robot kontrol problemi için 6 robot bulunan bir depoda farklı planlama algoritmalarını test etmek için benzetim tekniğinden yararlanmışlardır. Pinkam ve ark. (2016) robotların programlanması problemi üzerine

geliştirdikleri iki algoritmanın performansını benzetim tekniği kullanarak test etmişlerdir. Jung ve ark. (2016) soğuk hava deposunda kullanılan insansız hareket eden forkliftlerin boşta bekleme noktalarının belirlenmesi için iki adet yaklaşım geliştirmişler ve performanslarını benzetim kullanarak test etmişlerdir.

Ürünün toplayıcıya hareket ettiği sistemler ile ilgili yapılmış olan bazı çalışmalar incelenerek; problem, amaç fonksiyonu, ekipman tipi ve depo tipine göre Tablo 2.2’de sınıflandırılmıştır.

**Tablo 2.2.** Ürünün toplayıcıya hareket ettiği sistemler ile ilgili çalışmalar.

Yazar (Yıl)	Problem	Amaç fonksiyonu	Ekipman Tipi	Depo Tipi
Liu ve ark. (2013)	Rulman depolama	En az toplam enerji tüketimi	Vinç	Otomatik depolama sistemi
Meneghetti ve Monti (2013)	Araştırma makalesi	En az seyahat süresi/enerjisi	Vinç	Otomatik depolama sistemi
Gagliarde ve ark. (2014)	Araştırma makalesi	En az vinç seyahat süresi	Vinç	Otomatik depolama sistemi
Zhao ve ark. (2015)	Denizcilik	En az vinç bekleme süresi	Rıhtım vinci	Rıhtım
Pan ve ark. (2015)	Perakende	En az boşta kalma süresi	Konveyör ve forklift	Dikdörtgenel
Yang ve ark. (2015a)	Perakende	En az toplam seyahat süresi	Çoklu mekik	Çoklu mekik ve Otomatik depolama sistemi
Peng ve Yang (2015)	Araştırma makalesi	En az toplam seyahat süresi	Çoklu mekik	Çoklu mekik ve Otomatik depolama sistemi
Yang ve ark. (2015b)	Araştırma makalesi	En çok işlem verimliliği	Çoklu mekik	Otomatik depolama sistemi
25 Meneghetti ve ark. (2015)	Araştırma makalesi	En az mekik seyahat süresi	Mekik	Otomatik depolama sistemi
Wang ve ark. (2016)	Tütün depolama	En az mekik bekleme süresi	Mekik, asansör ve konveyör	Mekik ve Otomatik depolama sistemi
Luo ve ark. (2016)	Denizcilik	En az gemi yanaşma süresi	OYA ve vinç	Rıhtım
Wauters ve ark. (2016)	Araştırma makalesi	En az toplam bekleme süresi	Çift mekik ve vinç	Çift mekik ve Otomatik depolama sistemi
Yang ve ark. (2017)	Araştırma makalesi	En az mekik çevrim sayısı	Çoklu mekik ve vinç	Çoklu mekik ve Otomatik depolama sistemi
Boywitz ve Boysen (2018)	Araştırma makalesi	En az yığın sayısı	Çoklu mekik ve forklift	Çoklu mekik depolama sistemi
Jin ve ark. (2018)	Araştırma makalesi	En az toplam seyahat süresi	Vinç	Otomatik depolama sistemi
Narváez ve ark. (2020)	Araştırma makalesi	En az mekik çevrim sayısı	Çoklu mekik ve forklift	Çoklu mekik depolama sistemi
Jin ve ark. (2020)	Araştırma makalesi	En az toplam seyahat süresi	OYA	Otomatik depolama sistemi
Kumawat ve Roy, (2021)	Araştırma makalesi	Ortalama yüzde mutlak hata	Çoklu mekik	Çoklu mekik depolama sistemi
Yang ve ark. (2022)	Araştırma makalesi	En çok depo alanı	Robot	Otomatik depolama sistemi
Kansy ve ark. (2023)	Araştırma makalesi	En az mekik çevrim sayısı	Çoklu mekik ve forklift	Çoklu mekik depolama sistemi



### 2.3. Yeni Nesil Sıkıştırılmış Depolar

Son yıllarda depolama alanı maliyetlerinin artması ile ürünlerin taşınmasında kullanılan koridorların depolarda depolama alanı olarak kullanılabilme fikri ortaya çıkmıştır. Bu durum koridor olarak kullanılmak üzere tahsis edilen alanların aynı zamanda depolama alanı olarak da kullanıldığı sıkıştırılmış sistemlerin geliştirilmesine yol açmıştır (Mirzaei ve ark. 2017). Yeni nesil sıkıştırılmış depo sistemlerinde koridor bulunmadığından ve ürünler sıkıştırılarak depolandığından, bir ürünü toplamak için başka bir ürünün yerini değiştirme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Literatürde bu durumun farklı şekillerde uygulandığı depo çeşitleri bulunmaktadır.

Yeni nesil sıkıştırılmış depo sistemlerinde birincil amaç, performansı ve depolama kapasitesini en üst düzeye çıkarmaktır. Bu sistemlerde hedeflerden bazıları, bekleme sürelerini, yanıt sürelerini ve kaynak boşa kalma süresini en aza indirmektir (Revillot Narvaes ve ark. 2020).

Ürünlerin her yönde hareketine imkan sağlamak için robot, konveyör, vinç, asansör ve mekik gibi ekipmanlar kullanılmaktadır (Tappia ve ark. 2017).

Sıkıştırılmış depolama sistemleri son zamanlarda tam otomatik depolama sistemleri olarak tasarlanmaktadır. Günümüzde yeni nesil sıkıştırılmış depolar; otopark sistemleri, e-ticaret depoları ve konteyner terminalleri dahil olmak üzere pek çok alanda uygulamaya sahiptirler (Zaerpour ve ark. 2017).

Sıkıştırılmış depolar ile ilgili yapılmış olan bazı çalışmalar incelenerek; problem, amaç fonksiyonu, ekipman tipi ve depo tipine göre Tablo 2.3'te sınıflandırılmıştır.

**Tablo 2.3.** Sıkıştırılmış depolar ile ilgili çalışmalardır.

<b>Yazar (Yıl)</b>	<b>Problem</b>	<b>Amaç fonksiyonu</b>	<b>Ekipman Tipi</b>	<b>Depo Tipi</b>
Zaerpour ve ark. (2013)	Sistemin boyutlarının belirlenmesi	En az beklenen seyahat süresi	Mekik ve asansör	Çoklu küp depolama
Zaerpour ve ark. (2017a)	Sistem boyutlarının belirlenmesi	En az beklenen toplama süresi	Mekik ve asansör	Çoklu küp depolama
Zaerpour ve ark. (2017b)	Depolama boyutlarının belirlenmesi	En az seyahat süresi	Mekik ve asansör	Çoklu küp depolama
Zaerpour ve ark. (2017c)	Sınıf tabanlı depolama politikası	En az beklenen toplama süresi	Mekik ve asansör	Çoklu küp depolama
Sari ve ark. (2005)	Seyahat süresi analizi	En az beklenen toplama süresi	Yüksek depolama	Sıkıştırılmış otomatik depo
Koster ve ark. (2008)	Optimum raf boyutları	En az beklenen seyahat süresi	Vinç ve konveyör	Sıkıştırılmış otomatik depo
Yu ve Koster (2009)	Raf ve bölge tasarımı	En az beklenen seyahat süresi	Vinç ve konveyör	Sıkıştırılmış otomatik depo
Hao ve ark. (2015)	Sıkıştırılmış depo tasarımı	En az beklenen seyahat süresi	Konveyör ve asansör	Sıkıştırılmış otomatik depo
Zaerpour ve ark. (2015)	Depo yeri atama problemi	En az beklenen toplama süresi	Konveyör ve asansör	Sıkıştırılmış otomatik depo
Tappia ve ark. (2017)	Mekik ve asansör taşıma süreleri	En az beklenen seyahat süresi	Mekik ve asansör	Sıkıştırılmış otomatik depo
Kota ve ark. (2015)	Ürün hareketlerinin belirlenmesi	En az beklenen toplama süresi	Mekik	Bulmaca temelli depo
Furmans ve ark. (2011)	Robot ve Refakatçi ile yükleme	En az beklenen toplama süresi	Karis	Bulmaca temelli depo
Alfieri ve ark. (2012)	Yoğunluk ve erişim süresi tespiti	Performans seviyesi	OYA	Bulmaca temelli depo
Gue ve ark. (2014)	Toplayıcı çakışmalarını önleme	En çok çıktı seviyesi	Konveyör ve asansör	Bulmaca temelli depo
Uludağ (2014)	Sistemin özelliklerini araştırmak	En az toplayıcı çakışması	Konveyör	Bulmaca temelli depo
Gue ve Kim (2017)	Ürün hareketlerinin belirlenmesi	En az beklenen toplama süresi	Mekik	Bulmaca temelli depo
Zou ve ark. (2016)	Depo yeri atama problemi	En çok sistem çıktı seviyesi	Robot	RSKT
Mirzaei ve ark. (2017)	Sipariş toplama problemi	En az toplama/yükleme süresi	Mekik ve asansör	Bulmaca temelli depo
Yalçın ve ark. (2019)	Ürün hareketlerinin belirlenmesi	En az taşıma sayısı	Mekik	Bulmaca temelli depo
Ashgari ve Gue, (2021)	Sipariş toplama problemi	En az sipariş sıra numarası	Konveyör	Bulmaca temelli depo



**Tablo 2.3. (Devamı)** Sıkıştırılmış depolar ile ilgili çalışmalardır.

<b>Yazar (Yıl)</b>	<b>Problem</b>	<b>Amaç fonksiyonu</b>	<b>Ekipman Tipi</b>	<b>Depo Tipi</b>
Kang, (2021)	Kutu sıralama problemi	En az kutu hareketi	Robot	RSKT
Kumawat ve ark. (2021)	Seyahat süresi analizi	En çok sistem çıktı seviyesi	OYA	Sıkıştırılmış otomatik depo
Chen ve ark. (2022)	Depo yeri atama problemi	En az enerji tüketimi	Robot	Sıkıştırılmış otomatik depo
Bukchin ve Raviv, (2022)	Ürün hareketlerinin belirlenmesi	En az beklenen toplama süresi	Konveyör	Bulmaca temelli depo
Yunfeng ve ark. (2022)	Çizelgeleme	En az taşıma sayısı	OYA	Bulmaca temelli depo
Ko ve Han, (2022)	Sipariş sıralama problemi	En az taşıma maliyeti	Robot	Sıkıştırılmış otomatik depo
Mirzaei ve ark. (2022)	Depo yeri atama problemi	En az beklenen seyahat süresi	Robot	Bulmaca temelli depo

## 2.4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması, bal arılarının sürü halindeki yaşamlarında kendilerine özgü zeki davranışlarını örnek alarak ve bal arılarının besin bulmada kullandıkları yöntemlerden esinlenerek oluşturulmuş bir optimizasyon algoritmasıdır (Karaboğa, 2005). Son yıllarda popüler hale gelmiş YAK algoritması temel hesaplama ve optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadır. YAK algoritmasında ilk olarak bir başlangıç popülasyonu kurulur ve besin kaynaklarının uyumluluk değeri hesaplanır. Belirli bir döngüde, işçi arı, gözcü arı ve kâşif arı aşamaları sırasıyla, belirli bir iterasyon sayısı kadar tekrarlanır. İterasyonlar sonunda en iyi uyumluluk değerine sahip olan besin, çözüm besin kaynağı olarak belirlenir.

YAK algoritması üzerine yapılan çalışmalar, son yirmi yıllık süreyi kapsamaktadır. Hem numerik hem de kombinatoriyal optimizasyonlarda elde edilen yeterli sonuçlar nedeniyle çoğu araştırmacının ilgisini çekmektedir. Numerik optimizasyon problemleri, kombinatoriyal optimizasyon ile karşılaştırıldığında oldukça kolaydır.

Karaboğa (2005), Karaboğa ve Baştürk (2007a), Zhu ve Kwong (2010), Gao ve Liu (2011) makalelerinde numerik optimizasyon problemlerini incelemiştir. Küre fonksiyonu, Rosenbrock vadisi, Rastrigin fonksiyonu, Griewank fonksiyonu, Ackley fonksiyonu, Schwefel fonksiyonu ve Schaffer fonksiyonu, Karaboğa (2005), Karaboğa ve Baştürk (2007a) ve Zhu ve Kwong (2010) tarafından çözülen ortak test fonksiyonlarıdır.

Karaboğa ve Baştürk (2008) ile Karaboğa ve Akay (2009) ise bazı meta-sezgisel algoritmaların sayısal test fonksiyonu üzerindeki performanslarını karşılaştırmışlardır. Dimitrijević ve ark. (2012), Kapsayıcı Olmayan Konum Problemini (ÖOKP) YAK algoritması ile incelemiştir. Li ve Zhou (2013) depodaki en popüler kombinatoriyal optimizasyon problemlerinden biri olan sipariş gruplama problemini YAK algoritması ile çözmüşler ve toplam seyahat mesafenin azaldığını ifade etmişlerdir. Hu ve ark. (2012) çalışmalarında kombinatoriyal optimizasyon problemi olan DYAP'yi YAK algoritması kullanarak çözmüşlerdir. Geçtiğimiz on yılda, YAK algoritması ile çözülen bazı kombinatoriyal optimizasyon problemleri; tesis yeri belirleme problemi, hücresel yerleşim problemi, araç rotalama problemi, Atölye Akış Çizelgeleme Problemi (AAÇP) ve depo tasarımı problemi gibi problemlerdir (Han ve ark. (2013);

Watanabe ve ark. (2015); Saravanan ve Arulkumar (2015); Yin ve Chuang (2016); Deng ve ark. (2016); Contreras-Cruz ve ark. (2017); Singh ve ark. (2017)). Karaboğa ve ark. (2007) eğitim sürecinde bir sinir ağının ağırlık kümesini optimize etmişlerdir. YAK algoritmasının bazı modifiye edilmiş versiyonları gerçek parametre optimizasyon problemi için kullanılmıştır (Akay ve Karaboğa, 2012). Karaboğa ve ark. (2014), YAK algoritması üzerinde yapılmış çalışmaları sistematik bir şekilde derleyerek literatüre kazandırmışlardır.

YAK algoritması hem nümerik optimizasyonda hem de kombinatoriyal optimizasyonda elde edilen güzel sonuçlar nedeniyle çoğu araştırmacının ilgisini çekmektedir. YAK algoritması ile ilgili yapılmış bazı çalışmalar çözülen problem ve gerekli açıklamalar doğrultusunda Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

**Tablo 2.4.** YAK algoritması ile ilgili çalışmalardır.

<b>Yazar (Yıl)</b>	<b>Problem</b>	<b>Açıklama</b>
Karaboğa (2005)	Nümerik fonksiyon optimizasyonu	Spherer, Rosenbrock valley ve Rastrigin fonksiyonu test edilmesi
Karaboğa ve ark. (2007)	Yapay sinir ağı eğitimi	Eğitim sürecinde bir sinir ağına ağırlık setinin optimizasyonu
Karaboğa ve Baştürk (2007a)	Nümerik fonksiyon optimizasyonu	Griewank, Rastrigin, Rosenbrock, Ackley ve Schwefel fonksiyonu
Karaboğa ve Baştürk (2007b)	Kısıtlanmış optimizasyon problemleri	Kıyaslama probleminin performansının test edilmesi
Karaboğa ve Baştürk (2008)	Çok boyutlu nümerik problemler	YAK algoritması performansının farklı algoritmalar ile kıyaslanması
Karaboğa ve Akay (2009)	Nümerik test fonksiyonları	YAK algoritması performansının farklı algoritmalar ile kıyaslanması
Zhu ve Kwong (2010)	Nümerik optimizasyon problemleri	Schaffer, Rosenbrock, Sphere, Griewank, Rastrigin, Ackley fonksiyonu
Gao ve Liu (2011)	Global nümerik optimizasyon problemleri	YAK algoritmasının geliştirilmesi
Hu ve ark. (2012)	DYAP	Depolama maliyetlerinin düşürülmesi
Akay ve Karaboğa (2012)	Parametre optimizasyon problemleri	Modifiye YAK algoritmalarının testi
Dimitrijević ve ark. (2012)	ÖOKP	Ağırlık kümelerinin belirlenmesi
Li ve Zhou (2013)	Sipariş gruplama problemi	En az toplam seyahat süresi
Han ve ark. (2013)	AAÇP	En az toplam akış süresini
Iniesta ve ark. (2013)	Araç rotalama problemi	En az toplam seyahat süresi
Karaboğa ve ark. (2014)	YAK literatür araştırması	YAK algoritması ile ilgili zengin literatür araştırması
Zhang ve ark. (2014)	Yeşil araç rotalama problemi	En az toplam seyahat süresi
Watanabe ve ark. (2015)	Tesis yeri belirleme problemi	YAK algoritması uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi
Yin ve Chuang, (2016)	En az CO <sub>2</sub> emisyonu	YAK algoritması ile çapraz sevkiyat planlaması

**Tablo 2.4. (Devamı) YAK algoritması ile ilgili çalışmalardır.**

<b>Yazar (Yıl)</b>	<b>Problem</b>	<b>Açıklama</b>
Cruz ve ark. (2017)	Robot takımı planlaması	YAK algoritması ile iş planı üretilmesi
Pandiri ve Singh, (2018)	Çoklu gezgin satıcı problemi	YAK algoritması ve hiper sezgiseller kullanımı
Venkatesh ve Singh, (2019)	Araç rotalama problemi	En az toplam seyahat süresi
Zoa ve ark. (2020)	Çizelgeleme problemi	OYA rota planlaması
Pakhira ve ark. (2021)	En az taşıma maliyeti	YAK ve bulanık mantık
Zhuang ve ark. (2021)	Depo yerleşim planı tasarımı	Küçük boyutlu problemler için optimal görev planlama şeması
Attari ve ark. (2021)	Sipariş gruplama ve rota planlama	Karışık tamsayılı programlama modeli çözümü
Hojaghani ve ark. (2021)	Sipariş gruplama problemi	Karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli çözümü
Li ve ark. (2022)	Stokastik araç çizelgeleme problemi	Toplu taşıma planlaması için YAK algoritması geliştirilmesi
Zheng ve ark. (2023)	Yeşil çizelgeleme problemi	Gemi yükleme/boşaltma işlemlerinin çok amaçlı olarak çizelgelenmesi

## 2.5. Yeniden Düzenleme

İlk olarak Christofides ve Colloff (1973) tarafından tanımlanan yer değiştirme problemi literatürde daha sonra hak ettiği ilgiyi görmemiştir. Yeni nesil sıkıştırılmış depoların yaygınlaşmasıyla yeniden düzenleme daha da önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Carlo ve Giraldo, (2012) çalışmalarında, yeniden düzenleme işleminin ekstra iş yükü oluşturduğunu belirterek, çalışırken yeniden düzenleme isimli bir strateji ortaya atmışlardır. Bu çalışma üç senaryoyu inceleyerek, problemlerin karmaşıklığından dolayı, farklı sezgisel yöntemler önermişlerdir. Deneysel sonuçlar, önerilen sezgisel yöntemlerin çözüm kalitesi ve hesaplama süresi açısından tatmin edici bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Pazour ve Carlo, (2015) çalışmalarında yeniden düzenleme işleminin getirdiği yükler nedeniyle bir bölümünde iyileştirme yapma fikrini ortaya atmışlardır.

Konteynerlerin istiflendiği liman sahalarında konteynerin limandan ayrılması gereken zamanla uyumlu olacak şekilde limanda gemi olmadığı sıralarda konteynerlerin yeniden düzenlenmesi olarak kullanılmıştır (Forster ve Bortfeldt, 2012). Kriehn ve ark. (2018) çalışmalarında mekik ve YDA kullanılan bir depo için bölgesel sınıf temelli yerleşim uygulayarak, gece saatlerinde yeniden düzenleme yaklaşımını incelemişlerdir. Maniezzo ve ark. (2021) çalışmasında geçmiş verileri istatistiksel olarak kullanarak yeniden düzenleme problemini depo ortamında bölgesel olarak stokastik bir model aracılığı ile çözmüşlerdir. Marolt ve ark. (2022) otoparklarda kullanılan robot teknolojisi ile birlikte otomobillerin otomatik olarak park edildiği sistemlerde yeniden düzenleme ve DYAP problemini birlikte çözmüşlerdir. Araç depolama ve geri alma sistemini, komşu yer değiştirme atama stratejilerini kullanarak performans ve esneklik açısından geliştirmişlerdir. Buckow ve Knust, (2023) çalışmasında yeniden düzenleme problemini takas hareketleriyle hem analitik hem de deneysel olarak analiz edip değerlendirmişlerdir. Sezgisel ve kesin algoritmalar kullanarak en uygun çözümleri hesaplamak için GSP'ye benzeterek çözmüşlerdir. Yapılan çalışmalar arasında büyük bir bölümü yeniden düzenlemenin sipariş toplama üzerindeki etkisini değil, yeniden düzenleme işlemlerin optimizasyonu üzerine çalışılmıştır.

## 2.6. Çalışmanın Literatüre Katkısı

Bu çalışmanın literatüre en önemli katkısı DYAP'nin çoklu periyotta dinamik olarak çözülmesi ve yeniden düzenleme yaklaşımının benzetim tekniği kullanılarak incelenmesidir.

Literatür incelendiğinde de toplayıcının ürüne hareket ettiği sistemler için DYAP'nin farklı matematiksel modeller ve sezgisel algoritmalar üretildiği Tablo 2.1 ile görülmektedir. Ürünün toplayıcıya hareket ettiği sistemler için yapılan çalışmalar son zamanlarda artmaktadır. Bu çalışmalar ile ilgili literatür Tablo 2.2'de detaylı olarak verilmektedir. Yapılan literatür araştırmasına göre, RSKT sistemleri için DYAP'nin çoklu periyotta dinamik olarak YAK algoritması ve depo atama sezgiseli kullanılarak çözüldüğü ilk çalışmadır.

Yeniden düzenleme yaklaşımı literatürde geleneksel depolar için beklenen performansı göstermediği için uzun yıllar boyunca gerekli ilgiyi görememiş bir yaklaşımdır. Yeni nesil sıkıştırılmış depoların yaygınlaşmasıyla birlikte hak ettiği ilgiyi görmesi gerektiğini düşündüğümüz yeniden düzenleme yaklaşımının performansı bu tez kapsamında test edilmiştir.

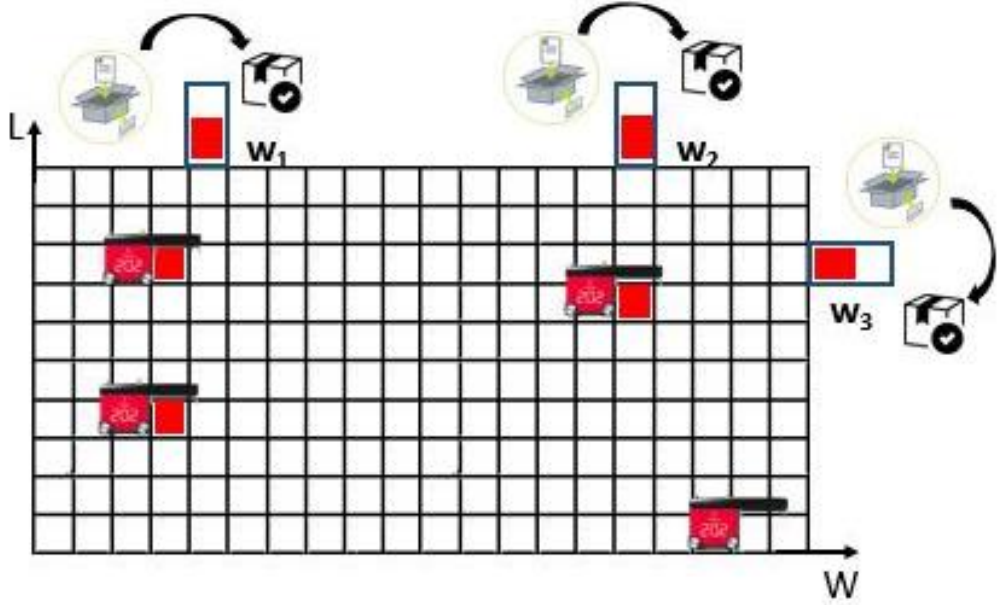
Literatürde çok sık kullanılmış olan benzetim tekniğinin yeniden düzenleme ve iyileştirme yaklaşımlarını belirli performans kriterleri açısından test etmek için kullanıldığı ilk çalışmadır.





### 3. ROBOTİK SIKIŞTIRILMIŞ KUTUYA TOPLAMA SİSTEMLERİ

RSKT sistemleri, robotların alüminyum bir ızgara üzerinde hareket ederek kutuları depoladığı ve topladığı bir sıkıştırılmış depolama konseptidir. Bu depolar otonom robotlar, kutular, toplama istasyonları ve bunları yöneten bir bilgi sistemi ile oluşturulmuş yeni nesil sıkıştırılmış depolardır (Şekil 3.1). Robotların hareketi için ayrılmış özel koridorların olmaması ve robotların hareket ettiği alanların depolamada kullanılması nedeniyle RSKT sistemleri sıkıştırılmış depolama sistemleri olarak kabul edilmektedir (Zou ve ark. (2016).



Şekil 3.1. RSKT sistemi iki boyutlu gösterimidir.

Günümüzde müşterilerin daha fazla seçenekleri olduğu için serbest piyasanın önemli bir özelliği olan rekabet artmıştır. Çeşitli ikame ürünlerin artması, şirketlerin pazar paylarını korumak ve aynı zamanda rakiplerine karşı tercih sebebi olmak için şirketlerin hızlı teslimat yeteneklerinin büyük önem taşıdığını fark etmelerini sağlamıştır. Hızlı teslimat gerekliliği, depolama operasyonları üzerinde büyük etkiye sahiptir. Ürünlerin, müşteri siparişinin bir depoda toplanma süresinin kısaltılabileceği şekilde depolanması ve toplanması gerekir. Bu nedenlerle RSKT sistemleri şirketlere önemli avantajlar sağlamaktadır.

Tedarik zincirlerindeki bir diğere önemli eğilim, müşteri sipariş boyutlarındaki azalma ve sipariş sıklıklarındaki artıştır. Bu eğilimin ana itici gücü, şirketlerin stoklarını düşük tutma eğiliminde olmaları ve dolayısıyla tedarikçilerine sık sık ve küçük miktarlarda sipariş vermeleridir. Yüksek müşteri hizmeti düzeyi sağlamak ve nakliyede ölçek ekonomisi elde etmek için, bu küçük boyutlu siparişlerin sıkı sevkiyat zaman dilimlerinde karşılanması gerekir.

RSKT sistemlerinin yukarıda bahsedilen durumlarda geleneksel depolara göre bazı avantajları bulunmaktadır. Sıkıştırılmış bir depolama sistemi olduğu için, depolama alanı kullanım verimliliği, geleneksel depolara kıyasla %40-60 oranında artmaktadır. Kurulum, genişletme gibi süreçlerde ürün sevkiyatı devam edebilir. Robotik toplama ve depolama ile aranan ürünün bulunamaması gibi durumlar ortadan kalkar. RSKT sistemi tasarlanırken, analitik tekniklerle bazı özelliklerin belirlenmesi gerekir. Deponun fiziksel yapısı, teslimat ve sevkiyat noktaları, kutu sayısı, kutu büyüklüğü, robot sayısı ve robot bekleme noktaları gibi özellikler belirlenmelidir.

### **3.1. Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama Sistemi Parametreleri**

Sharma ve Shah (2015) çalışmalarında depo tasarımı ve yönetiminde kullanılan miktarları ve hesaplanabilir parametreleri detaylı olarak sınıflandırmışlardır. Chan ve Chan (2011) bu parametrelerin kullanımı ile ilgili kıyaslamalar yaparak detaylı bir çalışma ortaya koymuştur. Heskett (1963) Cube-per-Order Index (COI) parametresini tanımlamıştır. COI parametresi daha sonra literatürde sıkça kullanılmıştır. COI parametresi bir ürün çeşidinin atandığı konumların sayısının ve toplam frekansının oranı olarak tanımlanmıştır. Birden fazla ürünün bir arada toplandığı sistemlerde ürünler arası ilişkiyi göz önüne almadığı için eleştirilerde almıştır (Schoor, 2015). Yukarıdaki parametrelerde incelenerek problemin yapısına göre bazı parametrelerin belirlenmesine karar verilmiştir.

#### **3.1.1. Kutu Toplama Zamanı**

RSKT sistemlerinde kutu toplama zamanının belirlenmesi için belirli bir hücredeki bir kutucuğun alınması ve sipariş hazırlama alanına getirilmesi, daha sonra tekrar yerine götürülmesi için geçen süreç detaylı olarak incelenmelidir. Bu süre geleneksel depolardaki sürece göre farklılıklar içermektedir. Robotlar kutuları ızgaranın üzerinde hareket ederek bulunduğu noktadan alarak istasyonlara getirirler. Robot kutuyu istasyondaki toplayıcıya teslim ettikten sonra başka bir kutuyu alarak yerine götürür

ve siparişteki diğer kutuyu alarak istasyona getirir. Sipariş toplama sürecinde ürün toplama zamanları istasyonlara getirilen kutular için geçen süreyi kapsamaktadır.

Robotun bir hücreye ulaşmak için harcadığı zaman bileşenlerine ayrılarak incelenmelidir.  $T_{T,jkl}$  parametresi bir robotun bir hücreye ulaşması ve o hücredeki kutuyu alarak istasyona getirmesidir.

### 3.1.2. Kutu Yükleme Zamanı

RSKT sistemlerinde istasyonda işi biten veya sisteme yeni eklenen kutuların teslim alınarak ızgara içerisinde uygun alana bırakılması sırasında geçen süre  $T_{Y,jkl}$  kutu yükleme süresi olarak isimlendirilmektedir.

RSKT sistemlerinde yükleme süreleri sipariş toplama süresini etkilemiyor şeklinde düşünülse de toplanacak bir kutuyu engelleyecek şekilde yerleştirme veya yükleme işlemi yapan robotun sipariş toplama emrine hemen cevap verememesi gibi nedenlerden dolayı etkilemektedir.

### 3.1.3. Ürün Toplama ve Yükleme Frekansı

Yeni nesil sıkıştırılmış depolar hızlı ve güvenilir toplama ekipmanları ile birlikte sürekli ve hızlı envanter devri sağlar. Müşterilerin daha sık, ancak her sipariş için daha küçük miktarlarda sipariş verme eğiliminde olmasından dolayı depolarda işlem hacmi artmıştır. Operasyonel açıdan bakıldığında, her ürün için depo içerisinde işlem görme sıklığına bağlı olarak frekans değeri hesaplanabilir.

Caron ve ark. (1998) çalışmasında Denklem 3.1 ile gösterilen frekans hesaplama yöntemini önermektedir.  $x$  değerini bir ürün için gerekli alanın, toplam alana oranı olarak tanımlarken,  $s$  ABC talep eğrisinin çarpıklık değeridir.

$$F(x) = \frac{(1+s)x}{s+x}, \quad F(x) \geq 0, x \leq 1, \text{ ve } s+x \neq 0 \quad (3.1)$$

Frekans tabanlı depolama, gerekli depolama alanının sipariş içinde oranı düşük olan öğelerin G/Ç noktasına en yakın konumlara atanması anlamına gelir. Frekans tabanlı yaklaşımların, rastgele depolama yaklaşımına göre sipariş toplama operasyonlarında toplam seyahat mesafesi açısından avantajlar sağladığı gösterilmiştir (Chuang ve ark. 2012).

### 3.1.3.1. Toplama frekansı

RSKT sistemlerinde ürünlerin toplama frekansı  $F_{toplama}$  Denklem 3.2 ile hesaplanarak elde edilmiştir.  $P(A)$  ifadesi A ürününden toplanan toplam ürün miktarını gösterirken,  $P(E)$  ifadesi toplanan toplam ürün miktarını ifade etmektedir.  $\bar{x}$  ifadesi ise bir siparişteki ortalama A ürünü sayısını ifade etmektedir.

$$F_{toplama} = \frac{P(A)}{P(E) * \bar{x}} \quad (3.2)$$

### 3.1.3.2. Yükleme frekansı

RSKT sistemlerinde istasyonda işi biten veya sisteme yeni eklenen kutuların teslim alınarak ızgara içerisinde uygun alana bırakılması sırasında kutu içerisinde bulunan ürünün frekansı  $F_{yükleme}$  ile ifade edilmektedir. Bir ürünün yükleme frekansı Denklem 3.3 ile ifade edilmiştir.  $P(A)$  A ürününden yüklenecek toplam ürün miktarını göstermektedir.  $P(E)$  ifadesi yüklenen toplam ürün miktarını ifade etmektedir.  $A_{EOQ}$  ifadesi A ürünün ekonomik sipariş miktarıdır.

$$F_{yükleme} = \frac{P(A)}{P(E) * A_{EOQ}} \quad (3.3)$$

### 3.1.4. Robotik Kutuya Toplama Sistemi Notasyonları

RSKT sistemi, robot teknolojisini kullanan otomatik bir ürün depolama ve sipariş toplama sistemidir. Bu sistemde, envantere alınan ürünler bir ızgarada düzenlenmiş kutularda depolanır. Izgaranın her hücrelerinde, kutular üst üste depolanarak bir depolama yığını oluşturur. Taşıma ve kaldırma özelliklerine sahip robotlar, ızgara üzerinde hareket ederek, sistemin farklı alanlarında bulunan ürünler ve sipariş toplama istasyonları arasında kutuları taşırlar. Robot filosunun ve sipariş toplama istasyonlarının sayısının artırılmasıyla çok yüksek depolama alanı verimliliği olan ve yüksek kutu toplama hızlarına sahip olan RSKT sistemleri geleneksel depolama sistemlerine bir alternatif olarak kullanılabilir. RSKT sistem dinamiklerini matematiksel olarak temsil eden notasyonlar açıklamalarıyla birlikte Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.1.** RSKT sistemlerinin notasyonları ve açıklamaları verilmiştir.

Notasyon	Açıklama
$T_{T,jkl}$	$j, k$ ve $l$ koordinatlarında bulunan kutuya ulaşma süresi
$T_{Y,jkl}$	Bir kutuyu istasyondan alarak $j, k$ ve $l$ koordinatlarına bırakma süresi
$T_{tut/birak}$	Bir kutunun tutulması/bırakılması sırasında geçen zaman
$T_j$	$x$ ekseninde $j$ noktasına ulaşma süresi
$T_k$	$y$ ekseninde $k$ noktasına ulaşma süresi
$T_l$	$z$ ekseninde $l$ noktasına ulaşma süresi
$p_{hi}$	$i$ ürünü $x$ ekseninde $h$ sırasında bulunur
$p_{wi}$	$i$ ürünü $y$ ekseninde $w$ sırasında bulunur
$p_{li}$	$i$ ürünü $z$ ekseninde $l$ sırasında bulunur
$t_{lu}$	İstasyonda bir kutunun boşaltılması veya yüklenmesi için geçen süre
$T_o$	Bir siparişin tamamlanma süresi
$T_p$	Bir kutunun siparişinin tamamlanma süresi
$T_{d,R}$	Robotun boşta beklediği noktadan ürünü alacağı noktaya gitme süresi
$T_R$	Robotun alt katmanlardan bir kutuyu çıkarma süresi
$T_{R,w_i}$	Robotun kutuyu aldığı noktadan ilgili istasyona taşınması için geçen süre
$T_p^{rem}$	Kutunun istasyonda geçirdiği toplama işlemi süresi
$W_{w_i}$	İstasyon boşta bekleme süresi
$W_R$	Siparişin robotu bekleme süresi
$h_b$	Kutunun yüksekliği
$w_b$	Kutunun genişliği
$l_b$	Kutunun uzunluğu
$H$	Sistemin yüksekliği
$W$	Sistemin genişliği
$L$	Sistemin uzunluğu
$C$	Sistem kapasitesi
$V_l$	Liftin hızı
$V_R$	Robotun hızı
$n_R$	Robot sayısı
$p_p^{idle}$	Bir robotun boş olma olasılığı,
$N_{hst}$	İstasyon sayısı
$N_{wst}$	$x$ ekseninde depolanan kutu sayısı
$N_{lst}$	$y$ ekseninde depolanan kutu sayısı
$a_j$	$z$ ekseninde depolanan kutu sayısı
$D_i$	$j$ siparişini toplamak için gerekli olan kutu sayısı

Koster ve ark. (2008) çalışmasında sıkıştırılmış otomatik yükleme sisteminin kapasitesini Denklem 3.4'deki gibi hesaplamışlardır. RSKT sistemlerinin dikdörtgenler prizması şeklinde kurulduğu durumlarda toplam kutu kapasitesini Denklem 3.4 ile hesaplamak mümkündür. Ayrıca her bir düzlemde depolanabilecek en fazla kutu sayıları da Denklem 3.5, Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 ile hesaplanabilmektedir. Robotun alt katmanlardan bir kutuyu çıkarma süresi Denklem 3.8 ile hesaplanmaktadır. Robotun boşta beklediği noktadan ürünü alacağı noktaya gitme süresi Denklem 3.9 ile hesaplanmaktadır. Robotun kutuyu aldığı noktadan ilgili istasyona taşınması için geçen süre Denklem 3.10 ile hesaplanmaktadır. Robot ve istasyon müsait olduğunda; bir kutunun siparişin tamamlanma süresi Denklem 3.11 ve Denklem 3.12 ile ifade edilmiştir. Robot ve istasyon müsait değil ise bir kutunun siparişin tamamlanma süresi Denklem 3.13 ile ifade edilmiştir. Bir siparişin tamamlanma süresi Denklem 3.14 ile ifade edilmiştir.

$$C = HWL \quad (3.4)$$

$$N_{hst} = H/h_b \quad (3.5)$$

$$N_{wst} = W/w_b \quad (3.6)$$

$$N_{lst} = L/l_b \quad (3.7)$$

$$T_R = \frac{(N_{hst} - p_{hi})h_b}{v_l} + t_{lu} \quad (3.8)$$

$$T_{d,R} = \frac{(N_{wst} - p_{wi})w_b}{v_R} + \frac{(N_{lst} - p_{li})l_b}{v_R} \quad (3.9)$$

$$T_{R,w_i} = \frac{(\frac{N_{wst}}{2} - p_{wi})w_b}{v_R} + \frac{(N_{lst} - p_{li})l_b}{v_R} \quad (3.10)$$

$$T_p = T_R + T_{d,R} + T_{R,w_i} + 2 t_{lu} + T_p^{rem} \quad (3.11)$$

$$T_p = \frac{(N_{hst} - p_{hi})h_b}{v_l} + \frac{(N_{wst} - p_{wi})w_b}{v_R} + \frac{(N_{lst} - p_{li})l_b}{v_R} + \frac{(\frac{N_{wst}}{2} - p_{wi})w_b}{v_R} + \frac{(N_{lst} - p_{li})l_b}{v_R} + 2 t_{lu} + T_p^{rem} \quad (3.12)$$

$$T_p = W_R + T_R + T_{d,R} + T_{R,w_i} + W_{w_i} + 2 t_{lu} + T_p^{rem} \quad (3.13)$$

$$T_o = \{T_p \quad n_R \quad a_j \quad P_p^{idle} \quad P_w^{idle}\} \quad (3.14)$$

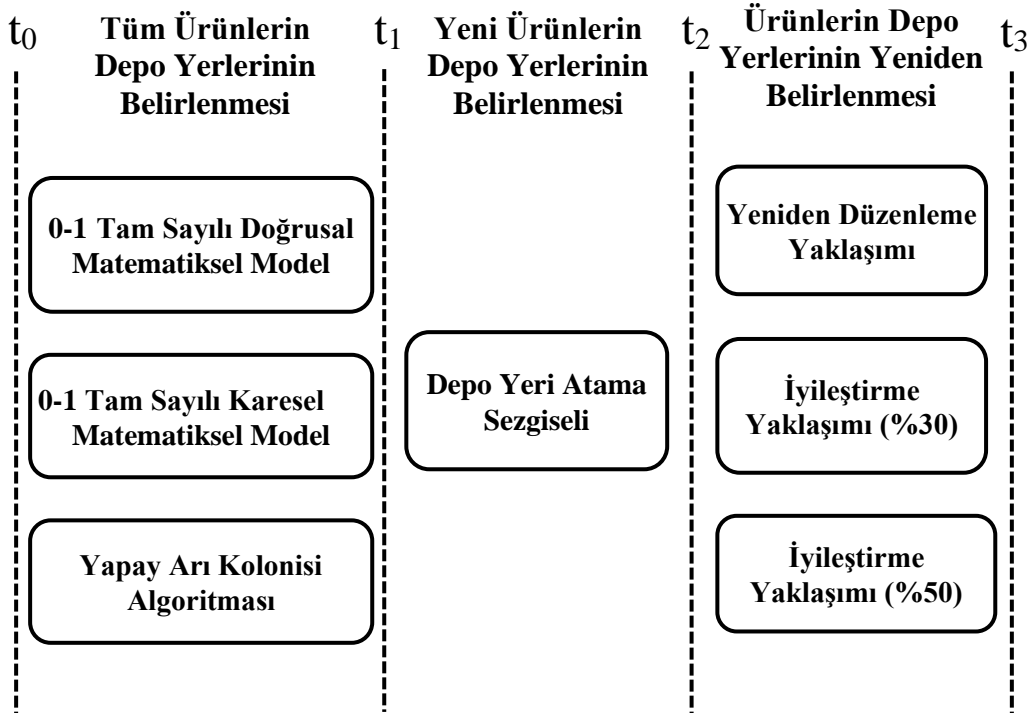
### 3.2. Robotik Sıkıştırılmış Kutuya Toplama Sistemi Kabulleri

1. Kutunun istasyonda geçirdiği işlem süresi ( $T_p^{rem}$ ) sabit kabul edilmektedir.
2. Asansör ( $V_l$ ) ve Robot hızları ( $V_R$ ) sabit kabul edilmektedir.
3. Asansörün bir kutuyu boşaltması-yüklemesi için geçen süre ( $t_{lu}$ ) eşit ve sabit kabul edilmektedir.
4. Bir siparişin tamamlanma süresi ( $T_o$ ) içerdiği kutuların toplanma sürelerinin ( $T_p$ ) bileşkesidir.

#### 4. DİNAMİK ÇOKLU PERİYOTTA DEPO YERİ ATAMA PROBLEMİ

RSKT sistemlerinde en önemli kararlardan biri ise DYAP olarak isimlendirilen ürünlerin kutulara atanma işleminin nasıl sağlanacağıdır. Toplam taşıma maliyetini en küçükleyecek şekilde fazla hareket eden ürünlerin istasyonlara yakın ve üst seviyedeki kutulara yerleştirilmesi temel prensip olarak dikkate alınmalıdır. Bu konuda stok alanlarını verimli şekilde kullanmak öncelikli amaç olarak görülmektedir. DYAP'nin yapısı ve çeşitleri ile ilgili detaylı bilgilere önceki bölümlerde yer verilmiştir. Ayrıca DYAP'deki bazı karar durumlarındaki değişkenlik ve tekrarlanabilirlik özelliklerinden dolayı bu problem dinamik bir yapıya sahiptir.

Literatürde, az sayıda polinom zamanlı çözümü olan problemler için dinamik programlama algoritmaları geliştirilmiştir, ancak DYAP'nin NP-zor yapısından dolayı dinamik programlama yerine, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar tercih edilmiştir. Bu nedenle DYAP sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar yardımıyla çoklu periyotta çözülmüştür (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Çoklu periyotta dinamik DYAP gösterimidir.



#### 4.1.0 - 1 Tam Sayılı Doğrusal Matematiksel Model

Matematiksel programlama modelleri, bir sistemin temel bileşenlerini ve bu bileşenlerin birbirleriyle olan ilişkilerini ortaya çıkararak, bu ilişkileri kısıtlar ile ifade edip sistemin hedeflerini amaç fonksiyonu olarak tanımlaması ile elde edilen modellerdir. Matematiksel modeller sistemin davranışını inceleyip yorumlamada kullanılır.

Thorndike, (1950) çalışmasında belirli bir amaç doğrultusunda işleri kategorilere atamak için model önermişlerdir. Daha sonra işleri işçilere atmak gibi farklı atama problemlerinde matematiksel modeller kullanılmaya devam etmiştir. Literatürde DYAP için üretilmiş çokça matematiksel model bulunabilir. RSKT sistemleri için önerilmiş bir model bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında, RSKT sistemlerinde yükleme ve toplama işlemlerinden kaynaklanan süreleri en küçükleyen 0-1 tam sayılı matematiksel yeni bir model geliştirilmiştir. Sistem özellikleri göz önüne alınarak oluşturulan kısıtlar ile her ürün belirlenmiş kurallara uygun yerlere atanacaktır. Kurulan matematiksel model geçen süreyi göz önüne alarak daha kısa sürede ulaşabildiği hücrelere yüksek frekanslı ürünleri yerleştirecektir.

$i$  = Ürün numarası

$j$  = Kat numarası

$k$  = Derinlik numarası

$l$  = Sıra numarası

$I$  = Toplam ürün sayısı

$K$  = Toplam derinlik sayısı

$J$  = Toplam kat sayısı

$L$  = Toplam sıra sayısı

$C$  = Bir kutuya beraber yüklenebilecek ürün sayısı

$FT_i$  =  $i$  ürünün frekansı

$FY_i$  =  $i$  ürünün frekansı

$T_{jkl}$  =  $j$  katında,  $k$  derinliğinde ve  $l$  sırasında kutuya ulaşma süresi

$V_i$  =  $i$  ürününe ait hacim değeri

$V_b$  = Bir kutuya ait toplam hacim

$x_{ijkl} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } i \text{ ürünü } j, k \text{ ve } l \text{ koordinatlarında olan kutuya atanırsa} \\ 0, & \text{Diğer} \end{cases}$

$$Min = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I FT_i T_{jkl} x_{ijkl} + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J FY_i T_{jkl} x_{ijkl} \quad (4.1)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{ijkl} = 1 \quad i = 1, \dots, P \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijkl} \leq 4 \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K; l = 1, \dots, L \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^I V_i x_{ijkl} \leq V_b \quad j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K; l = 1, \dots, L \quad (4.4)$$

Denklem 4.1, yani amaç fonksiyonu, tanımlanan kısıtlara uygun olarak yükleme yapılırken mümkün olan en az toplama ve yükleme süresini sağlamaktadır. Denklem 4.2 her ürün çeşidinin  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerinde birden fazla konuma atanmamasını sağlamaktadır. Denklem 4.3, bir kutuya en fazla  $C$  çeşit ürünün atanmasını sağlamaktadır. Denklem 4.4, bir kutunun toplam hacmini aşmayacak kadar ürün yüklenmesini kontrol eder.

Frazele ve Sharp (1989) çalışmasında DYAP probleminin NP-zor bir problem olduğunu kanıtlamıştır. Bu nedenle gerçekçi bir problemin kabul edilebilir sürelerde çözümlenebilmesi için sezgisel veya meta-sezgisel bir algoritmanın kullanılması uygun olacaktır.

#### 4.2. 0 - 1 Tam Sayılı Karesel Matematiksel Model

Depolarda sipariş toplama işlemi sırasında farklı noktalara gerçekleştirilen seyahatler toplamı bir sipariş rotasını oluşturmaktadır. Bir noktadan diğer noktaya olan uzaklıklar azaltılarak toplam seyahat süresinde iyileştirmeler sağlanabilir. Bu nedenle aynı sipariş içerisindeki ürünler aynı kutuda veya yakın kutularda bulunuyorsa, birinci kutuyu yerine bıraktıktan sonra diğer kutuya daha çabuk ulaşacaktır. Hatta bazı durumlarda sipariş toplayıcı iki farklı ürün için bir sefer kutu getirme işlemi yapacaktır. Ürünler arası ilişki fonksiyonu Denklem 4.5 ile gösterilmiştir.

$$F_{ij} = 1 - \frac{P(i \cap j)}{[P(i) + P(j)]} \quad (4.5)$$

Denklem 4.1 ile ifade edilen amaç fonksiyonunun karesel formu Denklem 4.6 ile ifade edilmiştir. Matematiksel modelin bu formu ile daha çok aynı sipariş içerisinde bulunan ürünlerin birbirine yakınlaştırılması amaçlanmıştır.

$$Enaz \sum_l^L \sum_{jkl}^{JKL} F_t T_{jkl} x_{ijkl} + \sum_l^L \sum_{jkl}^{JKL} F_y T_{jkl} x_{ijkl} + \sum_j^J \sum_i^I \sum_{rnm}^{JKL} \sum_{jkl}^{JKL} F_{ij} T_{jkl, rnm} x_{ijkl} x_{rnm} \quad (4.6)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{ijkl} = 1 \quad i = 1, \dots, P \quad (4.7)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijkl} \leq 4 \quad j = 1, \dots, J ; k = 1, \dots, K ; l = 1, \dots, L \quad (4.8)$$

$$\sum_{i=1}^I V_i x_{ijkl} \leq V_b \quad j = 1, \dots, J ; k = 1, \dots, K ; l = 1, \dots, L \quad (4.9)$$

Denklem 4.2 her ürün çeşidinin  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerinde birden fazla konuma atanmamasını sağlamaktadır. Denklem 4.3, bir kutuya en fazla  $C$  çeşit ürünün atanmasını sağlamaktadır. Denklem 4.4, bir kutunun toplam hacmini aşmayacak kadar ürün yüklenmesini kontrol eder.

### 4.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Evrimsel hesaplama; Sürü temelli ve Evrimsel algoritmalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Evrimsel algoritmalar genellikle üreme, mutasyon, rekombinasyon ve doğal seçim gibi mekanizmalar kullanır. Üyelik fonksiyonu değerine göre bazı bireyler hayatta kalır. Hayatta kalan bireylerin, evrimsel bir gelişim sonucunda daha fazla uyum sağlamış bireyler olması beklenir. Bu bireyler tanımlanan problem içerisindeki aday sonuçları ifade etmektedir. En çok karşımıza çıkan evrimsel algoritmalar Genetik algoritma (GA), Genetik programlama (GP), Evrimsel Stratejiler (ES) ve Evrimsel Programlama (EP) vb. algoritmalarıdır.

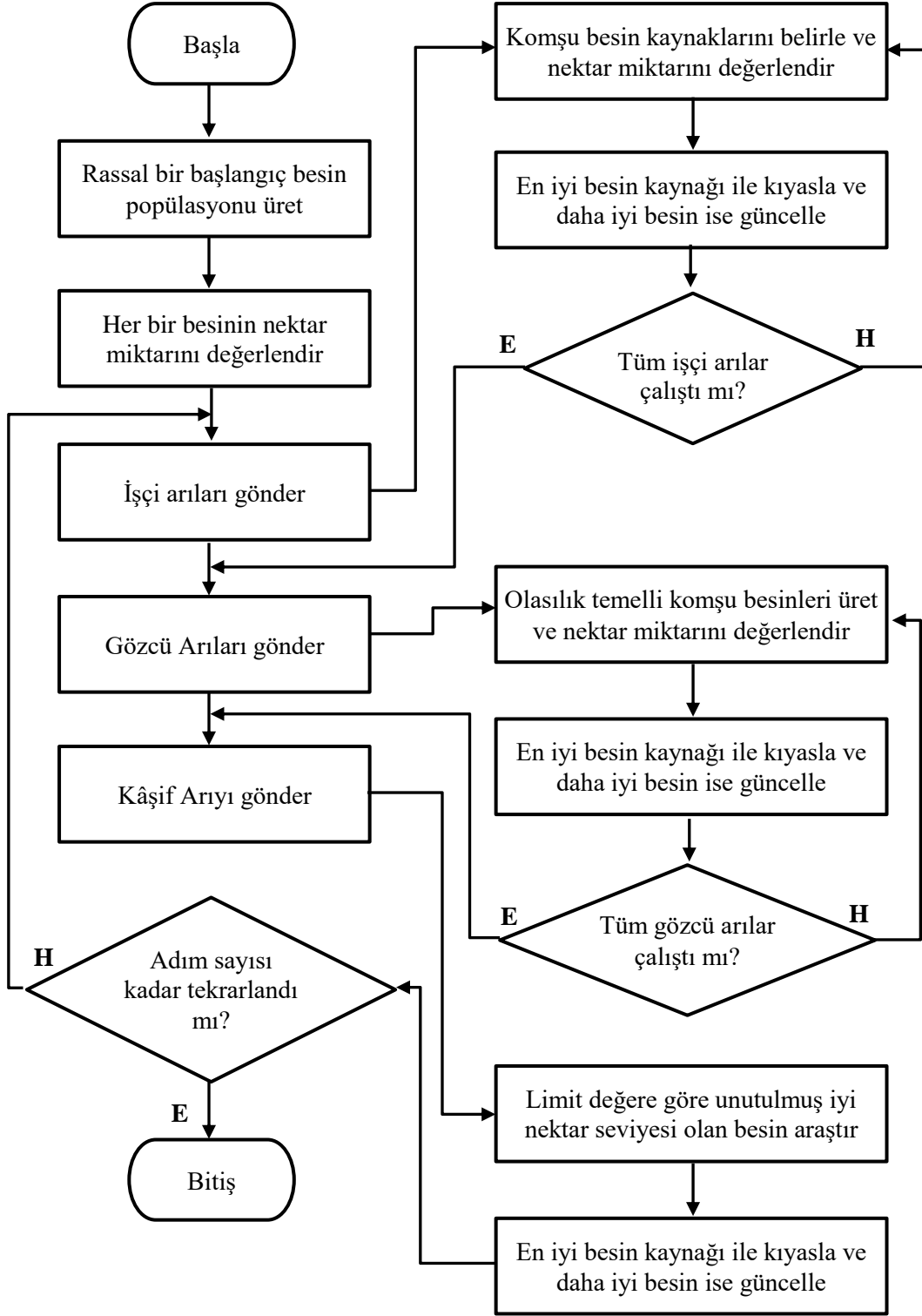
Sürü temelli algoritmalar ise beraber bir koloni olarak yaşayan bazı hayvanlar örnek alınarak oluşturulmuştur. Son yıllarda sürü temelli algoritmalar üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Balıklar, kuşlar, karıncalar ve bal arıları gibi bazı hayvanların beraber yaşama, besin bulma ve hareket etme gibi davranışlarından hareketle farklı yapıda algoritmalar üretilmiştir.

Bal arısı kovanlarının sahip oldukları sürü zekasını algoritma haline getirilirken aralarındaki görev paylaşımından esinlenilmiştir. YAK algoritmasında koloni işçi arılar, gözcü arılar ve kaşif arılar olmak üzere üç gruptan oluşur.

Görevli arılar, önceden edinilen kaynak bilgisine göre kaynaklardan kovana bilgi getirmekten sorumlu olan arılardır. Getirilen bu bilgi, arı dansı olarak adlandırılan davranış biçimi ile kovandaki gözcü arılara aktarılmaktadır. Bu dans sayesinde, yiyecek kaynağına ait kovana göre uzaklık ve güneşe göre konum bilgileri iletilebilmektedir.

Besin kaynağının nektar kalitesi tek bir kalite parametresi ile ölçülmelidir. Üyelik fonksiyonu olarak da isimlendirilen nektar kalitesi algoritmanın her adımında iyileşerek devam etmektedir.

Bal arıları arasındaki iletişim, birbirleri arasındaki bilgi alışverişi çok önemlidir. Bir kovan incelenirken dikkat çeken bazı yapılar neredeyse tüm kovanlarda benzer olarak bulunmaktadır. Kovan gözlemleri sırasında en çok dikkat çeken olaylar dans alanında gerçekleşmektedir. Bal arıları arasındaki bilgi alışverişinin burada gerçekleştiği düşünülmektedir. Besin kaynakları, besin kaynaklarının kaliteleri ve uzaklıkları gibi birçok bilgi dans alanındaki arının sallanarak yaptığı dans sayesinde diğer arılara aktarılmış olacaktır. Muhtemelen gözcü arılar bu dansları izleyerek belirledikleri en uygun besin kaynağına doğru harekete çıkmaktadırlar. YAK algoritmasında besin kaynakları muhtemel çözümleri göstermektedir, besin kaynağının kalitesi ile ilgili bilgiler üyelik fonksiyonu ile hesaplanmaktadır. YAK algoritması akış şeması Şekil 4.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2. YAK algoritması akış şemasıdır.

#### 4.4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması Parametre Optimizasyonu

Yapay Arı Kolonisi algoritmasında başlangıç popülasyonu belirlenir, başlangıç popülasyonunun besinlere üyelik fonksiyonu değeri hesaplanır, ardından adım sayısı belirlenerek; her adımda işçi arı, gözcü arı ve kâşif arı evreleri oluşur ve bu döngü

tekrarlanarak yeni popülasyonlar oluşturulur. En iyi üyelik fonksiyonu değerine sahip yineleme (yani, en düşük üyelik fonksiyonu değerine sahip) çözüm besinini belirler. Çözüm olarak elde edilen besin, ürünlerin depodaki konumlarını temsil etmektedir.

Bu çalışmada, YAK algoritmasının parametreleri olan adım sayısı, besin sayısı, işçi arı sayısı, gözcü arı sayısı ve sınır değerlerin sonuçlara etkisini daha iyi gözlemlemek için deney tasarımı yapılmıştır. Daha kaliteli sonuçlar elde etmek için deney tasarımı sırasında Yate's notasyonu kullanılmış ve faktörlerin sonuçlara etkisi incelenmiştir. YAK algoritmasında yukarıda belirtilen parametrelere atfedilebilecek en yüksek ve en düşük olası değerler Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 4.1.** YAK'da kullanılan parametrelerin en yüksek ve en düşük değerleridir.

Parametre adı	En yüksek Değer	En düşük değer
Adım sayısı	100(-)	500(+)
Besin sayısı	50(-)	500(-)
İşçi arı sayısı	100(-)	1000(-)
Gözcü arı sayısı	100(-)	1000(-)
Limit değer	1000(-)	5000(-)

Yate's Notasyonuna göre parametrelerin optimizasyonu için gerekli deney sayısı  $2^k$  ile ifade edilir, burada  $k$  değeri kullanılan parametre sayısını gösterir. Bu çalışmada beş farklı parametre kullanılmaktadır. Bu nedenle parametreleri optimize etmek için 32 deney yapılmıştır. Tablo 4.1'de verilen en büyük ve en düşük parametre değerlerine göre 32 deney yapılmıştır. Bu parametrelerin 32 farklı deneyde sonuçlar üzerindeki etkisi Ek A'da Tablo A.1 ile gösterilmiştir. Bu yöntemle adım sayısı, besin maddesi sayısı, işçi arı sayısı, gözcü arı sayısı ve sınır değer parametrelerinin algoritmanın süre ve amaç fonksiyon değerlerine göre etkileri incelenmiştir.

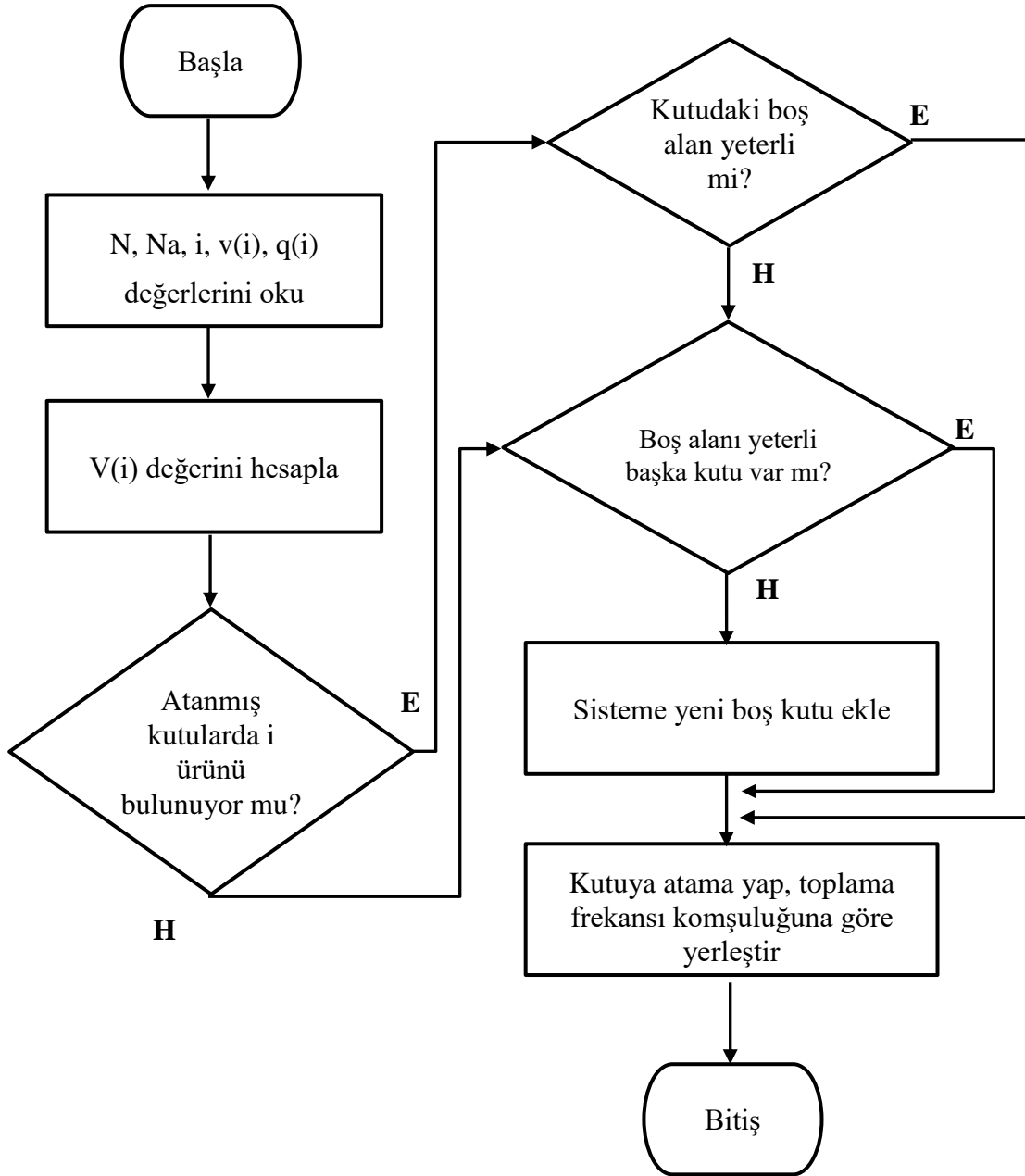
YAK algoritması için yapılan parametre optimizasyonu sonucunda kullanılan parametre değerleri Tablo 4.2 ile gösterilmiştir.

**Tablo 4.2.** DYAP çözümü için YAK algoritması parametrelerin değerleridir.

<b>Parametre adı</b>	<b>Değer</b>
Adım sayısı	300
Besin sayısı	50
İşçi arı sayısı	1000
Gözcü arı sayısı	500
Limit değer	1000

#### **4.5. Depo Yeri Atama Sezgiseli**

DYAP'nin dinamik olarak incelenmesi sırasında istasyona gelen kutuların tekrar yerleştirilmesi sırasında kullanmak için depo yeri atama sezgiseli üretilmiştir. İstasyonlara gelen kutuların yerleştirilmesi sırasında depolama alanını en verimli şekilde kullanmayı amaçlayan bir sezgisel algoritma üretilmiştir. Bu algoritma ile ilgili akış şeması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Depo atama sezgiseli akış şemasıdır.



## 5. YENİDEN DÜZENLEME

İlk olarak Christofides ve Colloff (1973) tarafından tanımlanan yer değiştirme problemi, geleneksel dikdörtgen yapıdaki bir depoda uygulanmıştır. Geleneksel depolarda toplama maliyetini oluşturan bileşenler incelendiğinde, toplama işleminde kullanılan işçilik maliyetinin deponun en önemli maliyet kalemlerinden olduğu ortaya çıkarılmıştır. Geleneksel depolarda yeniden düzenleme işlemi yapmak için ya daha fazla işçi istihdam etmek ya da fazla mesai yaptırmak gerekmekteydi. Günümüzde, yeni nesil sıkıştırılmış depolarda toplama işlemi işçiler tarafından yapılmadığından, işçilik maliyetleri çok azalmış, bunun yerine değişken maliyetlerden enerji maliyeti artış göstermiştir.

Yeni nesil depolarda yeniden düzenleme işlemi yapmak ve bu işlemi sistemin boşa kaldığı yani toplama işlemi yapılmadığı zamanlarda gerçekleştirmek toplama işlemi süresini kısaltacaktır. Deponun tamamını veya belirli ürünleri yeniden düzenlemek, toplam maliyet açısından avantajlı olabilir. Literatürde bununla ilgili güncel bir çalışma bulunmamaktadır. Literatür yarım yüzyıl önce bu stratejiden vazgeçmiştir. Ancak günümüzde teknolojinin depolarda yaygın olarak kullanılması ve yeni nesil sıkıştırılmış depo sistemleri sayesinde yeniden düzenleme işleminin önemi artmıştır. Yeniden düzenleme işlemi sayesinde toplama işlemi verimliliği artacak ve siparişler daha kısa sürede toplanacaktır. Eskiden depoda yeniden düzenleme işleminin gerçekleşmesi için, taşınacak ürünlerin forklift benzeri ekipmanlarla taşınması için bir toplayıcı gerekiyordu. Ancak günümüzde bir depodaki ürünler vinç, mekik, asansör veya robot gibi insansız ekipmanlarla ve otonom bir şekilde taşındığı için yeniden düzenleme işlemi insansız olarak gerçekleştirilebilir. Bu nedenlerle sipariş toplama için sistemin çalışmadığı zamanlarda, örneğin molalarda veya mesayiden sonra kalan zamanlarda planlanmış olan yeniden düzenleme işlemlerinin tamamı veya bir bölümü gerçekleştirilebilir. Bu çalışma kapsamında yeniden düzenleme işleminin belirli yüzdesel kısımları için farklı senaryolar geliştirilmiş ve test edilmiştir.

Yeni nesil sıkıştırılmış depo sistemlerinde koridor bulunmadığından, bir ürünü toplamak için başka bir ürünün yerini değiştirme ihtiyacı nedeniyle yeniden

düzenleme süreci daha yüksek bir gereklilik haline gelmiştir. Bu nedenlerle zorunlu olarak gerçekleştirilmesi gereken yeniden düzenleme işlemlerinin belirli amaçlar göz önüne alınarak planlanmasının avantajları olacaktır.

Zaman içinde depolanan ürünlerin taleplerindeki farklılıklar nedeniyle yeniden düzenleme gerekli bir süreç haline gelebilir. Bu durumda, depoda toplama ve yükleme işlemlerine ara verilerek yeniden düzenleme işlemi yapılabilir. Tedarik zincirinin durmaksızın çalıştığı günümüzde, yeniden düzenleme yapmak için sipariş toplamının durması hiçbir yönetici tarafından istenmeyecektir. Yeniden düzenleme işleminin mesai saatleri dışında otonom bir şekilde gerçekleştirilmesi uygun bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Deponun yeniden düzenlenmesi uygun bir seçenek olarak görünse de yalnızca bazı ürünlerin yerinin değiştirilmesi, deponun tamamen yeniden düzenlenmesinden daha düşük maliyetler sunacaktır (Pazour ve Carlo, 2015). Bu nedenle deponun bir bölümünün yeniden düzenlenmesi olarak adlandırılan depodaki bazı ürünlerin depo yerinin değiştirilmesi stratejik bir karardır (Carlo ve ark, 2010).

Yeniden yerleşim problemi, deponun G/Ç noktasından bağımsız olarak kutuların yerlerinin değiştirilmesi işlemi sırasında oluşacak rotaların optimizasyonu problemidir. Christofides ve Colloff (1973) ilk olarak tanımladıkları yeniden yerleşim problemini GSP'ye benzeterek dikdörtgensel bir depo için çözmüşlerdir.

## **6. BENZETİM**

Benzetim, mevcut veya önerilen bir sistemin farklı senaryolarını veya süreç değişikliklerini test ederek karar desteği sağlamak amacıyla kullanılan bilimsel bir tekniktir. Benzetim üzerine ilk tartışmalar Von Neumann ve Stanislaw Ulam'ın Los Alamos Scientific laboratuvarındaki çalışmalarına dayandırılır (Yıldız, 2010).

Günümüzde her alanda farklı örnekleri bulunan benzetim, farklı uygulamalarıyla karşımıza çıkmaktadır. Üretim sahalarında, tedarik zincirinde, farklı eğitim alanlarında ve hatta eğlence sektöründe kullanılan benzetim modelleri bulunmaktadır.

Çeşitli paket programlar yardımıyla belirli problemler için kolay modellenebilme imkanının oluşması ile benzetim tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli animasyonlar ve görsel eklentilerle birlikte paket programlar üzerinden kolay anlaşılabilir ve etkili uygulamalar yapılmaya başlanmıştır.

Günümüzde çoğu alanda benzetim modelleri üretilmiş ve çok başarılı uygulamalar yapılmış olmasına rağmen, sistemlerin farklılaşması ve özelleşmesi gibi nedenlerle benzetim bilimi üzerine geliştirmeler yapılmaya devam etmektedir.

### **6.1. Benzetim Kavramı**

Benzetim kavramı kullanıldığı tüm dillerde “benzer” anlamına gelen kökten türetilmiştir ve bir şeyin taklidi veya benzeri anlamlarına gelmektedir. 20. yüzyılda teknik bir anlam kazanan kavram günümüzde hem teknik hem de teknik olmayan anlamlar içermektedir ve bu anlamlar kullanım yerlerine göre anlaşılmaktadır (Yıldız, 2010).

Benzetim, özellikle dinamik yapıdaki problemlerin boyutunun ve karmaşıklığının artmasından dolayı analitik teknikler yardımıyla sonuç almanın zor veya imkansız olduğu durumlarda başvurulan model tabanlı bir yaklaşımdır (Zhao ve ark. 2015).

Benzetim gerçek hayatta karşımıza çıkan dinamik sistemlerin istatistiksel yaklaşımla canlandırılması ve farklı politikalar doğrultusunda test edilmesine imkan sağlayan bu

sayede var olan darboğazların ortadan kaldırılmasına imkan veren, bu nedenle günümüzde yoğun bir şekilde kullanılan bir bilim dalıdır (Pan ve ark, 2015).

Stokastik ya da deterministik sistemlerin tasarımlarının yapılması ya da çeşitli politikaların denenmesi amacıyla yönelik olarak benzetim kullanılabilir. Stokastik sistemlerden Markov zincirlerinin ve kuyruk sistemlerinin günümüzdeki örnekleri için benzetim modelleri üretilmiştir. Gerçekleşen çeşitli olaylar rassal sayılara bağlı olarak üretilerek, benzetim modeli içerisinde belirli olasılık dağılımlarının kullanımıyla gerçek sistemin performansı ölçülmüş olur. Benzetim, istatistik biliminden yararlanarak tesadüfi değişkenlerin uygun dağılım fonksiyonlarına göre elde edilen rassal sayıların kullanımı ile senaryolar temelinde performans kriterlerinin ölçüldüğü bir yöntemdir (Lawrence, 1988).

Yapılmak istenen bazı değişikliklerin veya deneylerin gerçek sistem yerine bir model kopyasında yapılması daha uygun olduğu durumlarda benzetim kullanmak yararlı olacaktır. Sistemde deney yapma imkanının bulunmaması veya maliyetli olması örnek gösterilebilir. Sistemde deney yapma süreleri de benzetim tekniği kullanmayı gereklilik haline getirebilir.

## **6.2. Benzetim Çeşitleri**

Benzetim çalışması, gerçek bir sistemin istatistik yardımıyla canlandırılmasını ve hedeflenen amaçlar doğrultusunda benzetim modelinin oluşturulmasını amaçlar. Elde edilen model üzerinde yapılan deneyler sonucunda farklı senaryoların performans kriterleri üzerindeki etkisi gözlemlenebilir.

Bir gerçek hayat sistemini girdi ve çıktılarıyla ifade etmek, kurulan model üzerinden tanıyıp araştırmak, değişik kararları ve seçenekleri gerçek sistemde hiçbir değişiklik yapmadan deneyebilmek, bu çalışmalar doğrultusunda sistem üzerine öngörüler de bulunabilmek ve uygulamaya esas olan kararları belirlemek benzetim tekniğinin temel amaçlarıdır.

Monte Carlo Metodu (MCM) belirsiz bir olayın olası durumlarını istatistiksel dağılımlar aracılığıyla tahmin etmek ve bu sayede sistem davranışının farklı senaryolar üzerindeki sonuçlarını belirlemek için kullanılan matematiksel bir tekniktir. MCM, John von Neumann ve Stanislaw Ulam tarafından belirsiz koşullar altında karar vermeyi iyileştirmek için icat edilmiştir (Mooney, 1997).

MCM, yapay zeka, hisse senedi fiyatları, satış ve talep tahmini, temel bilimlerdeki laboratuvar deneyleri, proje yönetimi ve fiyatlandırma gibi birçok gerçek hayat senaryosunda riskin etkisini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Mooney, 1997).

MCM bir dizi sabit girdi değerine karşı rastlantısal bir değer aralığına dayalı olarak bir dizi sonuç tahmin eder. Bu nedenle MCM diğer tahmin modellerinden, duyarlılık analizi ve korelasyon analizi gibi sabit girdilere dayanan analizlerden daha avantajlıdır.

MCM uygulamalarında dikkate alınması gereken üç temel adım bulunmaktadır. İlk olarak sistemden elde etmeyi amaçladığımız sonuçları ifade eden bağımlı değişkenleri ve sisteme girdi olarak vereceğimiz, sonuçları direkt etkileyecek olan bağımsız değişkenlere dayalı bir benzetim modeli kurulması gerekmektedir. İkinci aşamada bağımsız değişkenler için rassal değerler üretilir. Bu aşamada geçmiş verilerden yararlanılacağı gibi değişkenin yapısına uygun bir istatistiksel dağılım kullanılabilir. Son olarak kurulan benzetim modeli çok defa tekrarlanarak sonuçlar kaydedilir. Yeterince sonuç elde edildikten sonra çıktılar istatistik yardımıyla yorumlanarak gerekli bilgi üretilmiş olur.

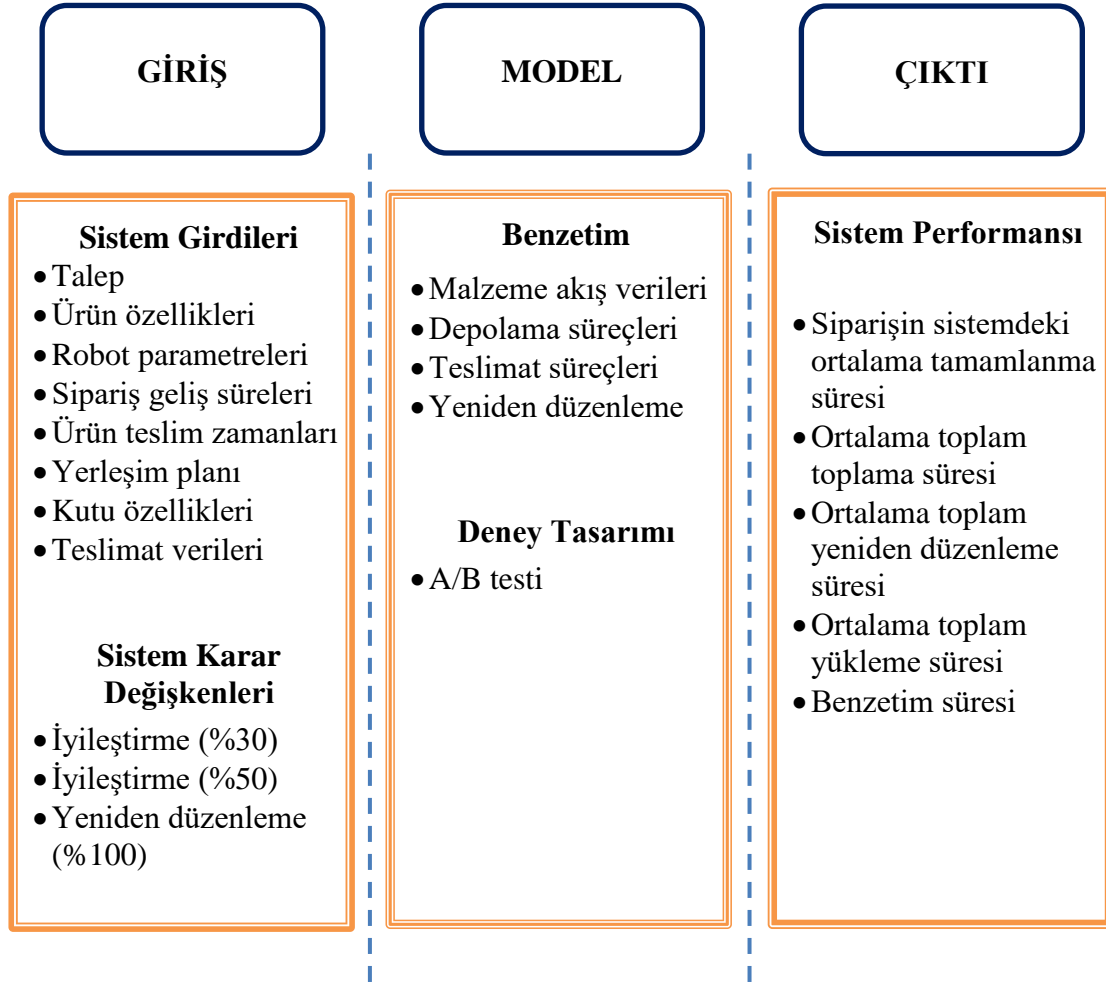
### **6.3. Benzetim Modeli**

Benzetim modeli, dinamik bir sistemin özelliklerini ve davranışlarını bilgisayar aracılığıyla değerlendirmek için oluşturulan yapıdır. Benzetim modeli, belirli araştırma sorguları yapılarak üretilen hipotezleri test etmeye yarayan bir araç olarak ele alınmalıdır. Tasarım veya yönetim stratejilerinin performans kriterleri üzerindeki etkisini gösterir.

Depolarda benzetim tekniği ile ilgili çalışmalardan literatür bölümünde detaylı olarak bahsedilmiştir. Depolarda tasarım aşamasında gerçek sistemin henüz kurulmamış olması veya sistem üzerinde denemeler yapmanın kolay olmaması gibi nedenlerle çok fazla benzetim kullanılmaktadır (Roa ve Adil, 2017).

Bu tez çalışmasında, depoyu modellemek, analiz etmek ve test etmek için uygun bir benzetim modeli geliştirilmiştir. Bu model, alternatif yeniden düzenleme stratejilerinin performans ölçümlerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için bir araç olarak kullanılmıştır (Şekil 5.1). Benzetim modeli, RSKT sistemine dayalı olarak girdi

verilerini kabul eden ve bir dizi karar değişkeni ile deneylere izin veren merkezi karar aşamalarından oluşur. Bu model, şirketin depo yonetim surecinde kullanabileceği dinamik bir yontem oluşturmayı amaçlar. Benzetim tabanlı optimizasyon yontemi, farklı senaryolarda rastgele örnekler için uygulanmaktadır. Oluşturulan model en iyi yeniden düzenleme düzeyini belirlemek ve gerekli testleri yapmak için faydalı olacaktır.



Şekil 6.1. RSKT sistemleri için oluşturulmuş benzetim modelidir.

## 7. SONUÇLAR VE İSTATİSTİK

Bu çalışmada e-ticaret deposuna ait olan veriler Chen (2012)'nin çalışmasından ham olarak alınıp, gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra kullanılmıştır. Bu veriler 38 farklı ülkeden, 5000'den fazla müşteriyi kapsamaktadır. Ham veriler içerisinde eksik veri bulunduran satırlar elenmiştir. Veri kaydedilmesi sırasında çeşitli nedenlerle oluşmuş, sistem açısından hatalı veriler sistematik olarak ayrılarak temizlenmiştir.

Bu tez çalışmasında ele alınan DYAP'nin NP-zor sınıfında olduğu daha önceden de ifade edilmişti. Bu sınıftaki büyük ölçekli problemleri kabul edilebilir sürelerde optimize etmek için dal-sınır algoritması gibi standart algoritmalar kullanıldığı takdirde genellikle sonuç alınamamaktadır. Bu nedenle, yaklaşık çözümler elde edebilmek için sezgisel veya meta-sezgisel algoritmalar tercih edilmektedir.

Depo yeri atama sezgiseli ile dinamik bir yapıya sahip olan DYAP'nin gerçek hayat verileri üzerinde test etmek amacıyla üretilmiş olan benzetim modelinden elde edilen sonuçların incelenmesi yapılacaktır. Aynı zamanda yeniden düzenleme yaklaşımının farklı iyileştirme seviyelerinde performans kriterleri üzerindeki etkisi gözlenecektir.

### 7.1. Sonuçlar

Sistemdeki siparişin sistemdeki ortalama tamamlanma süresi mevcut yaklaşımda 5,35 dakikadır. Ancak yeniden düzenleme yaklaşımı ile toplama süresi 4,31 dakikaya düşürülmüştür. Deponun tamamının yeniden düzenlenmesi yerine sadece bazı ürünlerin yerlerinde iyileştirmeler yapılabilir. İyileştirme (%30) ve iyileştirme (%50) yaklaşımları da siparişin sistemdeki ortalama tamamlanma süresini 4,83 ve 4,58'e düşürmüştür.

Mevcut yaklaşımda ortalama toplam toplama süresi 212,03 saat iken yeniden düzenleme yaklaşımını eklemek 155,95 saate düşürülmesini sağlıyor. İyileştirme (%30) yaklaşımı, ortalama toplam toplama süresi 170,79 saattir. İyileştirme (%50) yaklaşımı uygulandığında ortalama toplam toplama süresi 164,28 saattir.

Ortalama toplam yeniden düzenleme süresi 23,07 saattir. Deponun bazı bölümlerinin robotlar tarafından yeniden düzenlenmesi için iyileştirme (%30) ve iyileştirme (%50)

yaklaşımı uygulanırsa, ortalama toplam yeniden düzenleme süresi 15,04 ve 21,71 saate düşebildiği gözlenmiştir.

Depoya yeniden düzenleme yaklaşımı uygulandığında ortalama toplam yükleme süresinin arttığı görülmüştür. Yeniden düzenleme yaklaşımı uygulandığında istasyonlara yakın kutularda toplama işleminde daha kısa sürede toplayabilmek için yer bırakılmaması uygun olduğu gözlenmiştir. Boş kutular istasyonlara en uzak noktalarda bulunması ve bu nedenle yükleme işlemi sırasında boş kutulara ulaşmak için daha uzun süre geçtiği görülmüştür. Sonuçlar ayrıntılı şekilde Tablo 7.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 7.1.** RSKT sistemi için benzetim sonuçlarıdır.

<b>Performans Kriterleri</b>		
Mevcut Yaklaşım	Siparişin Sistemdeki Ortalama Tamamlanma Süresi (dk.)	5,35
	Ortalama Toplam Toplama Süresi (saat)	212,03
	Ortalama Toplam Yeniden Düzenleme Süresi (saat)	-
	Ortalama Toplam Yükleme Süresi (saat)	160,46
	Benzetim Süresi (saat)	372,49
İyileştirme (%30)	Siparişin Sistemdeki Ortalama Tamamlanma Süresi (dk.)	4,83
	Ortalama Toplam Toplama Süresi (saat)	170,79
	Ortalama Toplam Yeniden Düzenleme Süresi (saat)	12,8
	Ortalama Toplam Yükleme Süresi (saat)	165,96
	Benzetim Süresi (saat)	351,80
İyileştirme (%50)	Siparişin Sistemdeki Ortalama Tamamlanma Süresi (dk.)	4,58
	Ortalama Toplam Toplama Süresi (saat)	164,28
	Ortalama Toplam Yeniden Düzenleme Süresi (saat)	15,4
	Ortalama Toplam Yükleme Süresi (saat)	171,37
	Benzetim Süresi (saat)	357,36
Yeniden Düzenleme (%100)	Siparişin Sistemdeki Ortalama Tamamlanma Süresi (dk.)	4,31
	Ortalama Toplam Toplama Süresi (saat)	155,95
	Ortalama Toplam Yeniden Düzenleme Süresi (saat)	23,07
	Ortalama Toplam Yükleme Süresi (saat)	176,87
	Benzetim Süresi (saat)	355,89



## 7.2. İstatistiksel Analiz

A/B testi, A veya B gibi iki veya daha fazla karar durumundan hangisinin tercih edileceğini istatistiksel olarak belirleme yöntemidir. Yalnızca hangi seçeneğin daha iyi performans gösterdiğini belirlemek değil, aynı zamanda iki seçeneğin arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını araştırmaktır.

Bu tez kapsamında, Tablo 7.1'de olarak belirtilmiş beş farklı performans kriteri incelenmiştir. Her bir performans kriteri için detaylı olarak sonuçlar Ek A'da Tablo A.2, Tablo A.3, Tablo A.4 ve Tablo A.5 ile gösterilmiştir. Mevcut yaklaşım kontrol grubu ve yeniden düzenleme yaklaşımı varyant grubu olarak alınmış ve  $H_0$  ve  $H_1$  hipotezleri kurulmuştur.

$H_0$  = Mevcut yaklaşım ile yeniden düzenleme yaklaşımı arasında fark yoktur.

$H_1$  = Mevcut yaklaşım ile yeniden düzenleme yaklaşımı arasında anlamlı bir fark var.

İki bağımlı grubun ortalaması karşılaştırıldığı durumlarda kullanılan t-testi eşleştirilmiş örneklem t-testi olarak isimlendirilir. Bir durum için farklı zamanlarda yapılan ölçümlerin veya bir iyileştirilme yapıldığı durumlar arasındaki farkların belirli anlam düzeyleri içerisindeki durumunu belirlemek için kullanılır. Bu test uygulanabilecek durumlarda gruplar birbirine bağımlı olmamalı ve gruplar arasındaki farklar normal dağılıma uymalıdır.

Eşleştirilmiş örneklem t testi yapılarak, %95 anlamlılık düzeyinde  $p < 0,001$  değeri elde edilmiştir. Eşleştirilmiş örneklem t testine göre  $H_0$ 'ı reddetmek ve  $H_1$  hipotezini kabul etmek için yeterli kanıt vardır. Benzetim çalışması ile elde edilen sonuçların istatistiksel olarak birbirinden anlamlı şekilde farklı olduğu t-testleri ile görülmüştür.



## 8. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında RSKT sistemlerinde çoklu periyotta dinamik olarak DYAP ele alınmıştır. DYAP sipariş toplama ve yükleme süresini en az yapacak şekilde YAK algoritması kullanılarak çözülmüştür. Yükleme işlemlerinde kullanılmak üzere depo yeri atama sezgiseli geliştirilmiştir. Benzetim çalışmasıyla elde edilen sonuçlara göre RSKT sistemlerinde yeniden düzenleme yaklaşımının etkinliği kanıtlanmıştır.

Yeniden düzenleme ve iyileştirme yaklaşımları geliştirdiğimiz bir benzetim modeli kullanılarak e-ticaret deposuna ait olan gerçek veriler üzerinde test edilmiş ve sonuçlar istatistiksel olarak kanıtlanmıştır. Yeniden düzenleme ve iyileştirme yaklaşımları ile sipariş toplama ve toplam seyahat süreleri açısından iyileştirmeler kaydedilmiştir. Bilgilerimize göre, bu tez çalışması literatürde RSKT sistemlerini bu tür politikalar ve genel hizmet ve varış süreçleriyle modellemeye yönelik ilk girişimdir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar yeniden düzenleme yaklaşımının depo yöneticileri tarafından sipariş toplama sürelerini azaltmak için yaptıkları birçok çalışmada yararlanabileceklerini göstermiştir. Geleneksel depoların temel amacı ürün depolamak ve sevk etmek iken yeni nesil sıkıştırılmış depoların hedefi müşteri beklentilerini etkili bir şekilde yerine getirmektir. Yeni nesil sıkıştırılmış depoların bu hedefe ulaşmak için planlanması ve yönetimi süreçlerinde geleneksel yöntemler yerine bu tezde yer alan yaklaşımlar kullanılabilir.

Özellikle e-ticaret depoları gibi günlük sevkiyat miktarlarının çok yüksek ve bir siparişteki ürün miktarlarının ve hacimlerinin düşük olduğu depolar için uygun olan RSKT sistemlerinin yapısı detaylı olarak araştırılmıştır. Farklı sektörler için bu değerlendirmenin tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir. Örneğin Ecza sektöründe benzer performansı gösterebileceğini düşündüğümüz RSKT sistemleri, özel yapılara sahip olması gereken soğuk hava depoları, tehlikeli madde depoları vb. için uygun gözükmemektedir. E-ticaret depoları gibi kutulara depolamanın uygun olduğu, yüksek hız ve kapasitede operasyonların gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulan depolarda RSKT sistemleri kullanılırken farklı özelliklerde depolara hizmet vermek için geliştirilmiş yeni nesil sıkıştırılmış depolar bulunmaktadır.

Gelecekteki bir çalışma olarak yeniden düzenleme yaklaşımının farklı sıkıştırılmış depolama sistemleri için uygulanabileceğini planlıyoruz.

## KAYNAKLAR

- Abdel-Hamid, A. A. A., & Borndörfer, R. (1994). *On the complexity of storage assignment problems*. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin.
- Akay, B., & Karaboga, D. (2012). A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization. *Information sciences*, 192, 120-142.
- Akay, B. B., and Karaboga, D. (2017). Artificial bee colony algorithm variants on constrained optimization. *An International Journal of Optimization and Control: Theories and Applications (IJOCTA)*, 7(1), 98. <https://doi.org/10.11121/ijocta.01.2017.00342>
- Alfieri, A., Cantamessa, M., Monchiero, A., & Montagna, F. (2012). Heuristics for puzzle-based storage systems driven by a limited set of automated guided vehicles. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(5), 1695-1705.
- Aly, A. I. H. (2010). *Order picking and storage using stackable pallets in a warehouse* [Doktora tezi]. Clemson University
- Ardjmand, E., Bajgiran, O. S., & Youssef, E. (2019). Using list-based simulated annealing and genetic algorithm for order batching and picker routing in put wall based picking systems. *Applied Soft Computing*, 75, 106-119.
- Ashgari, M. S., & Gue, K. R. (2021). A puzzle-based material handling system for order picking. *International Transactions in Operational Research*, 28(4), 1821-1846.
- Baker, P., & Canessa, M. (2009). Warehouse design: A structured approach. *European Journal of Operational Research*, 193(2), 425-436.
- Battini, D., Calzavara, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2015). Order picking system design: the storage assignment and travel distance estimation (SA&TDE) joint method. *International Journal of Production Research*, 53(4), 1077-1093.
- Battini, D., Glock, C. H., Grosse, E. H., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2016). Human energy expenditure in order picking storage assignment: A bi-objective method. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 147-157.
- Beinschob, P., Meyer, M., Reinke, C., Digani, V., Secchi, C., & Sabattini, L. (2017). Semi-automated map creation for fast deployment of AGV fleets in modern logistics. *Robotics and Autonomous Systems*, 87, 281-295.
- Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2017). Sustainable supply chain management in the digitalisation era: The impact of Automated Guided Vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3970-3984.
- Bloemer, K. F. (1993). *A conceptual design for order picking and load forming with robotic palletizing vehicles* [Doktora tezi]. University of Cincinnati.

- Bortolini, M., Botti, L., Cascini, A., Gamberi, M., Mora, C., & Pilati, F. (2015). Unit-load storage assignment strategy for warehouses in seismic areas. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 481-490.
- Bottani, E., Casella, G., & Murino, T. (2021). A hybrid metaheuristic routing algorithm for low-level picker-to-part systems. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107540.
- Boywitz, D., & Boysen, N. (2018). Re-storage assignment in stack-and queue-based storage systems. *Computational Operations Research*, 100, 189-200.
- Bozer, Y. A. (1985). *Optimizing throughput performance in designing order picking systems (warehousing, storage)* [Doktora tezi]. Georgia Institute of Technology.
- Brockmann, T., & Godin, P. (1997). Flexibility for the future in warehouse design. *IIE Solutions*, 29(7), 22-26.
- Buckow, J. N., & Knust, S. (2023). The warehouse reshuffling problem with swap moves. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 169, 102994.
- Bukchin, Y., & Raviv, T. (2022). A comprehensive toolbox for load retrieval in puzzle-based storage systems with simultaneous movements. *Transportation Research Part B: Methodological*, 166, 348-373.
- Cardin, O., Castagna, P., Sari, Z., & Meghelli, N. (2012). Performance evaluation of in-deep class storage for flow-rack AS/RS. *International Journal of Production Research*, 50(23), 6775-6791.
- Carlo, H. J., Giraldo, G. E., and Box, C. (2010). Optimizing the re-arrangement process in a dedicated warehouse. *Progress in Material Handling Research*, 39-48.
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A. (1998). Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 36(3), 713-732.
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A. (2000). Layout design in manual picking systems: a simulation approach. *Integrated Manufacturing Systems*, 11, 2, 94-104. <https://doi.org/10.1108/09576060010313946>.
- Chan, F. T., & Chan, H. K. (2011). Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2686-2700.
- Chen, L., & Lu, Z. (2012). The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 73-80.
- Chen, D., Sain, S. L., and Guo, K. (2012). Data mining for the online retail industry: A case study of RFM model-based customer segmentation using data mining. *Journal of Database Marketing and Customer Strategy Management*, 19(3), 197-208.
- Chen, X., Yang, P., & Shao, Z. (2022). Simulation-based time-efficient and energy-efficient performance analysis of an overhead robotic compact storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 119, 102560.

- Cheng, X., & Zhai, X. (2018). Thermal performance analysis of a cascaded cold storage unit using multiple PCMs. *Energy*, 143, 448-457.
- Chuang, Y. F., Lee, H. T., & Lai, Y. C. (2012). Item-associated cluster assignment model on storage allocation problems. *Computers & Industrial Engineering*, 63(4), 1171-1177.
- Chiang, D. M. H., Lin, C. P., & Chen, M. C. (2014). Data mining based storage assignment heuristics for travel distance reduction. *Expert Systems*, 31(1), 81-90.
- Christofides, N., and Colloff, I. (1973). The re-arrangement of items in a warehouse. *Operations Research*, 21(2), 577-589. <https://doi.org/10.1287/opre.21.2.577>
- Contreras-Cruz, M. A., Lopez-Perez, J. J., & Ayala-Ramirez, V. (2017). Distributed path planning for multi-robot teams based on artificial bee colony. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 541-548.
- Dallari, Marchet, G., Melacini, M., ve Perotti, S. (2006). Order picking systems: how to choose the right one? *Logistics Solutions*, 19-22.
- Deng, G., Yang, H., & Zhang, S. (2016). An enhanced discrete artificial bee colony algorithm to minimize the total flow time in permutation flow shop scheduling with limited buffers. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2016/7373617>
- Dimitrijević, B., Teodorović, D., Simić, V., & Šelmić, M. (2012). Bee colony optimization approach to solving the anti covering location problem. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(6), 759-768. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000175](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000175)
- Ene, S., & Öztürk, N. (2012). Storage location assignment and order picking optimization in the automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(5), 787-797.
- Fontana, M. E., & Nepomuceno, V. S. (2017). Multi-criteria approach for products classification and their storage location assignment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9), 3205-3216.
- Furmans, K., Nobbe, C., & Schwab, M. (2011). Future of material handling—modular, flexible and efficient. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- Frazelle, E. H. (1989). *Stock location assignment and order picking productivity* [Doktora tezi], Georgia Institute of Technology.
- Frazele, E. A., & Sharp, G. P. (1989). Correlated assignment strategy can improve any order-picking operation. *Industrial Engineering*, 21(4), 33-37.
- Gademann, N., ve van de Velde, S. (2005). Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. *IIE Transactions*, 37(1), 63-75. <https://doi.org/10.1080/07408170590516917>
- Gagliardi, J.-P., Renaud, J., and Ruiz, A. (2014). On sequencing policies for unit-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*. 52, 1090-1099.
- Gao, W., & Liu, S. (2011). Improved artificial bee colony algorithm for global optimization. *Information Processing Letters*, 111(17), 871-882.

- Gu, J. (2005). *The forward reserve warehouse sizing and dimensioning problem* [Doktora tezi]. Georgia Institute of Technology.
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1-21.
- Gu, J., Goetschalckx, M., and McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.031>
- Gue, K. R., Furmans, K., Seibold, Z., & Uludağ, O. (2013). GridStore: a puzzle-based storage system with decentralized control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(2), 429-438.
- Gue, K. R., & Kim, B. S. (2007). Puzzle-based storage systems. *Naval Research Logistics*, 54(5), 556-567.
- Han, Y. Y., Liang, J. J., Pan, Q. K., Li, J. Q., Sang, H. Y., & Cao, N. N. (2013). Effective hybrid discrete artificial bee colony algorithms for the total flowtime minimization in the blocking flow shop problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1), 397-414.
- Hao, J., Yu, Y., & Zhang, L. L. (2015). Optimal design of a 3D compact storage system with the I/O port at the lower mid-point of the storage rack. *International Journal of Production Research*, 53(17), 5153-5173.
- Henn, S., & Wäscher, G. (2012). Tabu search heuristics for the order batching problem in manual order picking systems. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 484-494.
- Heragu, S. S., Du, L., Mantel, R. J., & Schuur, P. C. (2005). Mathematical model for warehouse design and product allocation. *International Journal of Production Research*, 43(2), 327-338.
- Heskett, J. L. (1963). Cube-per-order index-a key to warehouse stock location. *Transportation and distribution Management*, 3(1), 27-31.
- Hu, W., Wang, Y., & Zheng, J. (2012, October). Research on warehouse allocation problem based on the artificial bee colony inspired particle swarm optimization (ABC-PSO) algorithm. *Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design*. 1, 173-176.
- Hsu, C. M., Chen, K. Y., & Chen, M. C. (2005). Batching orders in warehouses by minimizing travel distance with genetic algorithms. *Computers in Industry*, 56(2), 169-178.
- Hwang, H. S., & Cho, G. S. (2006). A performance evaluation model for order picking warehouse design. *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 335-342.
- Jin, G., Yang, P., & Duan, G. (2020, April). Multiple deep layout of robotic mobile fulfillment system. *7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 230-234.
- Jin, M., Wang, Y., & Xing, L. (2018). Retrieval Scheduling for Crane-based AS/RS with Compact Storage System and Autonomous Shuttle. In IIE Annual



- Conference. Proceedings (pp. 623-628). *Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE)*.
- Jung, E. J., Choi, J. Y., Hong, S. H., & Chung, G. (2016). Localization for an unmanned forklift in a refrigerated warehouse. *13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 53-55.
- Kansy, D., Tarczynski, G., & Hanczar, P. (2021). Optimization Model for Relocating Items in A Radio-Shuttle Compact Storage System.
- Kang, C. (2021). An order picking algorithm for vertically stacked and top-retrieval storage systems. *ICIC Express Letters*, 15(9), 991-997.
- Karaboga, D. (2005). *An idea based on honeybee swarm for numerical optimization* 200, 1-10. Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department.
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2007a). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471.
- Karaboga, D., Akay, B., and Ozturk, C. (2007). Artificial Bee Colony (ABC) optimization algorithm for training feed-forward neural networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 789-798.
- Karaboga, D., and Basturk, B. (2007b). Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems. *In Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing*, 789–798. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-72950-1\\_77](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72950-1_77)
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 8(1), 687-697.
- Karaboga, D., and Akay, B. (2009). A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 214(1), 108–132. <https://doi.org/10.1016/J.AMC.2009.03.090>
- Karaboga, D., Gorkemli, B., Ozturk, C., & Karaboga, N. (2014). A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications. *Artificial Intelligence Review*, 42(1), 21-57.
- Kennedy, W. J., Patterson, J. W., & Fredendall, L. D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, 76(2), 201-215.
- Kim, B. S., & Smith, J. S. (2012). Slotting methodology using correlated improvement for a zone-based carton picking distribution system. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 286-295.
- Kim, B. I., Heragu, S. S., Graves, R. J., & Onge, A. S. (2003). Clustering-based order-picking sequence algorithm for an automated warehouse. *International Journal of Production Research*, 41(15), 3445-3460.
- King, R. E., & Kim, K. S. (1995). AgvTalk: An object-oriented simulator for AGV systems. *Computers & Industrial Engineering*, 28(3), 575-592.
- Klodawski, M., Jachimowski, R., Jacyna-Golda, I., & Izdebski, M. (2018). Simulation analysis of order picking efficiency with congestion situations. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(3), 431-443.

- Klumpp, M., & Loske, D. (2021). Order Picking and E-Commerce: Introducing Non-Parametric Efficiency Measurement for Sustainable Retail Logistics. *Journal of theoretical and applied electronic commerce research*, 16(4), 846-858.
- Ko, D., & Han, J. (2022). A rollout heuristic algorithm for order sequencing in robotic compact storage and retrieval systems. *Expert Systems with Applications*, 203, 117396.
- Koster, R. De, Le-Duc, T., ve Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481–501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- Koster, R. De, Le-Duc, T., & Yugang, Y. (2008). Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *International Journal of Production Research*, 46(6), 1495-1514.
- Koo, P. H. (2009). The use of bucket brigades in zone order picking systems. *OR Spectrum*, 31(4), 759-774.
- Kota, V. R., Taylor, D., & Gue, K. R. (2015). Retrieval time performance in puzzle-based storage systems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 26(4), 582.
- Kriehn, T., Schloz, F., Wehking, K. H., & Fittinghoff, M. (2018). Impact of class-based storage, sequencing of retrieval requests and warehouse reorganisation on throughput of shuttle-based storage and retrieval systems. *FME Transactions*, 46(3), 320-329.
- Kulak, O., Sahin, Y., & Taner, M. E. (2012). Joint order batching and picker routing in single and multiple-cross-aisle warehouses using cluster-based tabu search algorithms. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(1), 52-80.
- Kuo, R. J., Kuo, P. H., Chen, Y. R., & Zulvia, F. E. (2016). Application of metaheuristics-based clustering algorithm to item assignment in a synchronized zone order picking system. *Applied Soft Computing*, 46, 143-150.
- Kulak, O., Sahin, Y., & Taner, M. E. (2012). Joint order batching and picker routing in single and multiple-cross-aisle warehouses using cluster-based tabu search algorithms. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(1), 52-80.
- Kumawat, G. L., Roy, D., De Koster, R., & Adan, I. (2021). Stochastic modeling of parallel process flows in intra-logistics systems: applications in container terminals and compact storage systems. *European Journal of Operational Research*, 290(1), 159-176.
- Kumawat, G. L., & Roy, D. (2021). A new solution approach for multi-stage semi-open queuing networks: An application in shuttle-based compact storage systems. *Computers & Operations Research*, 125, 105086.
- Lai, K. K., Xue, J., & Zhang, G. (2002). Layout design for a paper reel warehouse: A two-stage heuristic approach. *International Journal of Production Economics*, 75(3), 231-243.
- Larco, J. A., De Koster, R., Roodbergen, K. J., & Dul, J. (2017). Managing warehouse efficiency and worker discomfort through enhanced storage assignment decisions. *International Journal of Production Research*, 55(21), 6407-6422.

- Lawrence L., (1988). *Quantitative methods for business decisions with cases*, Harcourt B. Inc., San Diego
- Li, B., Liu, H., Xiao, D., Yu, G., & Zhang, Y. (2017). Centralized and optimal motion planning for large-scale AGV systems: A generic approach. *Advances in Engineering Software*, 106, 33-46.
- Li, Z., & Zhou, Z. (2013, July). An effective batching method based on the artificial bee colony algorithm for order picking. *Ninth International Conference on Natural Computation*, 386-391.
- Liu, S. A., Wang, Q., & Sun, J. (2013, May). Integrated optimization of storage allocations in automated storage and retrieval system of bearings. *25th Chinese Control and Decision Conference*, 4267-4271.
- Luo, J., Wu, Y., & Mendes, A. B. (2016). Modelling of integrated vehicle scheduling and container storage problems in unloading process at an automated container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 32-44.
- Mantel, R. J., & Landeweerd, H. R. (1995). Design and operational control of an AGV system. *International Journal of Production Economics*, 41(1-3), 257-266.
- Maniezzo, V., Boschetti, M. A., & Gutjahr, W. J. (2021). Stochastic premarshalling of block stacking warehouses. *Omega*, 102, 102336.
- Manzini, R., Accorsi, R., Baruffaldi, G., Santi, D., & Tufano, A. (2019). Performance assessment in order picking systems: a visual double cross-analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 1927-1938.
- Marolt, J., Kosanić, N., & Lerher, T. (2022). Relocation and storage assignment strategy evaluation in a multiple-deep tier captive automated vehicle storage and retrieval system with undetermined retrieval sequence. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-18.
- Matusiak, M., De Koster, R., Kroon, L., & Saarinen, J. (2014). A fast simulated annealing method for batching precedence-constrained customer orders in a warehouse. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 968-977.
- Mehrjerdi, Y. Z., Alipour, M., & Mostafaeipour, A. (2018). Integrated order batching and distribution scheduling in a single-block order picking warehouse considering S-shape routing policy. *International Journal of Engineering*, 31(10), 1723-1733.
- Meneghetti, A., & Monti, L. (2013). Sustainable storage assignment and dwell-point policies for automated storage and retrieval systems. *Production Planning & Control*, 24(6), 511-520.
- Meneghetti, A., Dal Borgo, E., & Monti, L. (2015). Rack shape and energy efficient operations in automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 53(23), 7090-7103.
- Mirzaei, M., De Koster, R. B., & Zaerpour, N. (2017). Modelling load retrievals in puzzle-based storage systems. *International Journal of Production Research*, 55(21), 6423-6435.

- Mirzaei, M., Zaerpour, N., & de Koster, R. B. (2022). How to benefit from order data: correlated dispersed storage assignment in robotic warehouses. *International Journal of Production Research*, 60(2), 549-568.
- Mooney, C. Z. (1997). *Monte carlo simulation*, Sage Publications.
- Narváez, D. R., Galarce, F. P., & Miranda, E. A., (2020). Optimising the storage assignment and order-picking for the compact drive-in storage system. *International Journal of Production Research*, 58(22), 6949-6969.
- Otto, A., Boysen, N., Scholl, A., & Walter, R. (2017). Ergonomic workplace design in the fast pick area. *OR Spectrum*, 39(4), 945-975.
- Pan, C. H., & Liu, S. Y. (1995). A comparative study of order batching algorithms. *Omega*, 23(6), 691-700.
- Pan, J. C. H., Shih, P. H., & Wu, M. H. (2012). Storage assignment problem with travel distance and blocking considerations for a picker-to-part order picking system. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 527-535.
- Pan, J. C. H., Wu, M. H., & Chang, W. L. (2014). A travel time estimation model for a high-level picker-to-part system with class-based storage policies. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 1054-1066.
- Pan, J. C. H., Shih, P. H., Wu, M. H., & Lin, J. H. (2015). A storage assignment heuristic method based on genetic algorithm for a pick-and-pass warehousing system. *Computers & Industrial Engineering*, 81, 1-13.
- Pandit, R., & Palekar, U. S. (1993). Response time considerations for optimal warehouse layout design, *Journal of Engineering for Industry*, 115(3): 322-328. <https://doi.org/10.1115/1.2901667>
- Pang, K. W., & Chan, H. L. (2017). Data mining-based algorithm for storage location assignment in a randomised warehouse. *International Journal of Production Research*, 55(14), 4035-4052.
- Pazour, J. A., and Carlo, H. J. (2015). Warehouse reshuffling: Insights and optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 73, 207–226. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.11.002>
- Peng, Y., & Yang, P. (2015). Integrated optimization of storage location assignment and sequencing in multi-shuttle automated storage/retrieval systems under modified multi-command cycle. *International Conference on Information and Automation*, 2400-2404.
- Petersen, C. G., & Aase, G. (2004). A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*, 92(1), 11-19.
- Pinkam, N., Bonnet, F., & Chong, N. Y. (2016, October). Robot collaboration in warehouse. *16th International Conference on Control, Automation and Systems*, 269-272.
- Quintanilla, S., Pérez, Á., Ballestín, F., & Lino, P. (2015). Heuristic algorithms for a storage location assignment problem in a chaotic warehouse. *Engineering Optimization*, 47(10), 1405-1422.

- Qin, K., Chen, F. Y., & Ma, L. (2015). Cutting down the travel distance of put systems at Kunming International Flower Auction Market. *International Journal of Production Research*, 53(12), 3573-3585.
- Rao, S. S., & Adil, G. K. (2017). Analytical models for a new turnover-based hybrid storage policy in unit-load warehouses. *International Journal of Production Research*, 55(2), 327-346.
- Revillot-Narváez, D., Pérez-Galarce, F., & Álvarez-Miranda, E. (2020). Optimising the storage assignment and order-picking for the compact drive-in storage system. *International Journal of Production Research*, 58(22), 6949-6969.
- Rao, S. S., & Adil, G. K. (2017). Analytical models for a new turnover-based hybrid storage policy in unit-load warehouses. *International Journal of Production Research*, 55(2), 327-346.
- Rosenblatt, M. J., & Roll, Y. (1984). Warehouse design with storage policy considerations. *The International Journal of Production Research*, 22(5), 809-821.
- Sharma, S., & Shah, B. (2015). A proposed hybrid storage assignment framework: a case study. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 64(6), 870-892.
- Santos, J., Costa, P., Rocha, L., Vivaldini, K., Moreira, A. P., & Veiga, G. (2016). Validation of a time based routing algorithm using a realistic automatic warehouse scenario. *In Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference*, 81-92.
- Sari, Z., Saygin, C., & Ghouali, N. (2005). Travel-time models for flow-rack automated storage and retrieval systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9), 979-987.
- Saravanan, M., & Arulkumar, P. V. (2015). An artificial bee colony algorithm for design and optimize the fixed area layout problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9), 2079-2095.
- Schuur, P. C. (2015). The worst-case performance of the Cube per Order Index slotting strategy is infinitely bad—A technical note. *International journal of production economics*, 170, 801-804.
- Sun, Y., Singh, Z., Tokala, V. Y., & Heather, B. (2019). Harvest maturity stage and cold storage period influence lemon fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 249, 322-328.
- Tappia, E., & Roy, D. D., R. De Koster, R., M. Melacini (2017), Modeling, Analysis, and Design Insights for Compact Storage Systems with Autonomous Shuttles. *Transportation Science*, 51(1), 269-295.
- Uludag, O. (2014). *GridPick: A high density puzzle based order picking system with decentralized control* [Doktora tezi], Auburn University.
- Van den Berg, J. P., & Zijm, W. H. (1999). Models for warehouse management: Classification and examples. *International Journal of Production Economics*, 59(1-3), 519-528.

- Wang, Y., Mou, S., & Wu, Y. (2016). Storage assignment optimization in a multi-tier shuttle warehousing system. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 29(2), 421-429.
- Watanabe, Y., Takaya, M., & Yamamura, A. (2015, October). Fitness function in ABC algorithm for uncapacitated facility location problem. *Information and Communication Technology*, 129-138.
- Wauters, T., Villa, F., Christiaens, J., Alvarez-Valdes, R., & Berghe, G. V. (2016). A decomposition approach to dual shuttle automated storage and retrieval systems. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 325-337.
- Wutthisirisart, P., Noble, J. S., & Chang, C. A. (2015). A two-phased heuristic for relation-based item location. *Computers & Industrial Engineering*, 82, 94-102.
- Xiang, X., Liu, C., & Miao, L. (2018). Storage assignment and order batching problem in Kiva mobile fulfilment system. *Engineering Optimization*, 50(11), 1941-1962.
- Yadav, A. S., Maheshwari, P., Swami, A., & Garg, A. (2017). Analysis of six stages supply chain management in inventory optimization for warehouse with artificial bee colony algorithm using genetic algorithm. *Selforganizology*, 4(3), 41-51.
- Yalcin, A., Koberstein, A., & Schocke, K. O. (2019). An optimal and a heuristic algorithm for the single-item retrieval problem in puzzle-based storage systems with multiple escorts. *International Journal of Production Research*, 57(1), 143-165.
- Yang, M. F., Shih, P. H., Pan, J. C. H., & Li, M. C. (2022). The optimal layout design for minimizing operating costs in a picker-to-part warehousing system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-15.
- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Ye, B. (2015a). Variable neighborhood search heuristic for storage location assignment and storage/retrieval scheduling under shared storage in multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79, 164-177.
- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Qin, L. (2015b). An integrated optimization of location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(6), 1145-1159.
- Yang, P., Peng, Y., Ye, B., & Miao, L. (2017). Integrated optimization of location assignment and sequencing in multi-shuttle automated storage and retrieval systems under modified 2 n-command cycle pattern. *Engineering Optimization*, 49(9), 1604-1620.
- Yang, P., Jin, G., & Duan, G. (2022). Modelling and analysis for multi-deep compact robotic mobile fulfilment system. *International Journal of Production Research*, 60(15), 4727-4742.
- Yener, F., Yazgan, H. R., Cömert Ercan, S., Kır, S., & Kaya Y. (2016). Solution of Order Batching Problem with Association Rules and Genetic Algorithm: A Case Study in Pharmacy Warehouse. *Journal of Transportation and Logistics*, 1(2), 129-142.

- Yin, P. Y., & Chuang, Y. L. (2016). Adaptive memory artificial bee colony algorithm for green vehicle routing with cross-docking. *Applied Mathematical Modelling*, 40(21-22), 9302-9315.
- Yoon, C. S., & Sharp, G. P. (1995). Example application of the cognitive design procedure for an order pick system: case study. *European Journal of Operational Research*, 87(2), 223-246.
- Yu, Y., & De Koster, R. B. (2009). Optimal zone boundaries for two-class-based compact three-dimensional automated storage and retrieval systems. *IIE Transactions*, 41(3), 194-208.
- Yuan, Z. (2016). Improving the speed delivery for robotic warehouses. *IFAC-Papers Online*, 49(12), 1164-1168.
- Yunfeng, M. A., Haoxun, C. H. E. N., & Yugang, Y. U. (2022). An efficient heuristic for minimizing the number of moves for the retrieval of a single item in a puzzle-based storage system with multiple escorts. *European Journal of Operational Research*, 301(1), 51-66.
- Zaerpour, N., De Koster, R. B., & Yu, Y. (2013). Storage policies and optimal shape of a storage system. *International Journal of Production Research*, 51(23-24), 6891-6899.
- Zaerpour, N., Yu, Y., & de Koster, R. B. (2015). Storing fresh produce for fast retrieval in an automated compact cross-dock system. *Production and Operations Management*, 24(8), 1266-1284.
- Zaerpour, N., Yu, Y., & de Koster, R. (2017a). Small is beautiful: A framework for evaluating and optimizing live-cube compact storage systems. *Transportation Science*, 51(1), 34-51.
- Zaerpour, N., Yu, Y., & de Koster, R. B. (2017b). Response time analysis of a live-cube compact storage system with two storage classes. *IIE Transactions*, 49(5), 461-480.
- Zaerpour, N., Yu, Y., & de Koster, R. B. (2017c). Optimal two-class-based storage in a live-cube compact storage system. *IIE Transactions*, 49(7), 653-668.
- Zhang, C., Wu, T., Kim, K.H., and Miao, L. (2014a). Conservative allocation models for outbound containers in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 155-165.
- Zhang, C., Wu, T., Zhong, M., Zheng, L., and Miao, L. (2014b). Location assignment for outbound containers with adjusted weight proportion. *Computers & Operations Research*, 52, 84-93.
- Zhang, Y. (2016). Correlated storage assignment strategy to reduce travel distance in order picking. *IFAC-Papers Online*, 49(2), 30-35.
- Zhang, J., Wang, X., Chan, F. T., & Ruan, J. (2017). On-line order batching and sequencing problem with multiple pickers: A hybrid rule-based algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 45, 271-284.
- Zhao, N., Xia, M., Mi, C., Bian, Z., & Jin, J. (2015). Simulation-based optimization for storage allocation problem of outbound containers in automated container terminals. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.

- Zheng, Q. Q., Zhang, Y., He, L. J., & Tian, H. W. (2023). Discrete multi-objective artificial bee colony algorithm for green co-scheduling problem of ship lift and ship lock. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101897.
- Zhu, G., and Kwong, S. (2010). Gbest-guided artificial bee colony algorithm for numerical function optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 217(7), 3166–3173. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.08.049>
- Zou, B., de Koster, M. B. M., & Xu, X. (2016). Evaluating dedicated and shared storage policies in robot-based compact storage and retrieval systems. *ERIM Report Series Reference*.



## EKLER

### EK A. Tablolar

**Tablo A.1.** Parametre değişimlerinin denemeler üzerindeki etkisini göstermektedir.

Sıra	A	B	C	D	E	Ortalama Süre(dk)	Amaç Fonksiyonu(dk)
1	+	+	+	+	+	8,04	32,8900
2	+	+	+	-	+	3,08	40,7325
3	+	+	-	-	+	1,85	38,5458
4	+	+	-	+	+	14,67	41,8150
5	+	-	-	+	+	14,83	33,7650
6	+	-	-	-	+	1,09	41,3325
7	+	-	+	+	+	15,84	28,9550
8	+	-	+	-	+	3,47	28,8075
9	-	-	+	-	+	0,76	38,1758
10	-	-	+	+	+	2,55	32,5450
11	-	-	-	+	+	2,62	39,0450
12	-	-	-	-	+	0,22	55,5083
13	-	+	-	-	+	0,44	42,2567
14	-	+	+	-	+	1,03	47,3258
15	-	+	+	+	+	3,61	43,5792
16	-	+	-	+	+	3,00	39,9217
17	+	+	+	+	-	59,93	31,7425
18	+	+	+	-	-	7,67	37,6050
19	+	+	-	-	-	5,98	41,5750
20	+	+	-	+	-	39,55	39,8050
21	+	-	-	+	-	56,04	34,0958
22	+	-	-	-	-	3,23	33,9675
23	+	-	+	+	-	42,09	28,5400
24	+	-	+	-	-	6,49	28,9275
25	-	-	+	-	-	0,43	35,9667
26	-	-	+	+	-	8,13	33,1100
27	-	-	-	+	-	7,09	39,7383
28	-	-	-	-	-	0,41	44,7800
29	-	+	-	-	-	0,49	91,2142
30	-	+	+	-	-	0,86	48,6142
31	-	+	+	+	-	7,09	39,5875
32	-	+	-	+	-	4,57	48,8533

**Tablo A.2.** Mevcut durumda ve farklı yeniden düzenleme yaklaşımlarında toplam toplama süreleri gözükmektedir.

<b>Veri Seti</b>	<b>Siparişteki ortalama ürün sayısı</b>	<b>Siparişteki ürün çeşidi sayısı</b>	<b>Mevcut</b>	<b>30% (İyileştirme)</b>	<b>50% (İyileştirme)</b>	<b>Yeniden düzenleme</b>
Set 1	127,4	21,2	168,4	157,8	154,9	149,2
Set 2	112,7	13,4	125,1	115,8	108,4	103,8
Set 3	172,1	30,1	147,3	134,3	126,2	118,0
Set 4	140,8	27,6	187,8	167,6	162,9	155,5
Set 5	157,6	32,5	293,0	247,2	232,7	207,8
Set 6	160,9	31,8	215,4	178,6	170,9	165,3
Set 7	142,2	26,6	181,6	144,0	136,1	128,3
Set 8	131,6	27,5	187,2	147,9	141,7	137,2
Set 9	175,4	45,1	308,6	246,4	234,1	217,7
Set 10	143,8	36,2	247,3	173,8	174,6	178,2
Set 11	172,1	35,0	239,8	172,4	168,2	159,9
Set 12	177,9	35,3	242,9	163,6	160,6	150,6

**Tablo A.3.** Mevcut durumda ve farklı yeniden düzenleme yaklaşımlarında toplam yükleme süreleri gözükmetedir.

<b>Veri Seti</b>	<b>Siparişteki ortalama ürün sayısı</b>	<b>Siparişteki ürün çeşidi sayısı</b>	<b>Mevcut</b>	<b>30% (İyileştirme)</b>	<b>50% (İyileştirme)</b>	<b>Yeniden düzenleme</b>
Set 1	127,4	21,2	127,9	127,5	128,2	128,6
Set 2	112,7	13,4	137,3	136,7	138,7	139,4
Set 3	172,1	30,1	142,7	141,4	145,8	147,1
Set 4	140,8	27,6	149,9	147,5	154,4	157,0
Set 5	157,6	32,5	149,6	146,7	156,1	159,1
Set 6	160,9	31,8	148,6	144,7	156,4	160,6
Set 7	142,2	26,6	151,2	146,7	161,2	166,1
Set 8	131,6	27,5	170,3	164,3	183,6	190,3
Set 9	175,4	45,1	166,1	159,3	181,1	188,8
Set 10	143,8	36,2	185,5	177,1	204,8	214,4
Set 11	172,1	35,0	187,7	178,3	209,8	220,9
Set 12	177,9	35,3	208,8	197,4	236,4	250,1

**Tablo A.4.** Mevcut durumda ve farklı yeniden düzenleme yaklaşımlarında yeniden düzenleme süreleri gözükmemektedir.

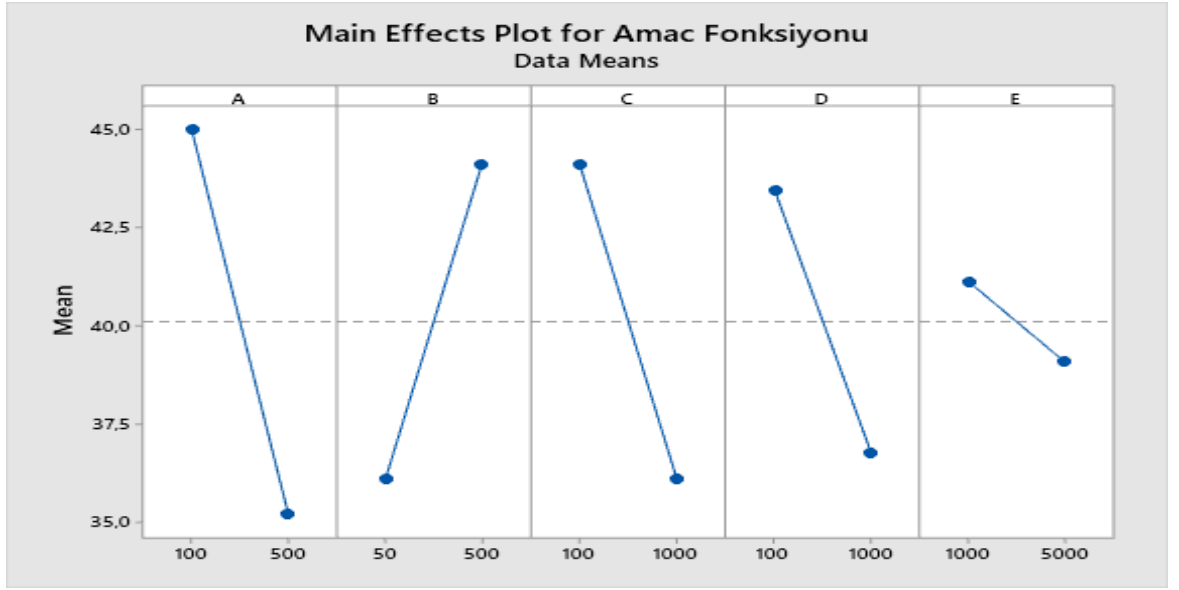
<b>Veri Seti</b>	<b>Siparişteki ortalama ürün sayısı</b>	<b>Siparişteki ürün çeşidi sayısı</b>	<b>30% (İyileştirme)</b>	<b>50% (İyileştirme)</b>	<b>Yeniden düzenleme</b>
Set 1	127,4	21,2	4,3	5,6	10,1
Set 2	112,7	13,4	5,4	6,5	10,6
Set 3	172,1	30,1	7,1	8,8	14,1
Set 4	140,8	27,6	10,3	11,3	15,2
Set 5	157,6	32,5	15,2	21,1	38,9
Set 6	160,9	31,8	14,9	16,5	21,7
Set 7	142,2	26,6	11,0	14,2	22,4
Set 8	131,6	27,5	14,2	15,7	20,6
Set 9	175,4	45,1	20,9	25,7	37,2
Set 10	143,8	36,2	18,8	20,6	26,4
Set 11	172,1	35,0	15,7	18,6	27,8
Set 12	177,9	35,3	15,4	18,0	32,0

**Tablo A.5.** Mevcut durumda ve farklı yeniden düzenleme yaklaşımlarında toplam benzetim süreleri gözükmektedir.

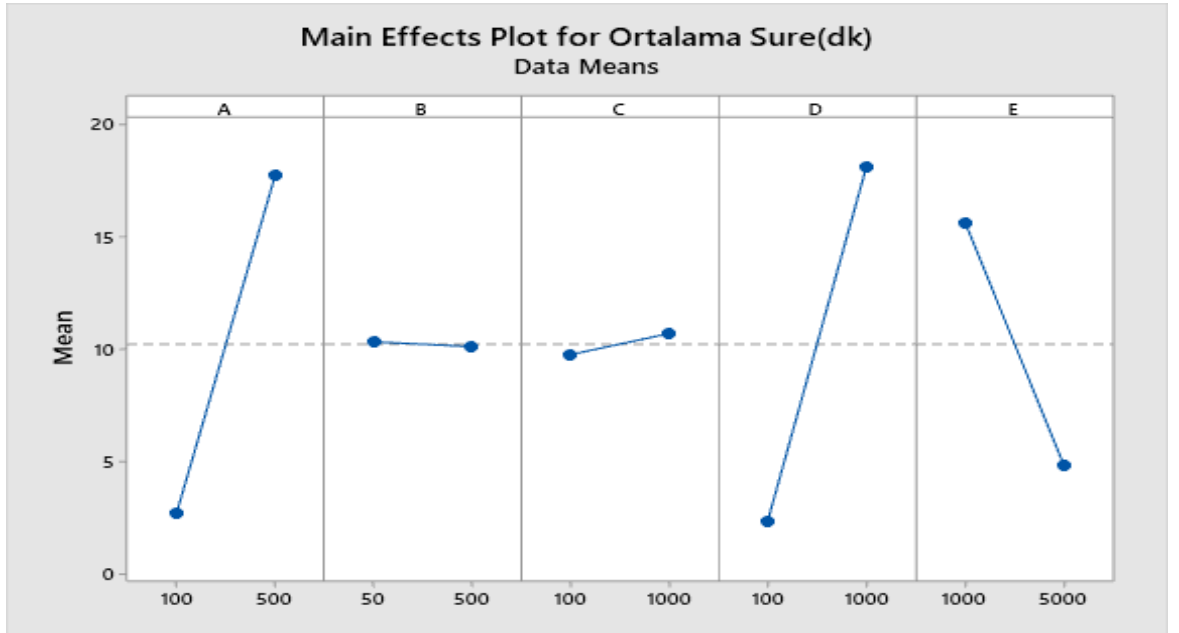
<b>Veri Seti</b>	<b>Siparişteki ortalama ürün sayısı</b>	<b>Siparişteki ürün çeşidi sayısı</b>	<b>Mevcut</b>	<b>30% (İyileştirme)</b>	<b>50% (İyileştirme)</b>	<b>Yeniden düzenleme</b>
Set 1	127,4	21,2	296,3	295,4	288,8	287,9
Set 2	112,7	13,4	262,4	262,6	253,6	253,8
Set 3	172,1	30,1	290,0	288,4	280,8	279,2
Set 4	140,8	27,6	337,7	336,7	328,6	327,7
Set 5	157,6	32,5	442,6	438,2	409,9	405,8
Set 6	160,9	31,8	364,0	368,0	343,7	347,6
Set 7	142,2	26,6	332,8	338,5	311,4	316,8
Set 8	131,6	27,5	357,4	364,9	340,9	348,1
Set 9	175,4	45,1	474,7	477,8	440,9	443,7
Set 10	143,8	36,2	432,7	453,3	400,0	419,0
Set 11	172,1	35,0	427,5	440,3	396,7	408,5
Set 12	177,9	35,3	451,8	471,1	414,9	432,7



## EK A. Şekiller



Şekil A.1. Performans kriterlerinin amaç fonksiyonu üzerine etkileri görülmektedir.



Şekil A.2. Performans kriterlerinin ortalama süre üzerine etkisi görülmektedir.





## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Furkan YENER

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Kocaeli Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi , Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2014, Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2009-2010 yılları arasında Türk Pirelli Lastikleri A.Ş’de Endüstri Mühendisi olarak çalıştı.
- 2013 yılında Sakarya Üniversitesinde Araştırma görevlisi olarak başladığı görevine halen devam etmektedir.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Yener, F. & Yazgan, H. R. (2023, Mart). Simulation of Re-Arrangement and Healing in Robotic Compact Bin-Storage System . *International Journal of Simulation Modelling*, 22(1), 10.2507/IJSIMM22-1-635.

### DİĞER ESERLER:

- Yazgan, H. R., Kır, S., Yener, F., & Comert, S. E. (2020). *A New Collecting and Management Proposal Under Logistics 4.0 and Green Concept*. In *Logistics 4.0* (pp. 320-337). CRC Press.
- Cömert, S., Yener, F., Kır, S., & Yazgan, H. (2019). Analysis of the Most Important Factors that Affect Tensile and Shear Strength of Dual-Phase Steels Using Taguchi Method. *Acta Physica Polonica A*, 135(4), 684-686.

- Yazgan, H. R., Yener, F., Soysal, S., & Gür, A. E. (2019). Comparison Performances of PSO and GA to Tuning PID Controller for the DC Motor. *Sakarya University Journal of Science*, 23(2), 162-174.
- Yener, F., & Yazgan, H. R. (2019). Optimal warehouse design: Literature review and case study application. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 1-13.
- Kır, S., Cömert, S. E., Yener, F., Yazgan, H. R., & Candan, G. (2019). Hazardous Waste Recycling: End of Life Tires Case. *Acta Physica Polonica A*, 135(4), 681-683.
- Yener, F., Kır, S., Cömert, S. E., & Yazgan, H. (2019). Class Based Storage with Mixed Integer Linear Programming Approach for Hazardous Materials Storage. *Acta Physica Polonica, A.*, 135(4).
- Comert, S. E., Yazgan, H. R., Kır, S., & Yener, F. (2018). A cluster first-route second approach for a capacitated vehicle routing problem: a case study. *International Journal of Procurement Management*, 11(4), 399-419.
- Yener, F., Yazgan, H. R., Cömert, S. E., Kır, S., & Kaya, Y. (2016). Solution of Order Batching Problem with Association Rules and Genetic Algorithm: A Case Study in Pharmacy Warehouse. *Journal of Transportation and Logistics*, 1(2), 129-142.
- Cömert, S. E., & Yener, F. (2017). Bir Gıda Firması İçin Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi İle Depo Yeri Seçimi. *Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2(2), 161-177.