OTOMATİK DEPOLAMA VE GERİ ALMA SİSTEMLERİNDE DEPOLAMA POLİTİKALARI VE SIRALAMA ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ

Tuğçe AKYÜZ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMATİK DEPOLAMA VE GERİ ALMA SİSTEMLERİNDE DEPOLAMA POLİTİKALARI VE SIRALAMA ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ

Tuğçe AKYÜZ
0009-0001-1674-3349

Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Tuğçe AKYÜZ tarafından hazırlanan "OTOMATİK DEPOLAMA VE GERİ ALMA SİSTEMLERİNDE DEPOLAMA POLİTİKALARI VE SIRALAMA ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Fatih Çavdur

Başkan	**:**	Prof. Dr. Fatih Çavdur 0000-0001-8054-5606 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akansel 0000-0002-4924-7587 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Dr. Öğr. Üyesi Aslı Sebatlı Sağlam 0000-0002-9445-6740 Mudanya Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
../../….

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26/06/2025

Tuğçe AKYÜZ

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR 26/06/2025	Tuğçe AKYÜZ 26/06/2025
İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.	İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ TEZ TANITIMI
ÖĞRENCİ VE DANIŞMAN FORMU

FR 3.4.6_27

ÖĞRENCİ
Adı SOYADI : Tuğçe AKYÜZ
ÜNVANI :
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : 502106004@ogr.uludag.edu.tr
PROGRAMI: YÜKSEK LİSANS
ORCID : 0009-0001-1674-3349
TÜBİTAK ID : TBTK-0127-6379
WOS RESEARCHER ID: NWH-6842-2025
SCOPUS AUTHOR ID : 59285720400
Google Scholar ID : EEYKeJEAAAAJ&hl

DANIŞMAN
Adı SOYADI : Fatih ÇAVDUR
ÜNVANI : Prof. Dr.
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : fatihcavdur@uludag.edu.tr
YÖKSİS ARAŞTIRMACI ID : 156687
ORCID : 0000-0001-8054-5606
TÜBİTAK ID : TBTK-0014-1669
WOS RESEARCHER ID : LWL-1722-2024
SCOPUS AUTHOR ID : 8419687000
Google Scholar ID : gGWCU8UAAAAJ

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA EĞİTİMİ BOYUNCA

BİLİMSEL ÇALIŞMALARI VE FAALİYETLERİ*

1. Göç, G. T., Akyüz, T., Özcan, G., & Çavdur, F. Çok dönemli güvenlik hizmetleri çizelgelemesi için hedef programlama tabanlı bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *40*(1), 343-354.

BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ

☐

☐

☐

☐

☐

☐

☐

☐

■

Bilgi Yönetimi

☐

☐

■

Sürdürülebilir Kalkınma

☐

☐

☐

☐

☐

ÖZET

Yüksek Lisans

OTOMATİK DEPOLAMA VE GERİ ALMA SİSTEMLERİNDE DEPOLAMA POLİTİKALARI VE SIRALAMA ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ

Tuğçe AKYÜZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR

Artan sipariş hacmi ve karmaşık depo yapıları siparişlerin etkili bir şekilde sıralanmasını ve depo içi atama politikalarının önemini arttırmıştır. Bu çalışmada, otomatik depolama ve geri alma (OD/GA) sistemleri için depo operasyonlarını optimize eden yöntemler analiz edilmiştir. OD/GA sistemlerindeki robotların seyahat süresini tahmin eden analitik bir model uygulanmış ve Excel VBA kodları ile desteklenen temel anlamda bir depo yönetim simülatörü oluşturulmuştur. Simülatör, farklı depo içi atama politikaları ve siparişleri sıralayan sezgisel algoritmaların sistem performansına etkilerini görselleştirmeye olanak tanımaktadır. Sınıf-tabanlı depo içi atama politikası kullanıldığında, ürünleri sınıflara atamak için ABC analizinden yararlanılmıştır. Analitik model, ziyaret edilen depolama konumu sayısındaki artışın robotun seyahat süresinin ortalaması ve varyansı üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermiştir. Ayrıca, deponun şekli ve depo içi atama politikalarının performans üzerindeki etkisi simülatör aracılığıyla detaylı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, OD/GA sistemlerinde siparişlerin sıralanmasının ve depo içi atama politikalarının sistem performansı açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur. Geliştirilen depo yönetim simülatörü hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için faydalı sonuçlar sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: ABC analizi, depo içi atama politikaları, deponun şekli, matematiksel modelleme, otomatik depolama ve geri alma sistemleri, sezgisel sıralama algoritmaları
2025, xiv + 61 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

AN INVESTIGATION OF STORAGE POLICIES AND SCHEDULING ALGORITHMS IN AUTOMATED STORAGE AND RETRIEVAL SYSTEMS

Tuğçe AKYÜZ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR

Increasing order volume and complex warehouse structures have increased the importance of effective order sorting and storage policies. In this study, methods that optimize warehouse operations for automated storage and retrieval (AS/RS) systems are analyzed. An analytical model that estimates the travel time of robots in AS/RS systems is implemented and a basic warehouse management simulator supported by Excel VBA codes is created. The simulator allows visualizing the effects of different storage policies and heuristic algorithms that sort orders on system performance. When class-based storage policy is used, ABC analysis is used to assign products to classes. The analytical model shows that the increase in the number of visited storage locations has significant effects on the mean and variance of the robot's travel time. In addition, the shape of the warehouse and the effect of storage policies on performance are analyzed in detail through the simulator. The obtained results show that order sorting and storage policies are critical for system performance in AS/RS systems. The developed warehouse management simulator provides useful results for both academic research and industrial applications.

Key words: ABC analysis, storage policies, warehouse shape, mathematical modeling, automatic storage and retrieval systems, heuristic sorting algorithms
2025, xiv + 61 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her anında, bilgisiyle, deneyimiyle ve sabrıyla bana yol gösteren, akademik hayatımda bir rehber ve ilham kaynağı olan değerli danışmanım Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR'a, yönlendirmeleriyle yolumu aydınlattığı, beni düşünmeye teşvik ettiği ve desteğini hiçbir zaman esirgemediği için gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Uzun ve zorlu bu süreçte, desteğini hem kalben hem de fiilen her daim yanımda hissettiğim, iyi günde kötü günde hep arkamda duran, sevgileriyle beni ayakta tutan canım aileme, özellikle de sabrıyla, anlayışıyla ve koşulsuz sevgisiyle beni motive eden kardeşim Gürkan AKYÜZ'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans dönemim boyunca TÜBİTAK 1004 Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı ve 22AG001 numaralı, "Elektrikli Taşıtlar İçin Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Grubu (BATEG)" projesi kapsamında verilen destekler için TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu tez çalışmasına katkılarından dolayı ÜÇGE Grup Şirketleri'ne teşekkürlerimi sunarım.

Tuğçe AKYÜZ
26/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa
ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 5
2.1. Depo İçi Atama 5
2.2. ABC Analizi 7
2.3. Çizelgeleme 9
2.4. Matematiksel Model 11
3. MATERYAL ve YÖNTEM 15
3.1. Matematiksel Model 15
3.2. OD/GA Sistemlerinde Depo Yönetimi 23
3.2.1. Depo İçi Atama 23
3.2.2. ABC Analizi 28
3.2.3. Deponun Şekli 32
3.2.4. Sezgisel Sıralama Algoritmaları 38
4. BULGULAR 41
4.1. Matematiksel Model 41
4.2. OD/GA Sistemlerinde Depo Yönetimi 44
4.2.1. Depo İçi Atama 48
4.2.2 ABC Analizi 49
4.2.3. Deponun Şekli 51
4.2.4. Sezgisel Sıralama Algoritmaları 53
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 55
KAYNAKLAR 57
ÖZGEÇMİŞ 61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	**Açıklama**
OD/GA	Otomatik Depolama ve Geri Alma
AGV	Otomatik Yönlendirmeli Araç
SBS/RS	Mekik Tabanlı Depolama ve Geri Alma Sistemi
DTMC	Ayrık Zamanlı Markov Zinciri

ŞEKİLLER DİZİNİ

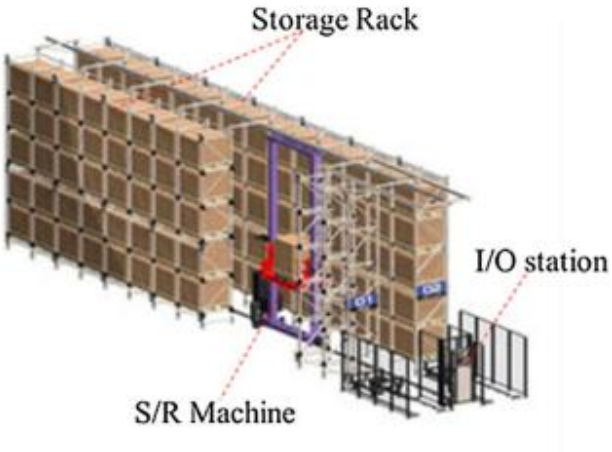
		Sayfa
Şekil 1.1.	2 boyutlu OD/GA (Dong vd., 2021).	1
Şekil 1.2.	3 boyutlu OD/GA (Dong vd., 2021).	1
Şekil 1.3.	OD/GA sistemi tasarımı (Değirmen Bektaş 2019).	2
Şekil 1.4.	Sınıf-tabanlı depolamanın çeşitli yapılandırmaları (Bahrami vd., 2017).	3
Şekil 3.1.	Rassal Depo İçi Atama Politikası algoritmasına ait sözde kod	25
Şekil 3.2.	Atanmış Depo İçi Atama Politikası algoritmasına ait sözde kod	26
Şekil 3.3.	Sınıf-Tabanlı Depo İçi Atama Politikası algoritmasına ait sözde kod	27
Şekil 3.4.	ABC analizine ait sözde kod	31
Şekil 3.5.	En yakın komşuluk algoritmasına ait sözde kod	40
Şekil 4.1.	Farklı senaryolar altında yatay mekik hareketi için seyahat süresi ve varyansına ait çıktıların grafiği	42
Şekil 4.2.	Farklı senaryolar altında dikey mekik hareketi için seyahat süresi ve varyansına ait çıktıların grafiği	43
Şekil 4.3.	Depo yönetim sistemi akış diyagramı (ABC analizi)	45
Şekil 4.4.	Depo yönetim sistemi akış diyagramı (depo içi atama)	46
Şekil 4.5.	Depo yönetim sistemi akış diyagramı (sıralama algoritmaları)	47
Şekil 4.6.	Rassal depo içi atama politikasına ait simülasyon çıktısı	48
Şekil 4.7.	Sınıf-tabanlı depo içi atama politikasına ait simülasyon çıktısı	49
Şekil 4.8.	Üç sınıflı yapı – %50 (1. Sınıf), %30 (2. Sınıf), %20 (3. Sınıf) dağılımında elde edilen sınıflandırma	50
Şekil 4.9.	Üç sınıflı yapı – %80 (1. Sınıf), %15 (2. Sınıf), %5 (3. Sınıf) dağılımında elde edilen sınıflandırma	50
Şekil 4.10.	Beş sınıflı yapı – kullanıcı tanımlı yüzdeliklerle oluşturulan sınıf dağılımı	50
Şekil 4.11.	L-şekilli depolama yerleşimine ait simülasyon çıktısı	52
Şekil 4.12.	Yatay dikdörtgen depolama yerleşimine ait simülasyon çıktısı	52
Şekil 4.13.	Dikey dikdörtgen depolama yerleşimine ait simülasyon çıktısı	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

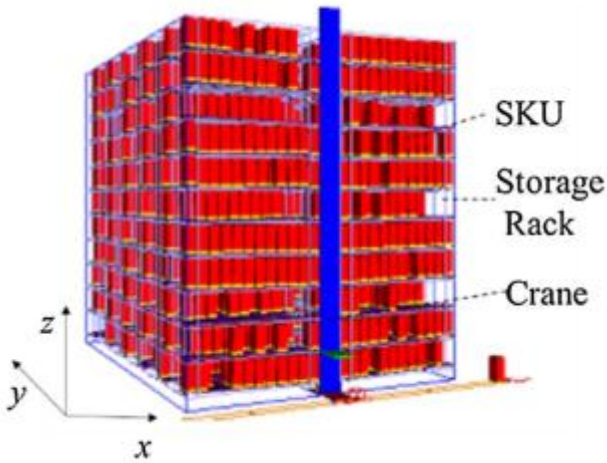
		Sayfa
Çizelge 3.1.	Deponun fiziksel yapısına ait parametreler	24
Çizelge 3.2.	ABC analizinde kullanılan veri tablosunun yapısına bir örnek	28
Çizelge 4.1.	Örnek deponun fiziksel yapısına ait parametreler	41
Çizelge 4.2.	Sıralanan siparişlerin verisi	53
Çizelge 4.3	FIFO yöntemi ile sıralanmış siparişler	54
Çizelge 4.4	En yakın komşuluk algoritması ile sıralanmış siparişler	54

1. GİRİŞ

Otomatik Depolama ve Geri Alma (OD/GA) sistemleri, 1950'lerden itibaren dağıtım merkezlerinde, depolarda ve çapraz sevkiyat ortamlarında depolama ve geri-alma operasyonlarının daha etkili bir şekilde planlanmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. OD/GA sistemleri, temel olarak (i) depo rafları, (ii) depolama ve geri alma makineleri, (iii) koridorlar, (iv) giriş-çıkış noktaları ve (v) toplama noktalarından oluşmaktadır (Roodbergen ve Vis 2009).

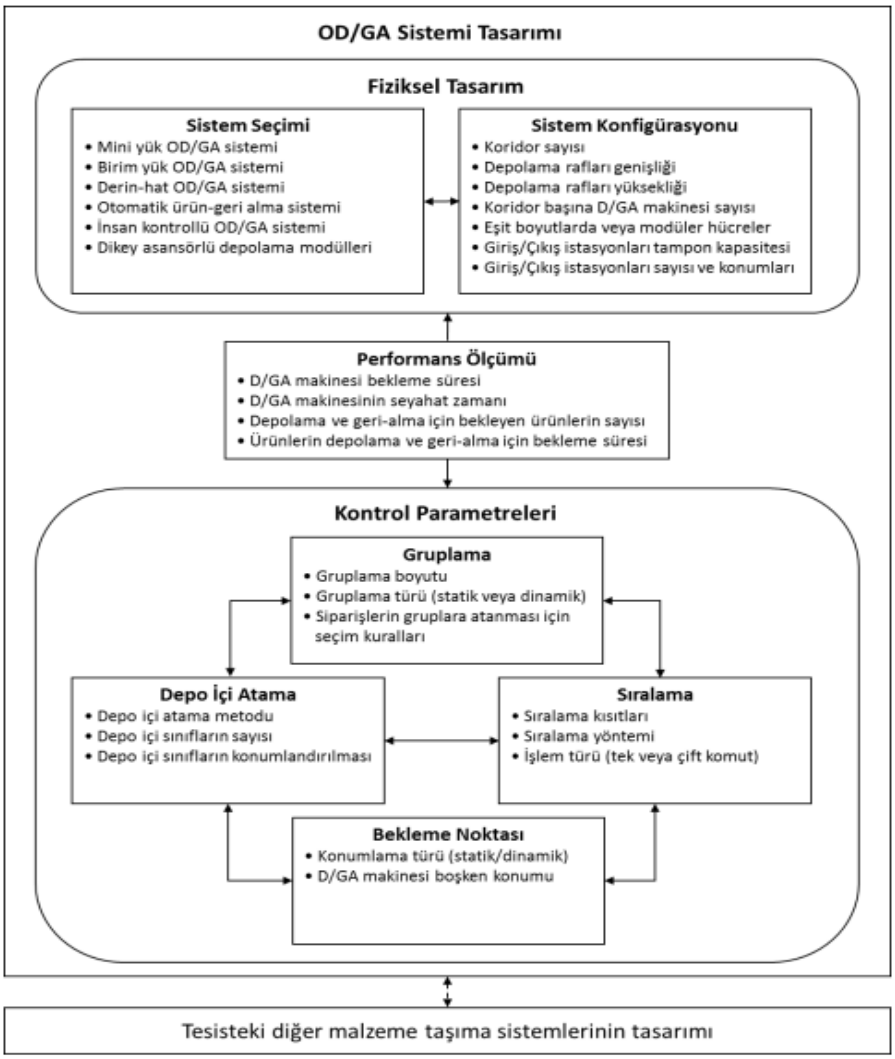


Şekil 1. 1. 2 boyutlu OD/GA (Dong vd., 2021).



Şekil 1. 2. 3 boyutlu OD/GA (Dong vd., 2021).

OD/GA sistemi tasarımı, fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerini içeren iki ana unsurdan oluşmaktadır. Fiziksel tasarım ve kontrol parametreleri ile ilgili ilişkilerin ve bu unsurlara ait bazı örneklerin gösterildiği şema Şekil 1.1'de yer almaktadır (Değirmen Bektaş 2019).

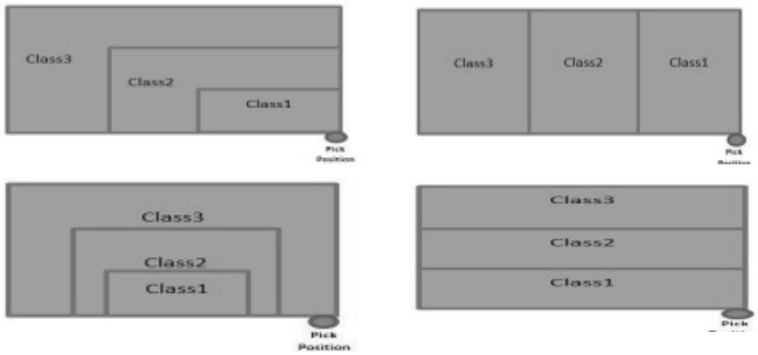


Şekil 1.3. OD/GA sistemi tasarımı (Değirmen Bektaş 2019).

OD/GA sistemlerinin kontrol parametrelerinden biri olan depo içi atama politikası konusu, literatürde önemli bir yere sahiptir. Çeşitli depo içi atama politikası, ürünleri depolama yerlerine yerleştirmek için kullanılabilir. Roodbergen ve Vis (2009), OD/GA sistemlerinde sıkça kullanılan beş depo içi atama politikasından bahsetmektedir. Bu politikalar şunlardır:

- Atanmış depo içi atama (dedicated storage assignment)
- Rassal depo içi atama (random storage assignment)
- En yakın boş konuma atama (closest open location storage assignment)
- Tam-devir-tabanlı depo içi atama (full-turnover-based storage assignment)
- Sınıf-tabanlı depo içi atama (class-based storage assignment)

Sınıf-tabanlı depo içi atama politikasında sınıfların belirlenmesi için ABC analizinin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. ABC analizi, ürünleri toplam talebe olan katkılarına göre azalan düzende sıralayarak, ürün devir hızının dağılımını tahmin etmek için kullanılır (Bortolini vd., 2015). Sınıflar ABC analizi ile belirlendikten sonra, deponun şekline karar vermek de dikkat edilmesi gereken bir diğer konudur. Sınıflara atanan ürünlerin devir hızına bağlı olarak giriş- çıkış noktasına olan konumları belirlenir. Yüksek devir hızına sahip ürünler, giriş-çıkış noktasına yakın en iyi konuma yerleştirilir. Her sınıfın şekline ve boyutuna göre, sınıf-tabanlı depolama farklı yapılandırmalara sahip olabilir (Bahrami vd., 2017). Sınıf-tabanlı depolamanın çeşitli yapılandırmaları Şekil 1.2'de gösterilmektedir (Bahrami vd., 2017).



Şekil 1.4. Sınıf-tabanlı depolamanın çeşitli yapılandırmaları (Bahrami vd., 2017).

OD/GA sistemlerinin kontrol parametrelerinden bir diğeri de depolama ve geri-alma görevlerinin çizelgelenmesi veya sıralanması problemidir. Depolama ve geri- alma görevlerini sıralamak veya çizelgelemek için çeşitli optimizasyon teknikleri, algoritmalar ve sezgisel yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlerin ana hedefleri, toplam seyahat sürelerinin veya toplam seyahat mesafelerinin en aza indirilmesidir. Popovic vd.

(2014), üçlü mekik (triple-shuttle) yapan bir robotun çizelgeleme problemi için yaygın olan üç sezgisel yönteme başvurmuşlardır. Bunlar sırasıyla şöyledir:

- En yakın komşu sezgiseli (nearest neighbour) (NN)
- Tersine en yakın komşu sezgiseli (reversed nearest neighbour) (RNN)
- En kısa bacak sezgiseli (shortest leg) (SL)

Bu tez çalışması kapsamında, OD/GA sistemlerinin kontrol parametrelerine odaklanılmıştır. İlk olarak depo içi atama politikaları incelenmiştir. Sınıf-tabanlı depo içi atama politikasının incelenmesi sırasında, sınıfların belirlenmesinde ABC analizi kullanılması ve optimal depo içi atama politikasının (sınıf yerleşimlerinin) belirlenmesi hedeflenmiştir. Buna ek olarak, diğer kontrol parametrelerinden olan depolama ve geri-alma görevlerinin sıralanması problemine odaklanılmıştır. Sıralama problemi için sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Matematiksel modelleme kapsamında OD/GA sisteminin robotun seyahat süresinin ortalama ve varyansı hesaplanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, OD/GA sistemleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar (i) depo içi atama, (ii) ABC analizi ve (iii) çizelgeleme (iv) matematiksel model olmak üzere 4 ana başlık altında incelenmiştir.

2.1. Depo İçi Atama

OD/GA sistemleri, üretim tesislerinde, dağıtım merkezlerinde ve depolarda yaygın olarak kullanılan envanter yönetim sistemleridir. OD/GA sistemleri özellikle depo planlaması, depolama politikasının belirlenmesi, özel konum ataması ve depo içinde her ürün için gerekli alanların belirlenmesi gibi konuları içerir (Roshan vd., 2019). OD/GA sistemlerinde sıkça kullanılan beş depo içi atama politikası şunlardır: atanmış depo içi atama, rassal depo içi atama, en yakın boş konuma depo içi atama, tam-devir-tabanlı depo içi atama, sınıf-tabanlı depo içi atama (Roodbergen ve Vis, 2009).

En yakın boş konuma depo içi atama politikası, ürünlerin en yakın ilk boş konuma yerleştirilmesi esasına dayanır. Bu genellikle, konumların giriş-çıkış noktaları çevresinde dolup, arka kısımlara doğru gidildikçe daha fazla boş konumun oluştuğu bir depo düzenine neden olur. (Roodbergen ve Vis , 2009).

Tam-devirli-tabanlı depo içi atama politikası, depolama konumlarını ürünlerin talep sıklığına göre belirler. Sıkça talep edilen ürünler, genellikle giriş-çıkış noktalarına yakın, en kolay erişilebilen konumlara yerleştirilir. Yavaş hareket eden ürünler ise giriş-çıkış noktasından daha uzak bölgelere konumlandırılır. Bu politikanın dikkat edilmesi gereken kısmı, talep sıklıklarının önceden bilinmesi gerekliliğidir (Roodbergen ve Vis, 2009).

Sınıf-tabanlı depo içi atama politikasının uygulanması, sınıf sayısının belirlenmesi, sınıflara ürün ataması ve sınıfların depodaki yerlerinin belirlenmesinden oluşur. Rassal ve atanmış depo içi atama politikaları, sınıf-tabanlı depo içi atama politikasının özel durumlarıdır. Rassal depo içi atama politikasında tüm ürünler bir sınıfta yer alırken, atanmış depo içi atama politikasında her biri ayrı bir sınıfa atanır (Roshan ve vd. 2019).

Sınıf-tabanlı depo içi atama politikalarının odaklandığı iki önemli konu vardır: sınıf sayısının belirlenmesi ve sınıfların depodaki yerlerinin belirlenmesi. Literatürde sınıf sayısının incelendiği birçok çalışma mevcuttur. Petersen vd. (2004), depo içi atama politikalarından biri olan sınıf-tabanlı depo içi atama politikası ile hacim tabanlı depo içi atama politikasını karşılaştırdıkları çalışmalarında deponun sınıf sayısının depo performansına olan etkisini incelemişlerdir. Bulgular, depolama sınıfı sayısının artmasıyla birlikte sınıf-tabanlı depo içi atama politikası ile hacim tabanlı depo içi atama politikası arasındaki performans farkının azaldığını göstermiş ve önceki çalışmaları doğrulamıştır. Sonuç olarak, doğru bir şekilde uygulanması için çok daha fazla zaman ve çaba gerektiren hacim tabanlı depolama politikasının sunmuş olduğu faydaların neredeyse %80'ini sağlayan basit bir iki sınıflı sınıf-tabanlı depo düzenine ulaşılabileceği gösterilmiştir. Guo (2016), yaptığı çalışmada depolama alanlarının optimal sayısını ve sınırlarını belirlemek için bir seyahat süresi modeli ve algoritması sunar. Sonuçlar, genellikle az sayıda sınıfın optimal olduğunu ve seyahat süresinin depolama sınıflarının sayısından çok etkilenmediğini göstermektedir. Aynı zamanda depo şeklinin belirlenmesi ve sınıfların depodaki yerlerinin belirlenmesi konusu da literatürde büyük bir alana sahiptir. Bortolini vd. (2019), yaptıkları çalışmada çapraz koridorları ve sınıf-tabanlı depo içi atama politikasına sahip geleneksel olmayan depoların tasarımını ele almaktadır. Çalışmanın odak noktası, yüklerin depolanması ve alınması için ortalama döngü süresini en aza indirmektir. Çalışma, sınıfların optimal boyutunu, şeklini ve konumunu, aynı zamanda koridorların sayısını incelemektedir. Ashayeri vd. (2002), sundukları çalışmada OD/GA sistemlerinde sınıf-tabanlı depo içi atama politikalarında beklenen döngü sürelerini hesaplamak için geometrik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım sezgiseldir ve geleneksel L şeklindeki sınıf düzenleri gibi belirli bir raf düzeni şekli varsaymaz. Model, son beş yıl boyunca farklı raf depolama düzenlerini değerlendirmek için Avrupa'daki büyük bir imalat tesisi üzerinde başarıyla uygulanmıştır. Sonuçlar, OD/GA sistemindeki depolama bölgelerinin düzeninin beklenen döngü sürelerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Literatürde depo içi atama politikalarının OD/GA sistemlerinin optimizasyonu için çok önemli olduğunu gösteren birçok çalışma mevcuttur. Son yıllarda da bu konu hakkında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Singbal ve Adil (2021), yaptıkları çalışmada talep çarpıklığı ve ekipman özelliklerinin yanı sıra, raflara devir bazlı ürün yerleştirilmesini de dikkate

alan üç yeni depolama politikasına odaklanmaktadır. Yeni depolama politikalarını kullanan tasarımlar, diğer depolama politikalarını kullanan tasarımlarla karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar doğrultusunda yapılan analiz, sınıf-tabanlı depo içi atamanın farklı değerlendirme kriterleri altında tam-devir-tabanlı depo içi atamaya dayalı depolama politikasından daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Mirzaei vd. (2021), çalışmalarında depo içi atama politikalarının OD/GA sistemlerinin performansı üzerindeki etkisini tartışmaktadır. Makale, dönüş sıklığına göre ürünleri gruplayan ve popüler depolama sınıflarını toplama istasyonlarına yakın konumlara atayan bir küme tabanlı depolama politikasının kullanımına odaklanır. Çalışma, üretim kapasitesini ve yanıt verme hızını artırmak için geçmiş müşteri talebini analiz etmenin ve uygun bir depolama politikası seçmenin önemini vurgular. Bulgular, doğru depolama politikasının seçilmesinin, geri alma süresini önemli ölçüde azaltabileceğini ve otomatik depolarda depolama sürecini iyileştirebileceğini göstermektedir. Yetkin Ekren (2021), çalışmasında OD/GA sistemlerinin uygulandığı depoların tasarımda ve optimizasyonunda depolama politikalarının önemli bir etken olduğunu vurgulamaktadır. Oluşturulan çok amaçlı optimizasyon modeli ile farklı depolama politikalarının maliyet, verim ve alan kullanımı gibi çeşitli hedefler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu makalenin en büyük katkısı, OD/GA sistemlerine sahip depoların yöneticilerine en uygun depolama politikasını seçerek sistemin performansının optimize etmeyi sağlayan çok amaçlı optimizasyon modeli sunmasıdır. Yang vd. (2015), bu makalelerinde OD/GA sistemlerinde depo içi atama politikalarının sabit bir karardan çok dinamik çizelgeleme ile düşünülmesi gereken bir optimizasyon problemi olduğunu öne sürmüşlerdir. Oluşturdukları değişken komşuluk arama (variable neighbohood search) sezgisel yöntemi ile OD/GA sistemlerinde hem paylaşımlı depolama politikası ile en uygun depolama konumlarının belirlenmesini hem de depolama ve geri alma görevlerinin sıralanmasını sağlanmışlardır. Sonuç olarak depo tasarımcılarına sistemin performansını maksimize etmek için bir araç sunmuşlardır.

2.2. ABC Analizi

Bu tez çalışması, OD/GA sistemlerinde sınıf-tabanlı depo içi atama politikası için kullanılacak ABC analizi yöntemini ele alacaktır. OD/GA sistemlerinde, depolanan

ürünler genellikle farklı öneme ve farklı talep yoğunluklarına sahiptir. Bu nedenle, depolama alanının ve işletme kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması için ABC analizi gibi stratejik yöntemlerin uygulanması önemlidir. Bu bölümde, ABC analizinin OD/GA sistemlerinde nasıl uygulanabileceğine dair birçok farklı yaklaşım incelenecek ve literatürdeki çalışmalar gözden geçirilecektir.

Envanter yöneticilerine yardımcı olan ABC analizi, envanter kalemlerini belirli ölçütlere göre üç farklı sınıfa ayırmaktadır. Yani, yüksek değerde ancak az sayıda olan öğeler A sınıfı olarak adlandırılırken, düşük değerde ancak büyük sayıda olan öğeler C sınıfı olarak adlandırılır ve bu iki sınıf arasına düşen öğeler B sınıfı olarak adlandırılır. ABC analizi, toplam envanter maliyetini etkileyen önemli kalemleri tanımlarken, farklı envanter kategorilerini belirlemenin ve farklı yönetim ve kontrol politikalarına ihtiyaç duyan envanter türlerini tespit etmenin bir yolunu sağlar (Liu vd., 2016).

Sınıf-tabanlı depo içi atama, depodaki ürünleri ABC talep eğrisine göre farklı sınıflara ayıran ve genellikle uygulamada yaygın olarak kullanılan, literatürde geniş bir şekilde incelenen bir yöntemdir. Bortolini vd. (2015), OD/GA sistemlerinin beklenen seyahat süresini hesaplamak için analitik modellerin bir uzantısını, üç sınıflı bir sınıf-tabanlı depo içi atama politikasına ve dikdörtgen zamanlı (rectangular-in-time- RIT) raf düzenine sahip sistemlerde sunmuşlardır. Depo şekil faktörünü ve ABC dönüşüm eğrisini değiştirerek, tek komutlu ve çift komutlu döngüler için ortalama seyahat süresinin analitik kapalı formunu belirlemişlerdir. Depolama sisteminin farklı yapılandırmalarının performansını önerilen analitik seyahat süresi modelini kullanarak değerlendirirmişler ve karşılaştırmışlardır. Üç sınıflı bir depo düzenine sahip OD/GA sistemi için hem tek komutlu hem de çift komutlu döngülerini dikkate alarak analitik modellere dayalı olarak deponun optimal sınırları belirlenmiştir. Guo ve Liu (2010), çalışmalarında OD/GA sistemlerinde, depo içi atama politikasının tek ve çift mekikli sistemlerin performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sınıf-tabanlı depo içi atama politikası kullanılırken ürünlerin atanacağı sınıflar ABC analizi ile belirlenmiştir. A sınıfı ürünlerin giriş-çıkış noktasına yakın yerleştirilmesi sağlanmıştır. Sınıf-tabanlı depo içi atama politikası kullanıldığında, robotun zamanının çoğunu A sınıfının olduğu bölgede geçirmesi beklenmektedir. Çalışmanın sonucunda, sınıf-tabanlı depo içi atama politikasının, tek ve

çift mekikli sistemlerde işlemi nasıl hızlandırdığı değerlendirilmiştir. Rizqi vd. (2023), yaptıkları çalışmada, FlexSim yazılımı üzerinden simülasyon tabanlı deneyler yaparak, çift robotlu OD/GA sistemini farklı sipariş oranları, depo içi atama yöntemleri ve giriş-çıkış yapılandırmaları altında geleneksel OD/GA sistemi ile karşılaştırmışlardır. Hem tek robotlu hem de çift robotlu OD/GA sisteminin en iyi performansı, sınıf-tabanlı depolama ve çift giriş-çıkış yapılandırması ile elde edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, ABC sınıflandırmasının, tüm senaryolarda rassal depolamadan daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Lerher (2006), bu çalışmasında çok koridorlu OD/GA sistemi için sınıf tabanlı depo içi atama politikası kullanılırken verimliliği arttırmak adına ABC analizini kullanmayı hedeflemiştir. ABC analizi kullanılarak ürünleri devir hızlarına göre sınıflandırmanın sınıf tabanlı depo içi atama politikasını optimize ettiğini, robotların seyahat sürelerinin önemli ölçüde azaldığını ve bu sayede OD/GA sisteminin çevrim süresinin azaldığını ve verimliliğinin arttığını göstermiştir. Ramtin ve Pazour (2015), bu makalede ABC analizinin sadece envanter yönetimi için değil aynı zamanda OD/GA sistemlerindeki dinamik depo içi atama ve rota optimizasyonu için de etkili bir yöntem olduğunu öne çıkarmışlardır. Ürünlerin farklı talep bilgilerine dayanarak ABC analizi ile depoda yerleştirilmesinin OD/GA sisteminin beklenen seyahat süresini optimize ettiğini ortaya koyan analitik modeller geliştirilmişlerdir. Sonuç olarak, depo yöneticilerine sistemin verimliliğini arttırmak için ürün yerleşim kararı verirken yardımcı olacak bir model ortaya konulmuştur. Vasili vd. (2008), açık raf yapısına sahip mini yüklemeli OD/GA sistemlerinde sınıf tabanlı depo içi atama politikası için ABC analizini kullanmışlardır. ABC analizi yardımıyla ürünlerin depoda konumlandırılmasının robotun seyahat süresini minimize ettiği ve sistemin operasyonel verimliliğini arttığı gösterilmiştir.

2.3. Çizelgeleme

OD/GA sistemleri modern depolama ve lojistik operasyonlarında önemli bir rol oynamaktadır ve verimliliği artırmak için geliştirilen bu sistemlerde çizelgeleme probleminin önemi giderek artmaktadır. Dağıtım veya üretim alanlarındaki depolama istekleri genellikle acil değildir. Yüklerin depolanma zamanı, sistem performansı için çok kritik değildir. Bu sebeple, depolama istekleri genellikle ilk gelen ilk hizmet alır

prensibine göre yerine getirilir. Geri alma işlemleri sırasında ise genellikle geri alma zamanlarına dikkat edilmelidir, bu da basit ilk gelen ilk hizmet alır prensibinin ötesine bakılmasını gerektirir. Ayrıca, geri alma işlemlerinin akıllıca sıralanmasıyla, OD/GA sisteminin genel performansında iyileştirmeler sağlanabilir. (Roodbergen ve Vis 2009).

Literatürde OD/GA sistemleri için çeşitli çizelgeleme yaklaşımları mevcuttur. Bu yaklaşımlardan ilki sezgisel yaklaşımlardır. Popovic vd. (2014), çizelgeleme problemi için yaygın olan üç sezgisel yöntemden bahsetmişlerdir. Bunlar sırasıyla şöyledir: En yakın komşu sezgiseli (nearest neighbour) (NN), Tersine en yakın komşu sezgiseli (reversed nearest neighbour) (RNN), En kısa bacak sezgiseli (shortest leg) (SL). Yang vd. (2015), çoklu mekik kullanılan OD/GA sistemlerinde siparişlerin çizelgelenmesi için sezgisel algoritmalar kullanılmasını önermişlerdir. Çalışmada iki aşamalı tabu arama sezgizel algoritması geliştirerek, ilk aşamada ürünlerin depolama konumlarına atanmasını ikinci aşamada ise depolama görevlerinin sıralanmasını optimize etmişlerdir. Bu sezgisel algoritma sayesinde sistemin toplam işlem süresini ve kaynak kullanımını minimize etmeye çalışmışlardır. Nia vd. (2017), bu çalışmalarında çok raflı OD/GA sistemlerinde sera gazı emisyonunu optimize edecek dinamik bir sıralama metodu geliştirmişlerdir. Bu amaçla, sipariş depolama ve geri alma çiftlerini minimum mesafe ve enerji tüketimine göre eşleştiren bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Hachemi vd. (2012), bu makalede birim-yük kapasiteli OD/GA sistemleri için depolama ve geri alma görevlerinin sıralanmasını optimize eden adım adım ilerleyen sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem, her adımda en uygun depolama ve geri alma çiftini eşleştirerek taşıma süresini azaltmayı hedeflemiştir.

Çizelgeme ile ilgili bir diğer yaklaşım ise optimizasyon için matematiksel programlama modellerinin oluşturulmasıdır. Tostani vd. (2020), bir OD/GA sistemindeki çizelgeleme problemi için iki düzeyli bir optimizasyon modeli sunulmaktadır. Model, üst seviyede sınıf-tabanlı depo içi ataması ve enerji tüketimi konularını dikkate alırken, alt seviyede depolama ve geri alma makinelerinin çizelgelenmesine odaklanmaktadır. Sonuçlar, önerilen modelin sistemin performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu, toplam maliyeti, enerji tüketimini ve tamamlama süresini (makespan) azalttığını göstermektedir. Yan vd. (2021), çok koridorlu OD/GA sistemlerindeki çizelgeleme problemi için çok

amaçlı optimizasyon modelini ele almaktadır. Çalışma, aynı zamanda optimizasyon modelini çözmek için kullanılan NSABC algoritmasını kullanır. Bu algoritma, baskın olmayan sıralama genetik algoritması (non-dominated sorting genetic algorithm II-NSGA-II) ve yapay arı kolonisi algoritmasını birleştirir. Sonuç olarak sunulmuş olan NSABC algoritması birkaç diğer algoritma ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, NSABC algoritmasının OD/GA sistemleri için çizelgeleme optimizasyonu açısından diğer algoritmalardan daha iyi performans sergilendiğini göstermektedir. Polten ve Emde (2022), yaptıkları çalışmada paylaşılan depolama alanına sahip OD/GA sistemlerinde çoklu mekik (multi-shuttle) robotların çizelgeleme problemine odaklanmışlardır. Hedef, depolama ve geri alma taleplerinin en uygun sıralama ve gruplama şeklini belirlemek, ayrıca her depolama talebinin bir rafa atanmasını sağlamaktır. Yazarlar, problemi kapasite kısıtlı bir araç rotalama problemi olarak yeniden formüle etmişler ve yeni bir kesin çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu problemi hibrit genetik arama ile çözmüşlerdir. Sonuçlar, bu yöntemin büyük örnekleri en uygun şekilde çözme yeteneği, önceki yöntemleri geride bıraktığını göstermektedir.

2.4. Matematiksel Model

Teknolojik gelişmelerle birlikte çoğu firma depolarını otomatikleştirmeyi hedefliyor. Örneğin, e-ticaret faaliyetlerinin son dönemdeki artışı, dağıtım merkezlerini otomatik depolama teknolojilerine yatırım yapmaya yönlendirmiştir. Dağıtım merkezleri, tedarik zincirinin verimliliğini arttırmak için hayati önem taşırlar. Talep dalgalanmalarına hızlı yanıt vermek ve teslimat sürelerini kısaltmak amacıyla stoklu çalışmaya ihtiyaç duyarlar. Yoğun iş gücü ve geniş alan ihtiyacı, modern teknolojilerle otomasyonun zorunlu olmasına katkıda bulunur. Önceden tanımlanmış bir otomatik depo tasarımının performansını hızlı bir şekilde değerlendirmek için Açık Kuyruk Ağı (open queuing network)(OQN) modeli ve yazılım tabanlı bir araç kullanılması büyük katkılar sağlamaktadır. Bununla, tesis yöneticisi kendi gereksinimleri için doğru otomatik depo tasarımına karar verebilecektir. (Ekren ve Akpunar, 2021)

Literatürde otomatik depoların performansını ölçmek için analitik matematiksel modeller kullanan çeşitli çalışmalar vardır. Marchet vd. (2012), makalelerinde otomatik

yönlendirmeli araçların bulunduğu bir otomatik depo sisteminin performansını analitik olarak modelleyerek analiz etmişlerdir. Sistemin çevrim süresi ve işlerin kuyrukta bekleme sürelerini Açık Kuyruk Ağı yaklaşımına dayanarak matematiksel olarak modellemişlerdir. Analiz sonuçlarını simülasyon yoluyla doğrulamışlardır. Ekren vd. (2018), çalışmalarında bir mekik (shuttle) tabanlı depolama ve geri alma sistemi (SBS/RS) tasarımı üzerinden kritik performans ölçütlerini (seyahat süreleri, sunucu kullanım oranları, enerji tüketimi ve geri kazanımı, bekleme süreleri, kuyruk uzunlukları vb.) anlık olarak tahmin edebilen analitik model tabanlı bir performans hesaplayıcı sunulmuşlardır. Matematiksel model olarak Açık Kuyruk Ağı modelini benimsemişlerdir. Depolama ve geri alma istekleri "müşteri", kullanılan otonom araçlar "sunucu" olarak kabul edilmiştir. Depolama ve geri alma isteklerinin gelişleri Poisson süreciyle; servis süreleri ise araçların hızı ve mesafelerine dayalı olarak parametrik dağılımlarla modellenmiştir. Açık Kuyruk Ağı modelinin çözümüyle ortalama bekleme süreleri, kuyruk uzunlukları, araçların seyahat süreleri, enerji tüketimi ve enerji geri kazanım miktarları analitik denklemler aracılığıyla elde edilmiştir. Model çıktıları, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak sonuçların doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Ekren ve Akpunar (2021), yaptıkları çalışmada önceden hazırlanmış bir SBS/RS(shuttle-based storage and retrieval system) depo tasarımı için kritik performans ölçütlerini anlık olarak tahmin edebilen bir Açık Kuyruk Ağı modeli ve yazılım tabanlı bir araç sunmaktadır. Bu araç, depo düzeni, kat-koridor-bölme yapılandırması ve robotun hızı gibi tasarım girdilerini alarak önemli çıktı metriklerini (çevrim süresi, enerji tüketimi, bekleme süreleri, kuyruk uzunlukları ve sunucu (lift/shuttle) kullanım oranı) hesaplar. Çıktılar, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak Mutlak Yüzde Hata (APE) kriterine göre doğrulanır. Lerher vd. (2021), makalelerinde çeşitli raf derinliklerine uygun olarak çalışan otomatik araçların kullanıldığı sistemlerde, sistem verimliliği ve çevrim süresi gibi performansı etkileyen parametrelerin daha iyi anlaşılmasını amaçlanmaktadır. Makalenin en önemli katkılarından biri, otomatik aracın ve kaldırma platformunun gerçek çalışma karakteristiklerini dikkate alarak, çevrim süresinin analitik olarak hesaplanmasını sağlayan bir seyahat zamanı modelinin geliştirilmiş olmasıdır. Diğer çalışmalar genellikle farklı depolama politikalarını, sistem tasarımlarını veya kontrol stratejilerini incelemişlerdir. Bu çalışma ise, bu sistemlerin temel performans ölçütlerinden biri olan çıktıyı detaylı bir şekilde inceleyerek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

Zhong vd. (2023, November), yaptıkları çalışmada Otomatik Yönlendirmeli Araç (AGV) temelli bir Otomatik Depolama ve Geri Alma Sistemi (OD/GA) için; koridor sayısı, raf derinliği, AGV adedi ve giriş/çıkış noktası yerleşiminin sistem performansına etkilerini ortaya koymayı hedeflenmişlerdir. Bu sebeple, tek ve çok koridorlu, çeşitli raf derinliklerine sahip, farklı AGV sayısı ve farklı giriş/çıkış noktası tasarımları için birçok senaryo oluşturmuşlardır. Açık Kuyruk Ağı modelini kullanarak sistemin ortalama çevrim süresi, araç kullanım oranı ve darboğaz düzeyini hesaplayan denklemler kurmuşlardır. Siparişlerin sisteme gelişleri Poisson süreciyle, araçların gideceği mesafe ve araçların hızları parametrik olarak hesaplanmıştır. FlexSim yazılımı kullanılarak tüm senaryolar çalıştırılmış ve kuyruk modeli ile karşılaştırılarak modelin doğrulanması sağlanmıştır. Sonuç olarak koridor sayısı, araç adedi ve giriş/çıkış noktasının yerleşiminin OD/GA sisteminde en belirleyici parametreler olduğu tespit edilmiştir. Kumawat ve Roy (2021), yaptıkları çalışmada karmaşık kuyruk sistemlerinin matematiksel modellenmesi ve analizine yönelik analitik yöntemlerle otomatik depolama ve geri alma sistemleri (OD/GA) üzerine bir uygulamaya odaklanmışlardır. Yazdıkları bu makale ile kuyruk teorisi literatürüne iki önemli katkıda bulunmuşlardır. Bunlardan ilki, çok aşamalı yarı-açık kuyruk ağlarının analizi için yeni bir yinelemeli çözüm yöntemi sunmaktır. Bu yöntem, otomatik depolama ve geri alma gibi karmaşık sistemlerin performansını değerlendirmek için mevcut analitik araçlara bir alternatif getirmiştir. İkincisi ise bu yeni yöntemin mekik tabanlı depolama sistemleri gibi modern OD/GA sistemlerinin performansını modellemek ve analiz etmek için nasıl uygulanabileceğini göstermiştir. Wu vd. (2020), bu çalışmalarında bir otomatik depolama ve geri alma sisteminin süreçlerini modellemek için analitik ve simülasyon tabanlı bir yaklaşım sunmaktadırlar. Birçok çalışma OD/GA sistemlerinin performans analizine odaklanırken, bu çalışma hem modelleme çözümleri oluşturarak hem de tasarım kararlarını analiz ederek daha kapsamlı bir bakış açısı sunmaktadır. Farklı tasarım parametrelerinin sistem performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek, depo yöneticileri için önemli bilgiler sağlamaktadır. Schenone vd. (2020), yaptıkları çalışmada OD/GA sisteminde sınıf tabanlı depolama politikası için robotun seyahat süresini hesaplayan bir analitik model geliştirmişlerdir. Oluşturdukları matematiksel model koridorların boyutunu, robotun hız ve ivmesini, giriş/çıkış noktalarının konumunu, her bir sınıfın nerede konumlandığını ve depolama/geri alma isteklerinin gelme olasılıklarını içerir. Sonuç olarak oluşturdukları bu

matematiksel model ile sistemin performansını ölçerek sınıf tabanlı depolama politikasında sınıfları ve giriş/çıkış noktasını nasıl konumlandırmamız gerektiğine karar vermişlerdir. D'Antonio, ve Chiabert (2019), bu makalede çoklu mekik (multi-shuttle) ve derin raf (deep-lane) özelliklerine sahip OD/GA sisteminde çevrim süresi ve verimliliği doğru bir şekilde tahmin eden analitik modeller oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu analitik modeller ile OD/GA sisteminin darboğazlarını belirlemeyi, farklı yapılandırma ve operasyonel stratejilerin etkisini değerlendirmeyi ve böylece sistemi optimize etmeyi amaçlamışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmanın matematiksel modelleme temelleri ve depo yönetiminde kullanılan uygulama aşamaları detaylı biçimde anlatılmaktadır. İlk olarak, OD/GA sistemlerinin performansını ölçmek amacıyla analitik model tanıtılmıştır. Modelleme sürecinde, ortalama ve varyans temelli seyahat süresi hesaplamalarına dayanan bir yapı kullanılmıştır. Ardından, OD/GA sistemlerinde depo yönetimindeki uygulama aşamaları olan depo içi atama, ABC analizi, deponun şekli ve sezgisel sıralama algoritmaları alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

Çalışmada ele alınan teorik temeller doğrultusunda geliştirilen yöntemler, 16x10 boyutlarında yapılandırılmış örnek bir depo üzerinde uygulanmıştır. Bu kapsamda, sınıf tabanlı depo içi atama politikası uygulanırken; ürün sınıfları ABC analizine göre gruplandırılarak sınıflara atanmıştır. Bununla birlikte, işlem sıralarının belirlenmesinde çeşitli sezgisel algoritmalar kullanılarak sistem performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, modelin uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve önerilen stratejilerin, OD/GA sistemlerinin operasyonel verimliliğini artırma potansiyelini göstermektedir.

3.1. Matematiksel Model

OD/GA sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu, maksimum verimlilik ve maliyet kontrolü sağlamak adına detaylı performans analizlerini gerektirir. Geleneksel olarak simülasyon tabanlı yaklaşımlar bu analizlerde yaygın olarak kullanılsa da kapsamlı parametre aralıklarını değerlendirmek zaman alıcı olabilmektedir. Bu nedenle, sistem performansını hızlı ve doğru bir şekilde tahmin edebilen analitik modeller, OD/GA sistemlerinde tasarımı ve operasyonel kararların desteklenmesinde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, OD/GA sistemlerinin performansını değerlendirmek için analitik modelleme yaklaşımı uygulanmıştır.

Bu bağlamda, Ekren vd. (2018) çalışması temel alınacaktır. Söz konusu çalışma, Mekik Tabanlı Depolama ve Geri Alma Sistemi için seyahat sürelerinin ortalamasını, varyansını

ve enerji tüketimini tahmin etmek için analitik bir model tabanlı araç sunmaktadır. Bu yaklaşım, sistemin matematiksel formülasyonlarla ifade ederek, kapsamlı simülasyonlara gerek kalmadan hızlı ve güvenilir performans tahminleri yapılmasına olanak tanır. Bu tezde de benzer bir analitik modelleme çerçevesi kullanılmıştır.

Ekren vd. (2018)'nin çalışmasında detaylandırılan analitik yaklaşım, bu tez çalışmasında sunulan analitik modele temel oluşturmaktadır. Makalede robotun yatayda mekik, dikeyde kaldırma hareketi için ayrı ayrı seyahat sürelerinin ortalaması ve varyansı hesaplanmıştır.

a) Yatayda Mekik Hareketi İçin Seyahat Sürelerinin Ortalamasının ve Varyansının Hesaplanması:

Ekren vd. (2018)'nin çalışmasında, robotun kat ettiği mesafe, kesikli bir rassal değişken (X) olarak tanımlanmıştır. Ekren vd. (2018) bu tanımlama kapsamında, ilk olarak kesikli bir rassal değişkenin (X) ortalamasını Denklem 3.1'de görüldüğü gibi hesaplandığını hatırlatmıştır:

$$\mu = E(\mathrm{X}) = \sum_{x} x\, f(x) \tag{3.1.}$$

Burada $f(x)$, X rassal değişkeninin olasılık kütle fonksiyonudur. OD/GA sistemlerinde robot için bir mekiğin hareketi depolama veya geri alma işleminden oluşur. Bir depolama işleminde, yük giriş/çıkış noktasından robota yüklenir ve depolama bölmesine depolanmak üzere robot üzerinde hareket eder. Bir geri alma işleminde ise, robot ürünü ilgili konumdan geri almak için ürünün bulunduğu konuma gider. Ardından, yükü giriş/çıkış noktasına bırakmak için hareket eder (Ekren vd. 2018). Ekren vd. (2018), yaptıkları çalışmada rassal depo içi atama politikası olduğunu varsaymış ve bu nedenle bir depolama konumunu seçme olasılığının eşit olduğunu vurgulamışlardır. n toplam konum sayısı olarak kabul edildiğinde bu olasılığın $\frac{1}{n}$ olduğu açıkça görülür. Denklem

3.1 kullanılarak, bir robotun ortalama seyahat süresi, birazdan bahsedilecek dört olası durum dikkate alınarak hesaplanabilir.

- **Robotun bir önceki işlemi geri alma olduğunda depolama sürecini tamamlarken ortalama seyahat süresi:** Bu durumda bir önceki işlem geri alma olduğundan robotun mevcut konumu giriş/çıkış noktası olacaktır. t_{0i} giriş/çıkış noktasından i. konuma seyahat süresi ve n toplam konum sayısı olmak üzere ortalama seyahat süresi Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanır (Ekren vd. 2018).

$$E(S_1) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_{0i} \tag{3.2.}$$

- **Robotun bir önceki işlemi depolama olduğunda depolama sürecini tamamlarken ortalama seyahat süresi:** Bu durumda bir önceki işlem depolama olduğundan robotun mevcut konumu o depolama işleminin yapıldığı konum olacaktır. İlk olarak mevcut konumundan giriş/çıkış noktasına hareket edecek ve buradan depolama yükünü alacaktır. Daha sonra yeni tanımlanan depolama işlemini yapmak için yeni depolama işleminin yapılacağı konuma hareket edecektir. Bu durum için robotun ortalama seyahat süresi Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanır (Ekren vd. 2018) .

$$E(S_2) = \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(t_{0i} + t_{0j}) \tag{3.3.}$$

- **Robotun bir önceki işlemi geri alma olduğunda geri alma sürecini tamamlarken ortalama seyahat süresi:** Bu durumda bir önceki işlem geri alma olduğundan robotun mevcut konumu giriş/çıkış noktası olacaktır. İlk olarak giriş/çıkış noktasından geri alma işlemi yapacağı konuma hareket eder. Daha sonra yükünü bırakma için giriş/çıkış noktasına geri döner. Bu durum için robotun ortalama seyahat süresi Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanır (Ekren vd. 2018).

$$E(R_1) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(t_{0i} + t_{i0}) \tag{3.4.}$$

- **Robotun bir önceki işlemi depolama olduğunda geri alma sürecini tamamlarken ortalama seyahat süresi:** Bu durumda bir önceki işlem depolama olduğundan robotun mevcut konumu o depolama işleminin yapıldığı konum olacaktır. Robot ilk olarak mevcut konumdan geri alma işleminin yapılacağı konuma hareket eder. Daha sonra burada geri alma işlemini gerçekleştirir ve yükü bırakmak için giriş/çıkış noktasına geri döner. Bu durum için robotun ortalama seyahat süresi Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanır (Ekren vd. 2018).

$$E(R_2) = \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(t_{ij} + t_{j0}) \tag{3.5.}$$

Bu dört olası durumun ortalama seyahat süresi Denklem 3.2- Denklem 3.5 ile hesaplandıktan sonra, bir robot için işlem başına ortalama seyahat süresi Denklem 3.6 kullanılarak hesaplanır:

$$E(T) = \frac{1}{4}[E(S_1) + E(S_2) + E(R_1) + E(R_2)] \tag{3.6.}$$

Ekren vd. (2018) çalışmasında seyahat süresi için varyans tahminini hakkında da çıkarımlarda bulunmuştur. İlk olarak kesikli bir rassal değişkenin (X) varyansı Denklem 3.7'de görüldüğü gibi hesaplandığını hatırlatmıştır:

$$\sigma^2 = Var(X) = \sum_{x} x^2 f(x) - \mu^2 \tag{3.7.}$$

Ekren vd. (2018) çalışmasında Denklem 3.7'den yola çıkarak robotun seyahat süresinin varyansının Denklem 3.8'de görüldüğü gibi hesaplanabileceğini oraya koymuştur.

$$\sigma_T^2 = Var(T) = \frac{1}{4}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(t_{0i})^2 + \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(t_{i0} + t_{0j})^2 + \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(t_{0i} + t_{i0})^2 + \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(t_{ij} + t_{j0}\right)^2\right] - E(T)^2 \quad (3.8.)$$

b) Dikeyde Kaldırma Hareketi İçin Seyahat Sürelerinin Ortalamasının ve Varyansının Hesaplanması:

Ekren vd. (2018)'nin çalışmasında dikeyde kaldırma işlemleri Ayrık Zamanlı Markov Zinciri (Discrete-Time Markov-Chain) (DTMC) ile modellenmiştir. Bu modelde durumlar (i, j, k) olarak ifade edilmiştir.

- i= 1 , …, N_t: robotun bulunduğu kat
- j ∈ {1,2}: işlem türü (depolama=1, geri alma=2)
- k=1 , …, N_t, işlem adresi

Toplam I=$N_t \times 2 \times N_t$ durum vardır. Durumlar için geçiş olasılığı matrisi, P, Denklem 3.9'da gösterilmiştir.

$$
P=\begin{bmatrix}
A_1 & & & & & \\
 & S_1 & & & & \\
B_1 & & & & & \\
R_1 & & & & & \\
 & A_2 & & & & \\
 & S_2 & & & & \\
 & B_2 & & & & \\
R_2 & & & & & \\
 & & A_3 & & & \\
 & S_3 & & & & \\
 & & B_3 & & & \\
R_3 & & & & & \\
 & & & A_4 & & \\
 & S_4 & & & & \\
 & & & B_4 & & \\
R_4 & & & & & \\
 & & & \ddots & & \\
 & \ddots & & & & \\
 & \ddots & & & \ddots & \\
 & & & & & A_{N_t} \\
 & S_{N_t} & & & & \\
 & & & & & B_{N_t} \\
R_{N_t} & & & & &
\end{bmatrix} \tag{3.9.}
$$

P matrisindeki, $A_i, B_i, S_i\ ve\ R_i$ sırasıyla Denklem 3.10- Denklem 3.14 şeklinde tanımlanır.

Robot birinci kattayken dikeyde kaldırma hareketini kullanmadığı için, bu durumlar Denklem 3.10 ve Denklem 3.11 ile ayrı ayrı ele alınmıştır. Denklem 3.10'da A_i vektörü, robotun bulunduğu i. kattan 1.kata depolama görevi yapacağı durumdan (i, j, k) durumlarına geçiş olasılıklarını gösterir. Denklem 3.11'de ise B_i vektörü, robotun bulunduğu i. kattan 1.kata geri alma görevi yapacağı durumdan (i, j, k) durumlarına geçiş olasılıklarını gösterir.

$$A_i = \begin{array}{c} \\ (i,1,1) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} (i,1,1) & (i,1,2) & \dots & (i,1,N_t) & (i,2,1) & \dots & (i,2,N_t) \end{array} \\ \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} \end{bmatrix} \end{array} \quad (3.10.)$$

$$B_i = \begin{array}{c} \\ (i,2,1) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} (i,1,1) & (i,1,2) & \dots & (i,1,N_t) & (i,2,1) & \dots & (i,2,N_t) \end{array} \\ \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} \end{bmatrix} \end{array} \quad (3.11.)$$

Denklem 3.12'de verilen S_i matrisi, Denklem 3.14'te detaylı olarak açıklanmıştır. Bu matris, robotun i. katta bulunduğu durumda ve yapılacak işlemin k. katta yer alan (k > 1 için) bir depolama görevi olması halinde, i > 1 koşulunu sağlayan (i,j,k) durumlarına geçiş olasılıklarını göstermektedir. Benzer şekilde Denklem 3.13 ise bu durumun için geri alma görevine ilişkin geçiş olasılıkları verilmiştir.

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{i2} & & & & & \\ & S_{i3} & & & & \\ & & S_{i4} & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & S_{iN_t} \end{bmatrix} \quad (3.12.)$$

$$R_i = \begin{array}{c} \\ (i,2,2) \\ (i,2,3) \\ \vdots \\ (i,2,N_t) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} (1,1,1) & (1,1,2) & \dots & (1,1,N_t) & (1,2,1) & \dots & (1,2,N_t) \end{array} \\ \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} \\ \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \\ \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} \end{bmatrix} \end{array} \quad (3.13.)$$

$$
\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{ccccccc} (2,1,1) & (2,1,2) & \dots & (2,1,N_t) & (2,2,1) & \dots & (2,2,N_t) \end{array} \\
S_{i2} = (i,1,2) & \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} \end{bmatrix} \\
 & \begin{array}{ccccccc} (3,1,1) & (3,1,2) & \dots & (3,1,N_t) & (3,2,1) & \dots & (3,2,N_t) \end{array} \\
S_{i3} = (i,1,3) & \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} \end{bmatrix} \\
\vdots \quad \vdots & \vdots \quad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\
 & \begin{array}{ccccccc} (N_t,1,1) & (N_t,1,2) & \dots & (N_t,1,N_t) & (N_t,2,1) & \dots & (N_t,2,N_t) \end{array} \\
S_{iN_t} = (i,1,N_t) & \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} & \dots & \frac{1}{2}\times\frac{1}{N_t} \end{bmatrix}
\end{array}
\tag{3.14.}
$$

Her bir matris elemanının değeri, $\frac{1}{2N_T}$ gibi sabit bir değere sahiptir, bu da ilgili durum geçişlerinin eşit olasılıklarla gerçekleştiğini veya eşit ağırlıklı olduğunu ifade eder. Ekren vd. (2018)'nin çalışmasında, sabit durum olasılıklarını Denklem 3.15'te π vektörü ile göstermiştir ve bu vektörü Denklem 3.16 ile elde etmiştir.

$$\pi = [\pi_1 \quad \pi_2 \quad \dots \quad \pi_n] \tag{3.15.}$$

$$\lim_{m\to\infty} P^m = \begin{bmatrix} \pi_1 & \pi_2 & \dots & \pi_l \\ \pi_1 & \pi_2 & \dots & \pi_l \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \pi_1 & \pi_2 & \dots & \pi_l \end{bmatrix} \tag{3.16.}$$

Robotun dikeyde kaldırma hareketi için seyahat sürelerinin ortalaması Denklem 3.17 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E[T_{kaldırma}] = \sum_{i=1}^{N_t}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{N_t} \pi_{(i,j,k)} t_{(i,j,k)} \tag{3.17.}$$

Robotun dikeyde kaldırma hareketi için seyahat sürelerinin varyansı Denklem 3.18 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Var[T_{kaldırma}] = \sum_{i,j,k} \pi_{(i,j,k)}\, t^2_{(i,j,k)} - (E[T_{kaldırma}])^2 \tag{3.18.}$$

3.2. OD/GA Sistemlerinde Depo Yönetimi

Bu çalışma kapsamında OD/GA sistemleri için bir depo yönetim sistemi oluşturmak amacıyla, dört ana başlıktan oluşan bir uygulama kurgulanmıştır: (i) depo içi atama, (ii) ABC analizi, (iii) deponun şekli ve (iv) sezgisel sıralama algoritmaları.

3.2.1. Depo İçi Atama

OD/GA sistemlerinde depo içi verimliliği artırmak amacıyla çeşitli depo içi atama politikaları uygulanmaktadır. Bu çalışmada, sistemin operasyonel performansını doğrudan etkileyen üç temel atama politikası değerlendirilmiştir. İlk olarak, belirli ürünlere veya ürün gruplarına önceden tanımlanmış depolama konumları tahsis eden atanmış depo içi atama politikası incelenmiştir. İkinci olarak, ürünlerin mevcut ilk boş konuma yerleştirildiği rassal depo içi atama politikası ele alınmıştır. Son olarak, ürünlerin talep frekansı ve birim maliyeti gibi kriterlere göre sınıflandırılarak her sınıf için belirli alanlar tahsis eden sınıf-tabanlı depo içi atama politikası detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Depo içi atama problemi, OD/GA sistemleri kapsamında, gelen ürünlerin depodaki en uygun konumlara atanması ve depodan talep edilen ürünlerin en verimli şekilde toplanması süreçlerinin optimizasyonunu kapsar. Bu problemin temel amacı, OD/GA sisteminin verimliliğini ve performansını artırmak için depo içi atama politikaları geliştirmektir. Bu politikalar, dinamik bir ortamda, değişen ürün talepleri ve sistem kısıtlamaları gibi faktörleri göz önünde bulundurarak en iyi atama kararlarını almayı hedefler. Bu sayede, depo operasyonlarındaki robotun seyahat süresi ve enerji tüketimi en aza indirilirken, müşteri memnuniyeti ve sistem kapasitesi en üst düzeye çıkarılır.

Çalışmanın bu bölümünde, depo içi atama politikalarının modellenmesi ve performans analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla, oluşturulan sözde kodlarda detaylandırılan

depolama politikalarına ait algoritmalardan bahsedilmiştir. Bu algoritmalar, depo özelliklerini ve ürün sınıflandırma kriterlerini temel alarak üç farklı atama politikasını da uygulamaktadır. Sınıf tabanlı depo içi atama politikasında sınıfların belirlenmesi için kullanılan ABC analizi 3.2.2. ABC analizi bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

Çalışmada kullanılan parametreler ve bunların tanımlamaları Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deponun fiziksel yapısına ait parametreler

Parametre	Tanım
N_a	Depo içerisindeki koridor sayısı
N_s	Her bir koridorun her iki tarafında yer alan raf sayısı
N_x	Rafın genişliği boyunca konum sayısı (x ekseni boyunca)
N_y	Rafın yüksekliği boyunca konum sayısı (y ekseni boyunca)
N_z	Rafın derinliğini temsil eden konum sayısı
N_i	Depoda mevcut olan toplam ürün sayısı
N_c	Ürünlerin ayrıldığı toplam sınıf sayısı

Bu parametreler, depo yerleşimini ve ürün dağılımını sayısal olarak modelleyerek, farklı atama senaryolarının simülasyonu için gerekli altyapıyı sağlamaktadır. Algoritma, depo içi atama politikasını N_c parametresine göre dinamik olarak seçerek, depo operasyonlarındaki çeşitli ürün sınıflandırma senaryolarına uyum sağlayabilme yeteneği sergilemiştir. Her bir politika seçeneği, belirli bir depo ortamı veya operasyonel gereksinimi temsil etmekle birlikte, aslında daha genel bir yaklaşımdan türeyen özel durumlar olarak da ele alınmıştır.

- **Rassal Depo İçi Atama Politikası ($N_c = 1$):** Bu çalışma için rassal depo içi atama politikası, depolanan tüm ürünlerin tek bir sınıfa ait olduğu durumları ifade etmiştir. $N_c = 1$ koşulu sağlandığında, tüm depo alanının tek bir genel sınıfa atandığı varsayılmıştır. Bu politika altında, ürünler depo içerisindeki konumlara tamamen rassal bir yaklaşımla atanmıştır. Bu durum, özel bir sınıflandırma, ürün özellikleri veya optimizasyon gerektirmeyen, basit envanter yönetim sistemlerine

sahip depolar için kullanışlı bulunmuştur. Bu, aslında tüm ürünlerin tek bir büyük sınıfa dahil edildiği, dolayısıyla herhangi bir özel sınıflandırma aranmadığı bir "sınıf-tabanlı" atamanın en basit hali olarak düşünülmüştür.

Bu depolama politikası için oluşturulan algoritmaya ait sözde kod Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Algoritma, depo tasarım parametresi olan raf konumlarını içeren L listesini girdi olarak kabul eder. Algoritmanın ana işlevi, bu depolama noktalarının her birine bir sınıf ataması yapmaktır. Döngü, L listesindeki her bir depolama noktası için iterasyon yaparak, her bir noktanın sınıf değerini 1 olarak belirler. Bu tekdüze atama, tüm depolama birimlerinin operasyonel olarak aynı sınıfta değerlendirildiği varsayımına dayanmaktadır. Sonuç olarak, bu algoritma depo içindeki tüm lokasyonlara homojen bir sınıflandırma uygulayarak, daha karmaşık atama stratejilerinin olmadığı durumlarda temel bir çözüm sunar.

Algorithm 1: Rassal Depo İçi Atama Politikası

Girdi: Depo Tasarım Parametreleri ($\mathcal{L}$ raf konumları listesi)
Çıktı: Depo Sınıf Atamaları (Her $l \in \mathcal{L}$ için bir sınıf ataması)

```
for each depolama noktası l in L do
    l.sinif ← 1;
```

Şekil 3.1. Rassal Depo İçi Atama Politikası algoritmasına ait sözde kod

- **Atanmış Depo İçi Atama Politikası ($N_c = N_i$):** Bu politika, her bir ürünün benzersiz bir sınıf olarak kabul edildiği ve $N_c = N_i$ koşulunun sağlandığı aşırı ürün çeşitliliğinin olduğu bir durumun senaryosunu yansıtmıştır. Bu durumda, Atanmış Depo İçi Atama Politikası devreye girmiştir. Bu yaklaşım altında, her bir depo konumu önceden belirli bir ürüne atanmıştır. Dolayısıyla, her ürünün depoda sabit, atanmış bir konumu oluşturulmuştur. Bu durum, her bir ürünün kendi özel sınıfını oluşturduğu ve bu sınıfa özel bir konumun tahsis edildiği, sınıf-tabanlı atamanın ürün bazında özelleşmiş bir hali olarak yorumlanmıştır.

Bu depolama politikası için oluşturulan algoritmaya ait sözde kod Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Bu algoritma, iki ana girdiye sahiptir. G ile temsil edilen ürün grubu

listesi ve L ile belirtilen depo raf konumları listesidir. Algoritmanın işleyişi, iç içe bir döngü yapısına sahiptir; her bir depolama noktası (l) ve her bir ürün grubu (g) için işlem yapar. Algoritma, her bir depolama noktasının sınıfını, döngüdeki mevcut ürün grubunu g olarak atar. Bu yaklaşım, her bir depolama noktasına belirli bir ürün grubunun atanmasını sağlayarak, depoda ürün gruplarına özel alanların oluşturulmasına olanak tanır ve bu sayede ürün grubu sayısı kadar sınıf sayısı oluşturur. Böylece daha organize bir depolama stratejisi izler.

Algorithm 2: Atanmış Depo İçi Atama Politikası

Girdi: Ürün-Grubu Numaraları ($\mathcal{G}$ ürün grubu listesi), Depo Tasarım Parametreleri ($\mathcal{L}$ raf konumları listesi)

Çıktı: Depo Sınıf Atamaları (Her $l \in \mathcal{L}$ için bir sınıf ataması)

```
for each depolama noktası l in L ve each ürün grubu g in G do
    l.sinif ← g;
```

Şekil 3.2. Atanmış Depo İçi Atama Politikası algoritmasına ait sözde kod

- **Sınıf-Tabanlı Depo İçi Atama Politikası ($N_c = 3$):** Bu politika, ürünlerin belirli ve yönetilebilir sayıda (bizim çalışmamızda üç) kategoriye ayrıldığı durumlar için özel olarak tasarlanmıştır. $N_c = 3$ koşulu sağlandığında, Sınıf-Tabanlı Depo İçi Atama Politikası uygulanmıştır. Bu yaklaşımın temelinde, depo alanının farklı ürün sınıfları arasında, her bir sınıfın depodaki önceden belirlenmiş oransal dağılımına göre paylaştırılması yatmıştır. Örneğin, hızlı hareket eden A sınıfı, orta düzeyde hareket eden B sınıfı ve yavaş hareket eden C sınıfı ürünlerin belirli bölgelere ayrılması bu politikanın bir uygulaması olmuştur. Bu sınıflandırma, sipariş toplama rotalarını optimize ederek verimliliği artırabilmiş, depo içi trafiği azaltabilmiş ve erişim sürelerini minimize edebilmiştir. Bu politika, rassal depo içi atama politikası ile atanmış depo içi atama politikası arasında bir denge kurarak hem esneklik hem de verimlilik avantajları sunmuştur.

Bu depolama politikası için oluşturulan algoritmaya ait sözde kod Şekil 3.3' de gösterilmiştir. Bu algoritma, ürün grubu olasılıkları ve depo raf konumları listesini girdi olarak alır. İlk olarak, her bir ürün grubunun değerini, talep ve maliyet

çarpanlarını kullanarak hesaplar ve ürün gruplarını bu değere göre azalan şekilde sıralar. Ardından, her bir ürün grubu için tanımlanan olasılıkları kullanarak kümeler oluşturur. Algoritmanın ana döngüsü, her bir depo konumunu ve ürün grubunu dolaşır. Bu döngüde, eğer bir ürün grubunun sınıfı önceden oluşturulmuş kümelerden birine denk geliyorsa, o depo konumuna ilgili sınıfı atar. Bu yaklaşım, depo içerisindeki yerleşim stratejisini ürünlerin önemine veya özelliklerine göre optimize ederek daha verimli bir atama sağlamayı hedefler.

Algorithm 3: Sınıf-Tabanlı Depo İçi Atama Politikası

Girdi: Ürün-Grubu Olasılıkları ($p(g)$ olasılıkları, $g \in \mathcal{G}$), Depo Tasarım Parametreleri ($\mathcal{L}$ raf konumları listesi)

Çıktı: Depo Sınıf Atamaları (Her $l \in \mathcal{L}$ için bir sınıf ataması)

```
for each ürün grubu g in 𝒢 do
    g.deger ← g.talep × g.maliyet;
𝒢′ ← Sirala(𝒢, anahtar = deger, azalan);
𝒞 ← KumeAyir(𝒢, olasılıklar = {p(g) | g ∈ 𝒢});
for each depolama noktası l in ℒ ve each ürün grubu g in 𝒢 do
    if g.sinif == c for some c ∈ 𝒞 then
        l.sinif ← c;
```

Şekil 3.3. Sınıf-Tabanlı Depo İçi Atama Politikası algoritmasına ait sözde kod

Yukarıda açıklanan tüm atama politikaları incelendiğinde, aslında Sınıf-Tabanlı Depo İçi Atama Politikasının daha genel bir çerçeve sunduğu ve diğer politikaların bu çerçevenin özel durumları olarak kabul edilebileceği açıktır. Rassal Depo İçi Atama Politikası ($N_c = 1$) , tüm ürünlerin tek bir "genel sınıf" olarak ele alındığı ve bu sınıf için rassal yerleştirme kurallarının uygulandığı sınıf-tabanlı atamanın bir alt kümesidir. Benzer şekilde, Atanmış Depo İçi Atama Politikası ($\boldsymbol{N_c} = N_i$), her bir ürünün kendine özgü bir sınıf oluşturduğu ve bu "tekil sınıflara" özel konumların tahsis edildiği sınıf-tabanlı atamanın en detaylı hali olarak yorumlanabilir. Bu bakış açısı, depo içi atama stratejilerinin çeşitliliğini tek bir kapsamlı model altında birleştirerek, daha bütünsel bir analiz ve optimizasyon perspektifi sunmaktadır.

3.2.2. ABC Analizi

Bu çalışmada, OD/GA sistemlerinin optimizasyonu için gerçekleştirilen ABC analizi sürecinde çeşitli materyallerden ve araçlardan faydalanılmıştır. Analiz için gerekli olan envanter verileri, rassal olarak oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, farklı senaryolar altında sistem performansını değerlendirebilmek ve önerilen politikaların genellenebilirliğini test edebilmek amacıyla benimsenmiştir.

ABC analizinin temelini oluşturan veri tablosu, her bir envanter kalemini temsil eden Item ID (ürün kimliği), Demand (talep miktarı), Cost (birim maliyet) ve Value (değer) sütunlarını içermektedir. Value sütunu, her bir ürün için Demand ve Cost değerlerinin çarpımı

$$Değer_i = Talep_i \times Maliyet_i \tag{3.19}$$

ile hesaplanmıştır. Bu hesaplanan Value değeri, ürünlerin ABC sınıflandırması için temel ölçüt olarak kullanılmıştır. Çizelge 3.2'de oluşturulan rassal verilere bir örnek verilmiştir.

Çizelge 3.2. ABC analizinde kullanılan veri tablosunun yapısına bir örnek

Item ID	Demand	Cost
1	60	45
2	58	95
3	61	40
4	85	65
5	91	55

Bu bölüm, OD/GA sistemlerinin operasyonel çerçevesi içinde ürünlerin sınıflandırılması için kullanılan yöntemi açıklar. Sınıf tabanlı bir depo içi atama politikasının uygulanmasında sınıfların belirlenmesi için, yaygın olarak kullanılan ABC analizi tekniğinden yararlanılmıştır.

ABC analizinin temelini oluşturan çalışmalar ilk olarak İtalyan ekonomist Vilfredo Pareto tarafından yapılmıştır. Pareto (1971), yaptığı çalışmada bir ülkenin nüfusunun çok az bir kısmının, ülkenin toplam üretiminin/ekonomik değerinin büyük bölümünü oluşturduğu kuramını ileri sürmüştür. ABC analizinin operasyonlarda en yaygın kullanımı envanter

yönetimindedir. Envanter kalemleri yalnızca maliyet veya talep miktarı temelinde A, B veya C olarak kategorize edilir. Yani, bir envanter kalemi yüksek birim maliyete veya yüksek talebe sahipse A kalemi olarak sınıflandırılır (Flores ve Clay Whybark, 1986). ABC analizi, envanter kalemlerini üç temel kategoriye (A, B ve C) ayıran bir sınıflandırma yöntemidir: "A" kategorisi en değerli kalemleri barındırırken, "C" kategorisi en az değerli olanları içerir; "B" kategorisi ise bu iki uç arasında kalan kalemlerden oluşur. Bu yöntemin temel amacı, kritik öneme sahip az sayıdaki kaleme (A kalemleri) odaklanmayı sağlamak ve görece daha önemsiz olan çok sayıdaki kaleme (C kalemleri) aşırı kaynak ayırmaktan kaçınmaktır (Mahagaonkar ve Kelkar, 2017).

Bu analizde, çeşitli kalemler toplam taleplerine, birim maliyetlerine ve envanter değerlerine göre listelenir. Bu yaklaşım, envanter incelenirken, kalemlerin firma tarafından A'dan C'ye kadar derecelendirilmesi ve derecelendirmelerini aşağıdaki kurallara göre belirlemesi gerektiğini belirtir:

- **A Sınıfı:** Bu sınıfa ait ürünler "en yüksek yıllık tüketim değerine" sahiptir, yani şirketin yıllık tüketim değerinin %70-80'ini oluşturur. İlginç bir şekilde, toplam envanter kalemlerinin sadece %10-20'sini oluştururlar. Bunlar sıkı envanter kontrolü, daha korunaklı depolama alanları ve iyileştirilmiş satış tahminleri gerektirir; yeniden siparişler sık olmalı, haftalık veya hatta günlük yeniden sipariş verilmelidir; A sınıfına ait ürünlerde stok tükenmelerini önlemek bir önceliktir (Mahagaonkar ve Kelkar, 2017). Depolama politikası açısından, yüksek talep ve değere sahip olduklarından, A sınıfına ait ürünler deponun giriş ve çıkış noktalarına en yakın, kolay erişilebilir ve minimum taşıma mesafesi gerektiren alanlara yerleştirilmelidir.

- **B Sınıfı:** Orta düzeyde yıllık tüketim değerine sahip, yani yıllık tüketim değerinin %15-25'ini oluşturan ara sınıf ürünlerdir. Toplam envanter kalemlerinin yaklaşık %30'unu tüketirler. Düzenli ancak A sınıfı kadar sık olmayan yeniden sipariş ve kontrol prosedürleri uygulanmalıdır (Mahagaonkar ve Kelkar, 2017). Depolama politikası açısından, B sınıfına ait ürünler A ve C sınıfları arasında bir konumda yer almalıdır. Bunlar, A sınıfının deponun giriş ve çıkış noktalarına yakın olması

kadar bu noktalara yakın olmasa da yine de makul bir erişilebilirlik sağlayan orta mesafeli depolama alanlarına atanmalıdır.

- **C Sınıfı:** Bu sınıfa ait ürünler "en düşük yıllık tüketim değerine" sahiptir, yani yıllık tüketim değerinin %10-15'ini oluşturur. Aksine, toplam envanter kalemlerinin %50'sini oluştururlar. Bunlar için daha az sıkı kontrol ve daha uzun yeniden sipariş döngüleri uygulanabilir; stok tükenmesi riskinin etkisi daha düşüktür (Mahagaonkar ve Kelkar, 2017). Depolama politikası bağlamında, düşük talep ve değere sahip olduklarından C sınıfına ait ürünler, daha az erişilebilir, depolama yoğunluğunun artırılabileceği veya daha uzak raf konumlarında depolanabilir.

Bu çalışmada ABC analizi ve ürünlerin sınıflandırılması amacıyla bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaya ait sözde kod Şekil 3.4' de gösterilmiştir. Algoritma, girdisi olarak önceden sıralanmış ürün grupları listesini (G') ve ABC sınıfları için belirlenen olasılık üçlüsünü (P_A, P_B, P_C) alır. Algoritma, ilk olarak kümülatif oranı sıfırlar. Ardından, G' listesindeki her bir ürün grubu (g) için döngüye girer. Döngü içinde, her bir ürün grubunun değerini toplam değere oranlayarak kümülatif oranı günceller. Daha sonra, bu kümülatif oranı, olasılık üçlüsünde belirlenen eşik değerlerle karşılaştırır. Eğer kümülatif oran P_A değerine eşit veya küçükse, ürün grubu A sınıfına atanır. Eğer kümülatif oran $P_A + P_B$ değerine eşit veya küçükse, ürün grubu B sınıfına atanır. Bunların dışında kalan ürün grupları ise C sınıfına atanır.

Algorithm 4: ABC Analizi – Sınıf Ataması

Girdi: Sıralı Ürün Grubları Listesi $\mathcal{G}'$, Olasılık Üçlüsü (P_A, P_B, P_C)
Çıktı: Her ürün grubuna ABC sınıfı ataması

```
kümülatif_oran ← 0;
for each ürün grubu g in G' do
    kümülatif_oran +=g.deger / Σ_{x∈G'} x.deger;
    if kümülatif_oran ≤ P_A then
        g.sinif ← A;
    else
        if kümülatif_oran ≤ P_A + P_B then
            g.sinif ← B;
        else
            g.sinif ← C;
```

Şekil 3.4. ABC analizine ait sözde kod

ABC Analizi, OD/GA sistemleri kapsamında sınıf tabanlı depo içi atama politikasının geliştirilmesi için temel bir sınıflandırma yöntemidir. Şekil 3.4' de sözde kod ile sunulan algoritma, bu analizi sistematik bir yaklaşımla detaylandırmıştır. Süreç, her bir ürünün bireysel değerinin ($Değer_i = Talep_i \times Maliyet_i$) belirlenmesiyle başlamıştır; bu değer, ürünün toplam envanter değeri içindeki katkısını göstermektedir. Akabinde, tüm ürünlerin değerleri toplanarak toplam envanter değeri ($ToplamDeğer = \sum_{i=1}^{n} Değer_i$) hesaplanmıştır.

Literatürde "A Sınıfı" ürünlerin genellikle toplam değerin yaklaşık %70-80'ini oluşturduğu kabul edilmektedir. Ürünler azalan değerlere göre sıralandıktan sonra, her bir ürün için kümülatif değer ve kümülatif yüzde ($KümülatifYüzde_i = (\frac{KümülatifDeğer_i}{ToplamDeğer}) \times 100$) hesaplanmıştır. Bu kümülatif yüzdeler doğrultusunda, "A Sınıfı" ürünler kümülatif değerin %0-80'ni, "B Sınıfı" ürünler %80-95'ini ve "C Sınıfı" ürünler %95-100'ünü kapsayacak şekilde sınıflandırılmıştır.

Bu detaylı ABC sınıflandırması, OD/GA sistemlerinde depolama alanlarının optimizasyonu için kritik bir girdi sağlamıştır. Elde edilen "A", "B" ve "C" sınıfları, depolama pozisyonlarının, en sık hareket eden ve en değerli ürünlere göre düzenlenmesine olanak tanımıştır. Örneğin, "A Sınıfı" ürünler, daha sık erişildikleri ve yüksek değere sahip oldukları için OD/GA sisteminin giriş/çıkış noktalarına daha yakın

konumlara atanırken, "C Sınıfı" ürünler giriş/çıkış noktalarına daha uzak konumlara atamıştır.

3.2.3. Deponun Şekli

Bir depo yöneticisi, OD/GA sistemlerinde sınıf-tabanlı depo içi atama politikasını uygularken şu üç önemli kararla karşı karşıya kalır:

- Sınıf sayısı belirleme
- Her bölgeye atanacak ürün sayısını belirleme
- Her bölgenin nereye yerleştirileceğini belirleme (Roodbergen ve Vis , 2009).

Yapılan birçok çalışmada, sınıf-tabanlı depo içi atama politikası uygulandığında sınıfların depo içindeki şekli ve konumu hakkında tartışılmıştır. Bortolini vd. (2015) çalışmalarında, OD/GA sistemi içindeki sınıf-tabanlı depo içi atama politikası kullandığında oluşan dikdörtgen şeklindeki sınıflar için optimizasyon konusunu ele aldılar. Özellikle depo şekli faktörünün (depolama alanının uzunluğu ile yüksekliği arasındaki oran) bu dikdörtgen sınıf bölgelerinin optimum boyutlarını ve sınırlarını nasıl etkilediğini araştırdılar. OD/GA robotunun seyahat süresini en aza indirmek amacıyla, dikdörtgen sınıf şekillerinin en uygun düzenlemesini belirlemeyi hedeflenmişlerdir. Hausman vd. (1976), OD/GA sisteminin şekil faktörünün seyahat süresi üzerindeki etkisini, robotun yatay ve dikey hareket hızları arasındaki ilişkiyi modelleyerek incelemişlerdir. Bu yaklaşım, farklı konfigürasyonlar için beklenen seyahat süresini minimize eden optimum depolama atamalarının belirlenmesine imkân tanımış; böylece, depolama alanının orantısal yapısının geri alma görevlerini nasıl etkilediği temel olarak ortaya konulmuştur. Bahrami vd. (2017), OD/GA sisteminin fiziksel tasarımının, farklı raf konfigürasyonları aracılığıyla seyahat süresi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Her sınıfın geometrik biçimi ve kapladığı alan göz önüne alındığında, sınıf-tabanlı depo içi atama politikası düzenlerinin çeşitli konfigürasyonlarda olabileceğini vurgulamışlardır.

Bu tez çalışması kapsamında, sınıf-tabanlı depo içi atama politikalarının performansını değerlendirmek amacıyla, depo ve sınıf şekillerini belirli konfigürasyonlara göre

kurgulanmıştır. Bu kapsamda, aşağıda açıklanan üç farklı depo şekli stratejisi oluşturulmuştur:

- **L-Şekilli Depolama Yerleşimi:** L-Şekilli Depolama Yerleşimi algoritması, OD/GA sistemleri içerisindeki depolama alanlarının, farklı ürün sınıflarına özgü ihtiyaçları karşılayacak şekilde, "L" harfine benzeyen bir örüntü oluşturarak atanmasını hedefleyen bir stratejidir. Bu yaklaşım, özellikle depo içinde belirli bölgelerin (genellikle en çok erişilen bölgeler) daha yoğun kullanılması gerektiğinde veya ürün akışına, sipariş toplama rotalarına ve robotun hareketlerine göre esnek bir yerleşim düzeni oluşturulması arzu edildiğinde önemli avantajlar sağlar. Bu yapı, depo içerisindeki OD/GA robotunun seyahat süresini azaltmaya yönelik bir optimizasyon sunar.
  Bu algoritmanın işleyişi, öncelikle depolama alanının temel fiziksel boyutlarının belirlenmesiyle başlar. Deponun genişliği ve yüksekliği gibi yataydaki boyut ile dikeydeki boyut bilgisi, toplam kullanılabilir depolama kapasitesinin çerçevesini çizer. Bu boyutlar, depolama optimizasyonu için temel parametreleri oluşturur. Ayrıca, oluşturulacak L-şekilli bölgelerin ideal en-boy oranını belirlemede kullanılan bir hedef oran tanımlanır. Bu oran, L-şekilli alanların ne kadar uzantılı veya kompakt olacağını tayin eder ve depo alanının mümkün olan en verimli şekilde kullanılmasını maksimize etmeye yardımcı olur. Bu adım, depolama stratejisinin geometrik temelini ve gelecekteki yerleşim düzeninin karakteristik özelliklerini oluşturur.

  Bir sonraki aşama, ürün sınıflandırma (bu çalışmada ABC analizi) sonucunda elde edilen her bir ürün sınıfı için, toplam depolama alanından ne kadar bir pay almaları gerektiğinin hesaplanmasıdır. Bu, her sınıfın depoda doldurması gereken toplam raf veya depolama birimi sayısını gösteren birikimli raf sayısı değerini ortaya koyar. Bu birikimli değer, en yüksek öncelikli sınıftan başlayarak, her bir sınıfın kendinden önceki sınıflarla birlikte toplamda ne kadar alana ihtiyaç duyduğunu gösterir. Örneğin, A sınıfı depolama kapasitesinin belirli bir yüzdesini alıyorsa, B sınıfının birikimli raf sayısı, A sınıfının payına kendi payını da

ekleyerek hesaplanır. Bu kümülatif yaklaşım, depolama alanının sınıflar arasında kesintisiz ve orantılı bir şekilde dağıtılmasını sağlar.

Algoritmanın merkezinde, her bir ürün sınıfı için, belirlenen birikimli raf sayısını karşılayacak şekilde ideal genişlik ve yükseklik boyutlarının dinamik olarak belirlenmesi yer alır. Bu süreç, bir sınıfın ihtiyaç duyduğu toplam raf sayısına ulaşana kadar, L-şekilli bölgenin genişlik veya yükseklik boyutlarının iteratif olarak artırılmasını içerir. Bu artırma işlemi sırasında, bölgenin en-boy oranının önceden belirlenen hedef orana olabildiğince yakın tutulması esastır. Bu dinamik boyutlandırma, her bir sınıfa, ihtiyaç duyduğu alanın yanı sıra, deponun genel yapısına ve hedeflenen akış düzenine uygun bir L-şekilli bölge tahsis edilmesini sağlar. Bu adım, depo alanının fiziksel olarak nasıl bölümleneceğinin matematiksel modellemesidir ve her sınıfın depoda kendine özgü bir yerleşim alanına sahip olmasını sağlar.

Son olarak, algoritma, deponun tüm fiziksel depolama konumlarını (koridor, raf, x, y, z koordinatları bazında) sistematik olarak tarar. Her bir taranan konum için, eğer konum henüz boşsa ve mevcut taranan ürün sınıfının dinamik olarak belirlenen L-şekilli bölge sınırları içerisindeyse, o konuma ilgili ürün sınıfı atanır. Bu atama, o konumun artık dolu olduğunu ve belirli bir sınıfa ait olduğunu işaret eder. Bir konuma atama yapıldığında, bu konuma başka bir sınıfın atanmasını engellemek ve işlem süresini optimize etmek amacıyla mevcut konum döngüsünden çıkılır ve bir sonraki boş konuma geçilir. Bu detaylı atama mekanizması, L-Şekilli yerleşimin, depolama alanını ürün sınıflarına göre en uygun şekilde bölümlendirmesini ve böylece depolama verimliliğini, sipariş toplama sürelerini ve genel operasyonel akıcılığı artırmasını sağlar.

- **Yatay Dikdörtgen Depolama Yerleşimi:** Yatay Dikdörtgen Depolama Yerleşimi algoritması, OD/GA sistemlerinde ürün sınıflarına göre alan atamasını, depolama alanını yatay eksende genişleyen dikdörtgen bölgelere ayırarak gerçekleştiren stratejik bir yaklaşımdır. Bu yöntem, özellikle uzun ve yatay koridor yapılarına sahip depolarda veya ürünlerin genellikle geniş bir alana

yayılması gereken, nispeten düşük yükseklik ve yüksek genişlik oranına sahip depolama düzenlerinde etkin bir çözüm sunar. Bu algoritma, belirli ürün sınıflarının bir veya birden fazla yatay şeridi boyunca ardışık olarak yerleştirilmesini sağlayarak, ilgili ürünlere erişim süresini optimize etmeyi ve OD/GA robotunun yatay hareketlerini maksimize etmeyi amaçlar. Bu düzenleme, sipariş toplama operasyonlarında daha lineer bir akış sağlayarak, robotun gereksiz dikey hareketlerini azaltmaya ve toplam mesafe katetme süresini düşürmeye yardımcı olabilir. Geniş ve alçak depolarda, bu model, malzeme taşıma ekipmanlarının daha az dönüş yaparak uzun mesafelerde kesintisiz hareket etmesini teşvik eder.

Algoritmanın işleyişi, öncelikle ABC analizi sonucunda elde edilen her bir ürün sınıfı için, toplam depolama alanından ne kadar bir pay almaları gerektiğinin hesaplanmasıyla başlar. Bu, her sınıfın depoda doldurması gereken toplam raf veya depolama birimi sayısını gösteren birikimli raf sayısı değerini ortaya koyar. Bu birikimli değer, en yüksek öncelikli sınıftan başlayarak, her bir sınıfın kendinden önceki sınıflarla birlikte toplamda ne kadar alana ihtiyaç duyduğunu gösterir. Deponun toplam genişliği, yüksekliği ve derinliği gibi fiziksel boyutları, bu birikimli raf sayısının hesaplanmasında temel girdileri oluşturur. Bu adım, depolama alanının sınıflar arasında orantılı bir şekilde dağıtılmasının temelini oluşturur ve her sınıfın depolama ihtiyacını sayısal olarak belirler, böylece daha sonra yapılacak fiziksel atamalar için sağlam bir zemin hazırlar.

Bu algoritmanın temel farklılığı, her bir sınıf için ayrılacak dikdörtgen bölgenin genişliğinin, deponun toplam genişliğine sabitlenmesidir. Yani, her ürün sınıfı için ayrılan depolama bölgesi, depo boyunca yatay olarak tam genişliği kaplayacaktır. Bu sabitleme, atanacak alanın yatay yönde tam depo genişliğini kullanacağını garanti eder ve bu da yatay akışın sürekliliğini destekler. Buna karşılık, dikdörtgenin yüksekliği (veya y eksenindeki boyutu), her bir sınıfın ihtiyaç duyduğu toplam raf sayısını karşılamak üzere dinamik olarak belirlenir. Bu belirleme süreci, oluşturulan dikdörtgen alanın toplam kapasitesi belirlenen birikimli raf sayısına eşit veya bu değerden büyük olana kadar yüksekliğin iteratif

olarak artırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu iteratif yaklaşım, her bir sınıfa, depo genişliği boyunca yatay olarak uzanan ve ihtiyaç duyduğu raf miktarını barındıracak yeterli yüksekliğe sahip bir dikdörtgen alan tahsis edilmesini sağlar. Bu sayede, depo içi malzeme akışı ve ürün erişimi, yatay yerleşim prensiplerine uygun olarak optimize edilebilir ve sık kullanılan ürünlerin daha kolay erişilebilir yatay şeritlerde konumlanması sağlanır.

Son aşamada, algoritma deponun tüm fiziksel depolama konumlarını (koridor, raf, x, y, z koordinatları bazında) sistematik olarak tarar. Her bir taranan konum için, eğer konum henüz boşsa ve mevcut taranan ürün sınıfının dinamik olarak belirlenen yatay dikdörtgen bölge sınırları içerisindeyse, o konuma ilgili ürün sınıfı atanır. Bu atama, o konumun artık dolu olduğunu ve belirli bir sınıfa ait olduğunu işaret eder. Bir konuma atama yapıldığında, bu konuma başka bir sınıfın atanmasını önlemek ve işlem süresini optimize etmek amacıyla mevcut konum döngüsünden çıkılır ve bir sonraki boş konuma geçilir. Bu metodoloji, Yatay Dikdörtgen Depolama Yerleşiminin, özellikle geniş alanların etkin kullanımı, yatay malzeme akışının optimize edilmesi ve sipariş toplama rotalarının basitleştirilmesi gereken senaryolarda tercih edilen güçlü bir strateji olmasını sağlar.

- **Dikey Dikdörtgen Depolama Yerleşimi:** Dikey Dikdörtgen Depolama Yerleşimi algoritması, OD/GA sistemlerinde depo alanını ürün sınıflarına göre dikey eksende genişleyen dikdörtgen bölgeler halinde tahsis etmeyi amaçlayan stratejik bir yaklaşımdır. Yatay Dikdörtgen Yerleşiminin aksine, bu strateji, dikey alanın etkin kullanımının kritik olduğu yüksek tavanlı depolarda veya dikey yönde genişleme potansiyeli olan sistemlerde büyük avantajlar sunar. Bu algoritma, özellikle yoğun depolama gereksinimi olan ve dikey alandan en iyi şekilde yararlanmayı hedefleyen işletmeler için idealdir. Dikey uzanan dikdörtgen bölgeler oluşturmak, depolardaki dikey alanı maksimize ederek, sınırlı taban alanına sahip işletmelerin depolama kapasitelerini artırmalarına olanak tanır. Ayrıca, bu düzenleme, OD/GA robotlarının dikey hareketlerini optimize ederek, dar koridorlu ve yüksek raflı depolarda verimliliği artırmaya yardımcı olabilir.

Algoritmanın başlangıcı, diğer yerleşim algoritmalarında olduğu gibi, her bir ürün sınıfı için, toplam depolama alanından ne kadar bir pay almaları gerektiğinin hesaplanmasıyla başlar. Bu, her sınıfın depoda doldurması gereken toplam raf veya depolama birimi sayısını gösteren birikimli raf sayısı değerini ortaya koyar. Bu birikimli değer, en yüksek öncelikli sınıftan başlayarak, her bir sınıfın kendinden önceki sınıflarla birlikte toplamda ne kadar alana ihtiyaç duyduğunu gösterir. Deponun toplam genişliği, yüksekliği ve derinliği gibi fiziksel boyutları, bu birikimli raf sayısının hesaplanmasında temel girdileri oluşturur. Bu adım, depolama alanının sınıflar arasında orantılı bir şekilde dağıtılmasının temelini oluşturur ve her sınıfın depolama ihtiyacını sayısal olarak belirler, böylece daha sonra yapılacak fiziksel atamalar için sağlam bir zemin hazırlar.
Bu algoritmayı Yatay Dikdörtgen Yerleşiminden ayıran temel özellik, her bir sınıf için ayrılacak dikdörtgen bölgenin yüksekliğinin, deponun toplam yüksekliğine sabitlenmesidir. Yani, her ürün sınıfı için ayrılan depolama bölgesi, deponun tabanından tavanına kadar dikey olarak tam yüksekliği kapsayacaktır. Bu sabitleme, atanacak alanın dikey yönde tam depo yüksekliğini kullanacağını garanti eder ve bu da dikey akışın sürekliliğini destekler. Buna karşılık, dikdörtgenin genişliği (veya x eksenindeki boyutu), her bir sınıfın ihtiyaç duyduğu toplam raf sayısını karşılamak üzere dinamik olarak belirlenir. Bu belirleme süreci, oluşturulan dikdörtgen alanın toplam kapasitesi belirlenen birikimli raf sayısına eşit veya bu değerden büyük olana kadar genişliğin (x boyutu) iteratif olarak artırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu iteratif yaklaşım, her bir sınıfa, depo yüksekliği boyunca dikey olarak uzanan ve ihtiyaç duyduğu raf miktarını barındıracak yeterli genişliğe sahip bir dikdörtgen alan atanmasını sağlar. Bu sayede, depo içi malzeme akışı ve ürün erişimi, dikey yerleşim prensiplerine uygun olarak optimize edilebilir ve sık kullanılan ürünlerin daha kolay erişilebilir dikey bloklarda konumlanması sağlanır.

Son aşamada, algoritma deponun tüm fiziksel depolama konumlarını (koridor, raf, x, y, z koordinatları bazında) sistematik olarak tarar. Her bir taranan konum için, eğer konum henüz boşsa ve mevcut taranan ürün sınıfının dinamik olarak belirlenen dikey dikdörtgen bölge sınırları içerisindeyse, o konuma ilgili ürün

sınıfı atanır. Bu atama, o konumun artık dolu olduğunu ve belirli bir sınıfa ait olduğunu işaret eder. Bir konuma atama yapıldığında, bu konuma başka bir sınıfın atanmasını önlemek ve işlem süresini optimize etmek amacıyla mevcut konum döngüsünden çıkılır ve bir sonraki boş konuma geçilir. Bu metodoloji, Dikey Dikdörtgen Depolama Yerleşiminin, özellikle yüksek tavanlı depoların potansiyelini maksimize etme, dikey malzeme akışını optimize etme ve depolama yoğunluğunu artırma senaryolarında tercih edilen etkili bir strateji olmasını sağlar.

3.2.4. Sezgisel Sıralama Algoritmaları

Bu bölümde, OD/GA sistemlerinde robotun seyahat süresini minimize etmek amacıyla kullanılan çeşitli sezgisel sıralama algoritmaları açıklanmıştır. OD/GA sistemlerinde siparişlerin sıralanması, operasyonel maliyetleri düşürmenin ve sistemin genel verimliliğini artırmanın temel noktasıdır. Özellikle sipariş toplama ve yerleştirme süreçlerinde robotun kateteceği mesafenin minimize edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu bağlamda, robotun görevlerini yerine getirirken en kısa yolu bulmasını sağlayacak sezgisel algoritmalar uygulanmış ve bu tez çalışmasının temel materyallerinden biri olarak kullanılmıştır. Kullanılan bu algoritmalar, geleneksel optimizasyon yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve esnek çözümler sunarak dinamik depo ortamlarındaki değişimlere uyum sağlayabilme yeteneğine sahiptir. Algoritmaların temel amacı, birden fazla depolama ve geri alma görevi olduğunda, robotun bu görevleri en uygun sırayla tamamlamasını sağlayarak toplam seyahat süresini minimuma indirmektir.

Popovic vd. (2014) ‘in çalışmasında ele alınan en yakın komşuluk sezgisel algoritması bu tez çalışmasına uyarlanmıştır. Ayrıca literatürde çokça karşılaşılan FIFO (İlk Giren İlk Çıkar) ve LIFO (Son Giren İlk Çıkar) bu tez çalışması kapsamında incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında oluşturulan en yakın komşuluk algoritması, robotun toplam seyahat mesafesini en aza indirerek operasyonel verimliliği artırmayı amaçlamaktadır. Algoritma, robotun başlangıç noktası olan Giriş/Çıkış noktasından başlayarak tüm depolama ve geri

alma görevlerini döngüsel bir biçimde işler. Her sıralama döngüsü bir depolama göreviyle başlar ve robot, mevcut konumuna en yakın depolama görevini seçer. Ardışık görevlerde, her depolama görevinden sonra bir geri alma görevi gelmesi tercih edilir ve robot, depolama sonrası mevcut konumuna en yakın geri alma görevini seçer. Eğer sistemde geri alma görevi yoksa, robot ardışık depolama görevlerine devam eder. Benzer şekilde, bir geri alma görevinden sonra bir depolama görevi gelmelidir; ancak sistemde depolama görevi yoksa robot ardışık geri alma görevlerini sürdürür. Her görev tamamlandığında, robotun konumu güncellenir ve kat edilen mesafe toplam mesafeye eklenir. Robotun mevcut konumu ile görevlerin konumları arasındaki mesafe, Öklid metriği kullanılarak hesaplanır.

En yakın komşuluk algoritmasına ait sözde kod Şekil 3.5' te gösterilmiştir. Algoritma, depolama konumları (S_d), geri alma konumları (S_g), ve başlangıç pozisyonunu (p_0), girdi olarak alır. Algoritma hem depolama hem de geri alma konumları listesi boş olana kadar sürekli olarak döngüye devam eder. Algoritmanın temel işleyişi, her adımda sırayla bir depolama ve bir geri alma konumunu ziyaret etmektir. Önce mevcut pozisyona en yakın depolama konumunu bulur, rotaya ekler ve toplam mesafeyi günceller. Hemen ardından, eğer geri alma konumları listesi boş değilse, bu kez mevcut pozisyona en yakın geri alma konumunu bulur, rotaya ekler ve toplam mesafeyi günceller. Bu çift aşamalı işlem, tüm depolama ve geri alma noktaları ziyaret edilene kadar tekrarlanır. Algoritmanın çıktısı, tüm siparişlerinin sıralanması için en verimli kabul edilen rotayı ve bu rotanın toplam mesafesini içerir.

Algorithm 5: En Yakın Komşuluk Algoritması

Girdi: Depolama Konumları S_d, Geri Alma Konumları S_g, Başlangıç Pozisyonu p_0

Çıktı: Sipariş Sırası O, Toplam Mesafe D

```
D ← 0,   O ← [],   p ← p0;
while Sd ≠ ∅ veya Sg ≠ ∅ do
    if Sd = ∅ then
        q ← EnYakin(p, Sg);
        D += Dist(p, q);
        O.append(q); Sg.remove(q); p ← q;
    else
        q ← EnYakin(p, Sd);
        D += Dist(p, q);
        O.append(q); Sd.remove(q); p ← q;
        if Sg ≠ ∅ then
            q ← EnYakin(p, Sg);
            D += Dist(p, q);
            O.append(q); Sg.remove(q); p ← q;
Return (O, D);
```

Şekil 3.5. En yakın komşuluk algoritmasına ait sözde kod

4. BULGULAR

Çalışmanın bu bölümünde, tezin ana bulguları detaylandırılmıştır. Çalışma kapsamında, 16x10 boyutlarında, tek koridorlu ve koridorun her iki yanında raflar bulunan bir depo modeli ele alınmıştır. Bu kısımda değerlendirilen örnek depoya ait parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Depo içi atama görevlerini sıralamak için sezgisel algoritmalar ve ürünleri sınıflara ayıran ABC analizi kullanılmıştır. Ayrıca, sınıf tabanlı depolama için üç farklı depo şekli detaylandırılmıştır. Matematiksel modelleme kapsamında robotun seyahat süresinin ortalama ve varyansını hesaplayan analitik bir yöntem ile bulgular desteklenmiştir.

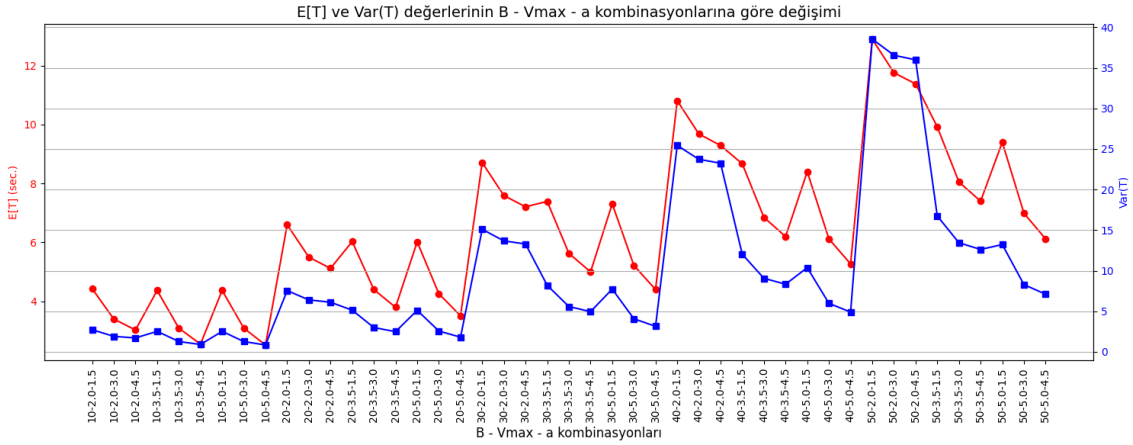
Çizelge 4.1. Örnek deponun fiziksel yapısına ait parametreler

Parametre	Örnek Depo için Değerler
N_a	1
N_s	2
N_x	16
N_y	10
N_z	1
N_i	15
N_c	3

4.1. Matematiksel Model

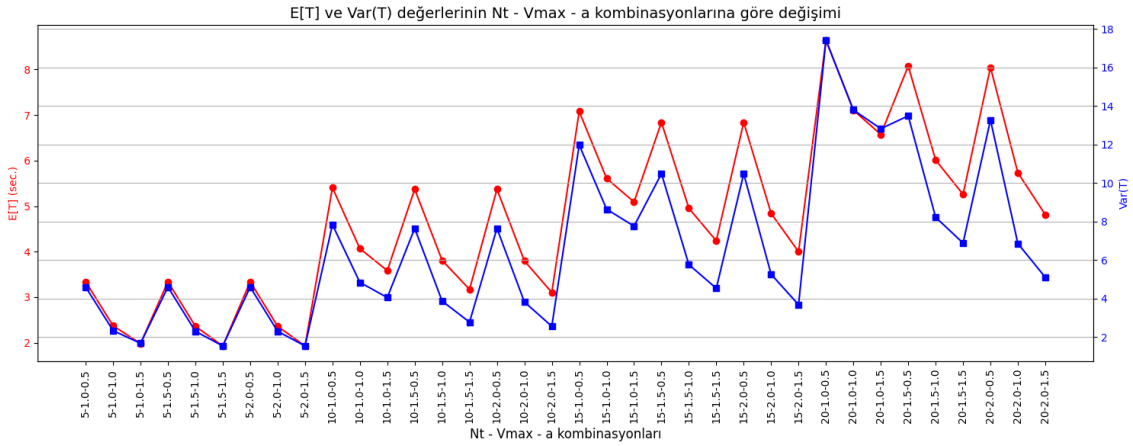
Çalışmanın bu kısmında, sunulan analitik modelin farklı senaryolardaki performansını değerlendirmek amacıyla yapılan analiz sonuçları paylaşılmıştır. Analizlerde, özellikle OD/GA sistemlerinde robotun seyahat süresi temel alınarak modelin çeşitli koşullar altındaki performansı incelenmiştir.

Analitik olarak yapılan bu değerlendirmelerde, sonuçlar yatay mekik hareketi için ziyaret edilecek konum sayısına, robotun maksimum hızına ve farklı ivme değerlerine göre gruplandırılmıştır. Bu kapsamda 5 farklı ziyaret edilecek konum sayısı, 3 farklı maksimum hız ve 3 farklı ivme değeri ele alınmış ve her bir senaryo için robotun ortalama seyahat süresi ile seyahat süresi varyansı hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Dikey kaldırma hareketi için 4 farklı kat sayısı, 3 farklı maksimum hız ve 3 farklı ivme değeri değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı senaryolar altında yatay mekik hareketi için seyahat süresi ve varyansına ait çıktıların grafiği

Çıktılar incelendiğinde, B parametresi ile temsil edilen depodaki konum sayısındaki artışın, hem E[T] hem de Var(T) üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Düşük Vmax (m/s) ve düşük a (m/s^2) değerlerinde, konum sayısının artışıyla birlikte E[T] ve Var(T) değerlerinde belirgin yükselişler gözlenmiş, bu durum işlem sürelerinin uzamasına ve sistemdeki kararlılığın azalmasına yol açmıştır. Buna karşılık, daha yüksek Vmax (m/s) ve a (m/s^2) kombinasyonları, konum sayısı artsa dahi E[T] ve Var(T) değerlerini düşürerek sistemin daha hızlı ve istikrarlı çalışmasına katkı sağlamıştır. Ancak yüksek konum sayılarında (B = 40 ve 50) düşük hız–ivme koşullarında ortaya çıkan ani performans kayıpları, parametre eşiklerinin kritik önemde olduğunu ve depo operasyonlarında hız, ivme ve konum sayısının bütüncül biçimde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, sistem verimliliğinin yalnızca tekil parametrelerin iyileştirilmesiyle değil, parametreler arası etkileşimin dikkate alındığı dengeli bir tasarım yaklaşımıyla sürdürülebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.2. Farklı senaryolar altında dikey mekik hareketi için seyahat süresi ve varyansına ait çıktıların grafiği

Çıktılar değerlendirildiğinde, Nt parametresi ile ifade edilen depodaki kat sayısının artışının, hem E[T] hem de Var(T) üzerinde anlamlı ve doğrudan bir etkisi olduğu görülmektedir. Düşük Vmax (m/s) ve düşük a (m/s^2) koşullarında kat sayısındaki artış, E[T] ve Var(T) değerlerinde keskin yükselişlere yol açarak sistemin hem işlem hızını düşürmekte hem de performans kararlılığını olumsuz etkilemektedir. Buna karşılık, daha yüksek hız ve ivme kombinasyonlarının uygulanması, kat sayısı artsa dahi E[T] ve Var(T) değerlerini belirgin biçimde azaltarak operasyonel verimliliği artırmaktadır. Özellikle Nt = 20 senaryosunda düşük hız–ivme koşullarında gözlenen yüksek E[T] ve Var(T) değerleri, depo tasarımında ve operasyon planlamasında kat sayısı ile hız–ivme parametrelerinin birlikte optimize edilmesinin kritik önemini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, sistem performansının yalnızca kapasite artırımı ile değil, parametreler arası etkileşimlerin dengeli bir şekilde yönetilmesiyle sürdürülebileceğini göstermektedir.

Her iki hareket için de sistemdeki ziyaret edilecek konum ve kat sayısı arttıkça, seyahat süresine ait ortalama ve varyansın önemli ölçüde yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, ziyaret edilecek konum ve kat sayısının artmasıyla sistemdeki olası durum sayısının ve buna bağlı olarak belirsizliğin de arttığını ve dolayısıyla seyahat süresi varyansının daha hızlı bir şekilde yükseldiğini göstermektedir.

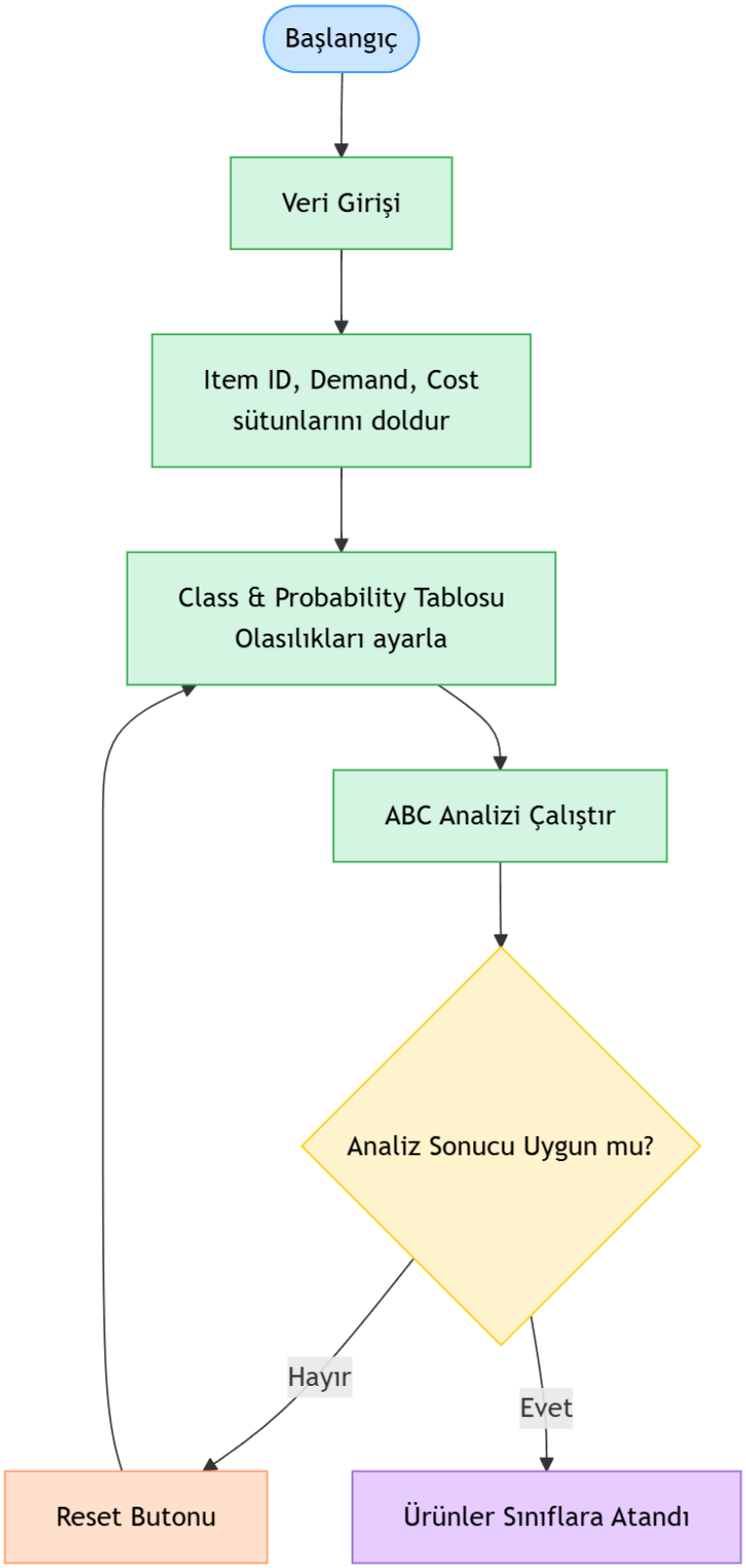
Bu analiz sonucuna göre, sistemin kapasitesine uygun bir planlama yapılmasının önemli olduğu ve konum sayısı ve kat sayısı arttıkça rota optimizasyonunun daha kritik hâle geldiği şeklinde bir yorum yapılabilir.

4.2. OD/GA Sistemlerinde Depo Yönetimi

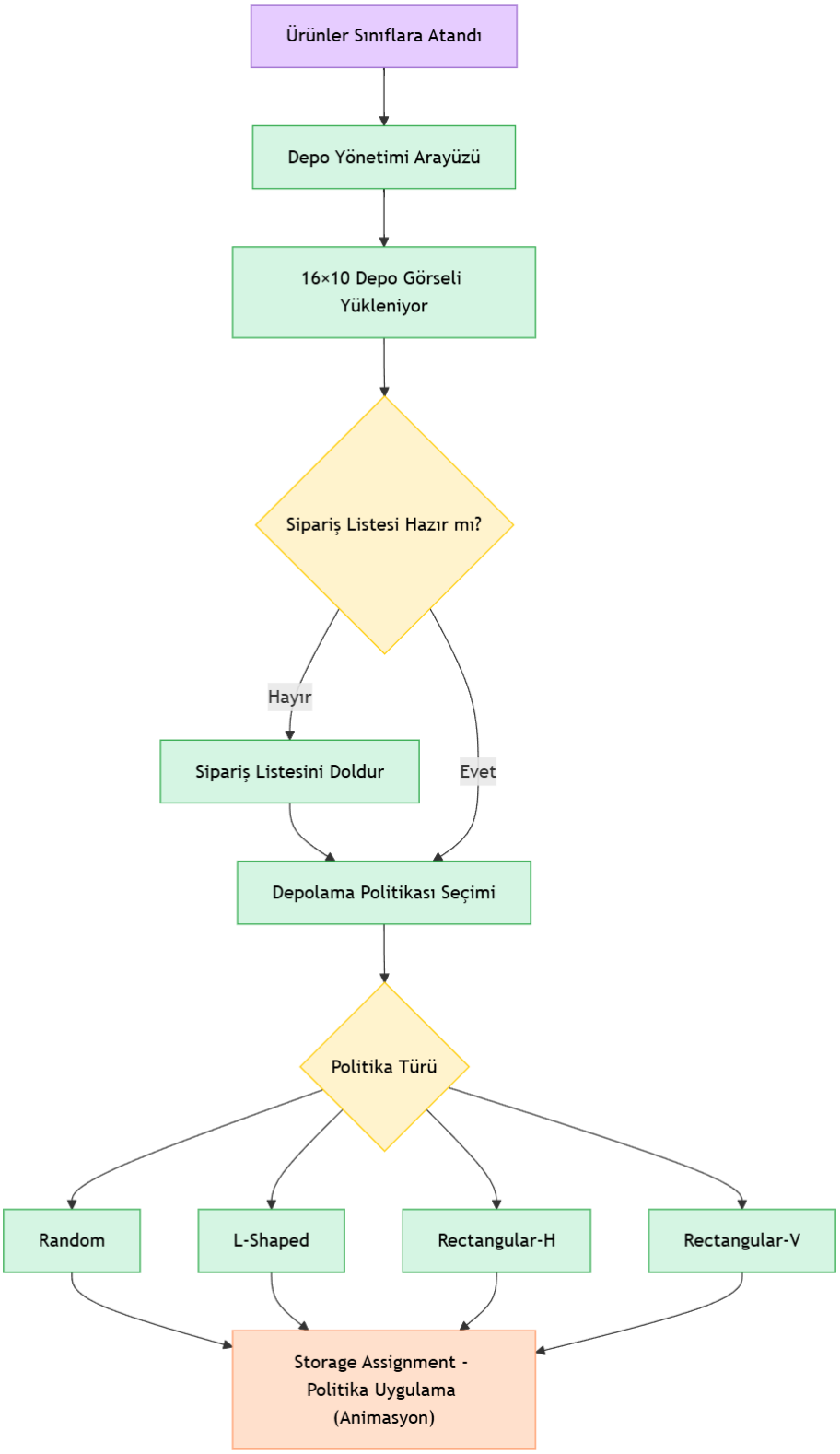
Bu tez çalışması, OD/GA sistemleri için bir depo yönetim sistemi oluşturmayı hedeflemiştir. Bu amaçla, Excel VBA (Visual Basic for Applications) tabanlı bir uygulama kurgulanmıştır. Sistem, dört ana başlık altında işleyen modüllerden oluşmaktadır:

- Depo İçi Atama: Depo yerleşim düzenini belirlemek için farklı atama politikaları uygulanmıştır.
- ABC Analizi: Ürünler, önem derecelerine göre ABC sınıflarına ayrılmıştır.
- Deponun Şekli: Deponun geometrik yapısı ve alan kullanımı incelenmiştir.
- Sezgisel Sıralama Algoritmaları: Robotun seyahat süresini en aza indirmek için algoritmalar geliştirilmiştir.

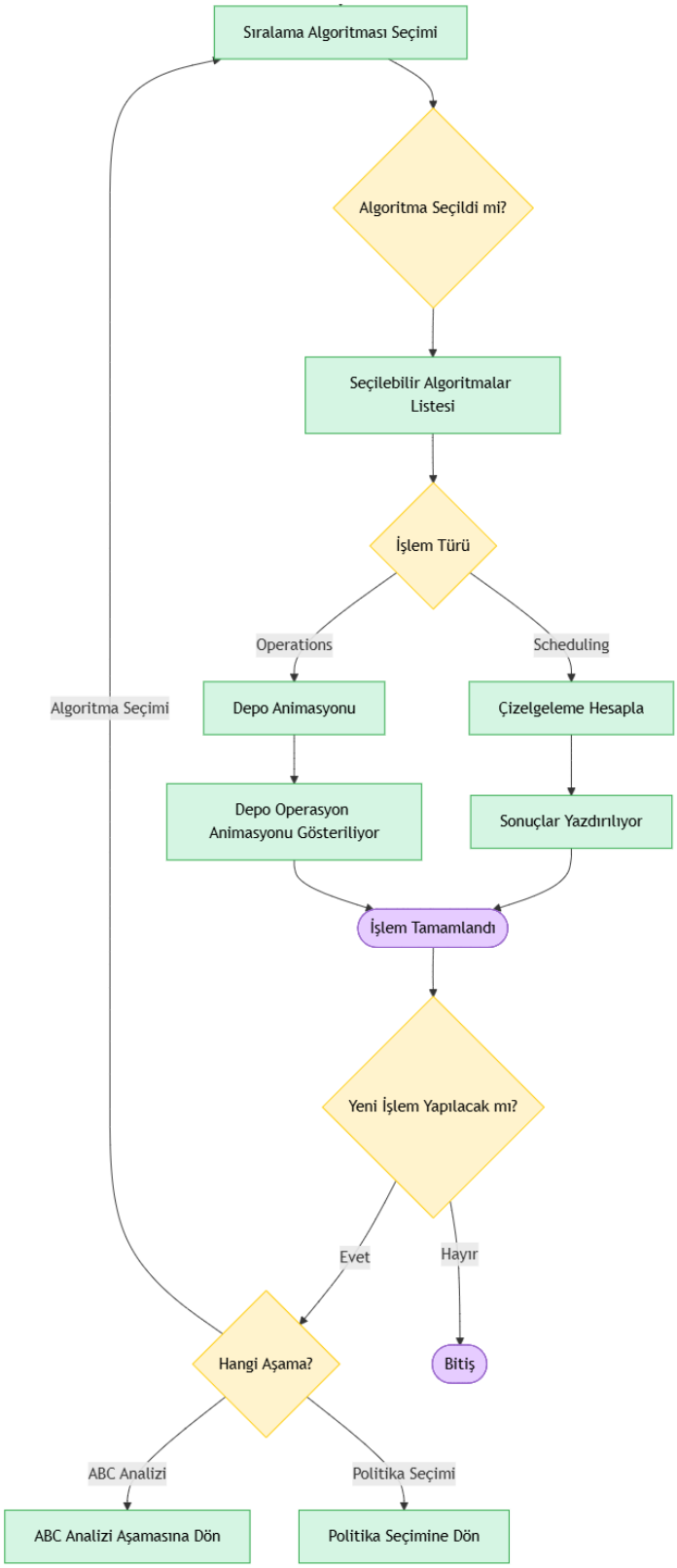
Oluşturulan bu depo yönetim sisteminin işleyişi, kullanıcıların veri girişinden nihai çıktılara kadar hangi adımları takip etmesi gerektiğini gösteren bir akış diyagramı ile açıklanmıştır. Bu diyagram, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te detaylı olarak gösterilmiştir. Sistem, belirtilen bu dört ana başlığı bütünleşmiş bir şekilde ele alarak, depo yönetim süreçlerini simüle etmeye ve operasyonel verimliliği artırmaya yönelik pratik bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 4.3. Depo yönetim sistemi akış diyagramı (ABC analizi)



Şekil 4.4. Depo yönetim sistemi akış diyagramı (depo içi atama)



Şekil 4.5. Depo yönetim sistemi akış diyagramı (sıralama algoritmaları)

4.2.1. Depo İçi Atama

Çalışmanın bu bölümünde, depo içi atama politikalarının uygulanması sonucu elde edilen depo yerleşim düzenine ait görseller sunulmuştur. Excel üzerinde geliştirilen VBA kodları ile oluşturulan algoritmalar, farklı depolama politikalarının depo düzenine etkilerini gösterebilecek şekilde kurgulanmıştır. Bu yapı sayesinde, temel düzeyde işleyen bir depo yönetim simülatörü oluşturulmuş ve farklı depo içi atama politikalarının sonuçları görsel olarak izlenebilir hale getirilmiştir.

Bu bölümde özellikle rassal depo içi atama politikası ve sınıf-tabanlı depo içi atama politikasının uygulanması sonucunda oluşan yerleşim düzenleri ilgili görsellerle ortaya konulmuştur. Örneğin, rassal depo içi atama politikasında ürünler boş alanlara rastgele yerleştirilmekte, bu da Şekil 4.6'da görüldüğü gibi düzensiz ama alan açısından esnek bir yapı ortaya koymaktadır. Buna karşılık, sınıf-tabanlı depo içi atama politikasında ürünler belirli özelliklerine göre sınıflandırılarak önceden belirlenmiş bölgelere yerleştirilmektedir. Şekil 4.7'de sunulan bu yapı, benzer ürünlerin bir arada konumlanması sayesinde, sipariş toplama sürecinde düzen ve hız kazandırmayı hedeflemektedir.

Y+																
10	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
9	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
8	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
7	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
6	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
1	(1, 3)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
I-O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	X+
1	(1, 11)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
6	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
7	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
8	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
9	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
10	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
Y+																

Şekil 4.6. Rassal depo içi atama politikasına ait simülasyon çıktısı

Y+																	
10	(3, 3)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
9	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
8	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
7	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
6	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
1	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
I-O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	X+
1	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
6	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
7	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
8	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
9	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
10	(3, 11)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
Y+																	

Şekil 4.7. Sınıf-tabanlı depo içi atama politikasına ait simülasyon çıktısı

Görsel çıktılar yalnızca yerleşim düzenini göstermekle kalmamış, aynı zamanda geliştirilen simülatörün depo operasyonları üzerindeki etkiyi takip edebilecek seviyede çalıştığını da ortaya koymuştur. Böylece kullanıcılar, farklı atama politikalarının sonuçlarını hem görsel olarak değerlendirebilmekte hem de bu çıktılar üzerinden karşılaştırma yapabilmektedir. Bu yapı, karar alma sürecinde yöneticilere destek sağlayabilecek pratik ve işlevsel bir araç niteliğindedir.

4.2.2 ABC Analizi

Çalışmanın bu bölümünde, sınıf-tabanlı depo içi atama politikası kapsamında, ürünlerin sınıflandırılması amacıyla ABC analizi yöntemi kullanılmıştır. Ancak geleneksel A, B, C sınıf isimlendirmeleri yerine, bu sınıflar 1. Sınıf, 2. Sınıf ve 3. Sınıf olarak yeniden adlandırılmıştır. Bu sınıflandırma, geliştirilen VBA kodları aracılığıyla çalışan bir algoritma ile otomatik olarak oluşturulmuştur. Kod yapısı sayesinde, sınıfların sayısı ve yüzdelik dağılımları kullanıcı tarafından kolaylıkla değiştirilebilmektedir.

Bu kapsamda oluşturulan simülatörde, kullanıcı belirli bir sınıf sayısı ve her sınıfa ait yüzdelik oranları girerek, ürünlerin sınıflandırılmasını ve depo yerleşim düzenini anlık olarak görebilmektedir. Aşağıda, farklı sınıf dağılımlarına ait örnek çıktı görselleri yer almaktadır.

Item Id	Demand	Cost	Value	Percentage	Cumulative Perc.	Class
4	85	65	5525	14,59%	14,59%	1
2	58	95	5510	14,55%	29,14%	1
13	59	85	5015	13,24%	42,39%	1
5	91	55	5005	13,22%	55,61%	2
7	48	75	3600	9,51%	65,11%	2
15	55	60	3300	8,72%	73,83%	2
1	60	45	2700	7,13%	80,96%	3
3	61	40	2440	6,44%	87,40%	3
9	59	35	2065	5,45%	92,86%	3
11	23	70	1610	4,25%	97,11%	3
12	11	35	385	1,02%	98,12%	3
6	16	20	320	0,85%	98,97%	3
10	17	15	255	0,67%	99,64%	3
14	3	45	135	0,36%	100,00%	3
8	0	65	0	0,00%	100,00%	3

ABC | Reset

Class	Probability(%)
1	50%
2	30%
3	20%

Şekil 4.8. Üç sınıflı yapı – %50 (1. Sınıf), %30 (2. Sınıf), %20 (3. Sınıf) dağılımında elde edilen sınıflandırma

Item Id	Demand	Cost	Value	Percentage	Cumulative Perc.	Class
4	85	65	5525	14,59%	14,59%	1
2	58	95	5510	14,55%	29,14%	1
13	59	85	5015	13,24%	42,39%	1
5	91	55	5005	13,22%	55,61%	1
7	48	75	3600	9,51%	65,11%	1
15	55	60	3300	8,72%	73,83%	1
1	60	45	2700	7,13%	80,96%	2
3	61	40	2440	6,44%	87,40%	2
9	59	35	2065	5,45%	92,86%	2
11	23	70	1610	4,25%	97,11%	3
12	11	35	385	1,02%	98,12%	3
6	16	20	320	0,85%	98,97%	3
10	17	15	255	0,67%	99,64%	3
14	3	45	135	0,36%	100,00%	3
8	0	65	0	0,00%	100,00%	3

ABC | Reset

Class	Probability(%)
1	80%
2	15%
3	5%

Şekil 4.9. Üç sınıflı yapı – %80 (1. Sınıf), %15 (2. Sınıf), %5 (3. Sınıf) dağılımında elde edilen sınıflandırma

Item Id	Demand	Cost	Value	Percentage	Cumulative Perc.	Class
4	85	65	5525	14,59%	14,59%	1
2	58	95	5510	14,55%	29,14%	1
13	59	85	5015	13,24%	42,39%	1
5	91	55	5005	13,22%	55,61%	2
7	48	75	3600	9,51%	65,11%	2
15	55	60	3300	8,72%	73,83%	3
1	60	45	2700	7,13%	80,96%	3
3	61	40	2440	6,44%	87,40%	4
9	59	35	2065	5,45%	92,86%	4
11	23	70	1610	4,25%	97,11%	5
12	11	35	385	1,02%	98,12%	5
6	16	20	320	0,85%	98,97%	5
10	17	15	255	0,67%	99,64%	5
14	3	45	135	0,36%	100,00%	5
8	0	65	0	0,00%	100,00%	5

ABC | Reset

Class	Probability(%)
1	50%
2	20%
3	15%
4	10%
5	5%

Şekil 4.10. Beş sınıflı yapı – kullanıcı tanımlı yüzdeliklerle oluşturulan sınıf dağılımı

Bu bölümde sunulan görsel çıktılar, yalnızca sınıflandırmanın algoritmik olarak nasıl yapıldığını değil; aynı zamanda bu sınıflandırmanın depo düzeni üzerindeki etkisini de somut biçimde ortaya koymaktadır. Geliştirilen yapı sayesinde, depo yöneticileri sınıf dağılımı senaryolarını görsel olarak analiz edebilmekte, böylece hangi sınıflandırma

yapısının operasyonel açıdan daha verimli sonuçlar vereceği konusunda önceden fikir sahibi olabilmektedir.

4.2.3. Deponun Şekli

Çalışmanın bu kısmında sunulan görsel çıktılar, geliştirilen Excel tabanlı simülatörün depo içi sınıf-tabanlı atama politikasını ne kadar etkin şekilde uygulayabildiğini göstermektedir. Simülatör içerisinde VBA kodları aracılığıyla oluşturulan görseller, ürünlerin tek tek yerleştirilmesinden ziyade, 1. Sınıf, 2. Sınıf ve 3. Sınıf olarak ayrılan ürün gruplarının depo içerisindeki genel konumlarını öne çıkarmaktadır.

Simülasyonda kullanılan L-Şekilli Depolama Yerleşimi, Yatay Dikdörtgen Depolama Yerleşimi ve Dikey Dikdörtgen Depolama Yerleşimi; her bir sınıfın depo içindeki yerleşim alanlarını temsil etmektedir. Bu görselleştirme sayesinde, sınıflara ayrılmış bölgelerin depo düzeni üzerindeki görüntüsü daha net şekilde izlenebilmektedir. Özellikle 1. Sınıf ürünlerin deponun giriş/çıkış noktasına yakın ve erişimi kolay alanlara yerleştirilmesi; 2. ve 3. Sınıf ürünlerin ise daha az erişilen bölgelere dağıtılması, simülatörde görsel olarak açık bir şekilde sunulmaktadır.

Bu yapı sayesinde kullanıcılar, yalnızca bir ürünün nereye konduğunu değil, her ürün sınıfının genel olarak depo içinde hangi bölgelerde yoğunlaştığını ve bu sınıflandırmanın operasyonel düzen üzerindeki etkisini değerlendirebilmektedir. Aynı zamanda bu yapı, depo yöneticilerinin karar alma süreçlerinde sınıflandırmaya dayalı iyileştirmeleri daha net görebilmelerine katkı sunmaktadır. Bahsedilen L-Şekilli Depolama Yerleşimine, Yatay Dikdörtgen Depolama Yerleşimine ve Dikey Dikdörtgen Depolama Yerleşimine ait görüntüler sırasıyla Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

Y+																	
10	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
9	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
8	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
7	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
6	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
1	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
I-O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	X+
1	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
6	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
7	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
8	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
9	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	
10	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
Y+																	

Şekil 4.11. L-şekilli depolama yerleşimine ait simülasyon çıktısı

Y+																	
10	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
9	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
8	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	
7	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	
6	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
1	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
I-O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	X+
1	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	
6	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	
7	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	
8	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	
9	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
10	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
Y+																	

Şekil 4.12. Yatay dikdörtgen depolama yerleşimine ait simülasyon çıktısı

Y+																	
10	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
9	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
8	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
7	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
6	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
1	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
I-O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	X+
1	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
2	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
3	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
4	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
5	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
6	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
7	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
8	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
9	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
10	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(2, 0)	(3, 0)	(3, 0)	(3, 0)	
Y+																	

Şekil 4.13. Dikey dikdörtgen depolama yerleşimine ait simülasyon çıktısı

4.2.4. Sezgisel Sıralama Algoritmaları

Bu bölümde, OD/GA sistemi robotunun toplam seyahat süresi dikkate alınarak, FIFO (İlk Giren İlk Çıkar) ve en yakın komşuluk algoritmalarının sipariş sıralamasındaki performansları karşılaştırılmıştır. FIFO yönteminde siparişler, sisteme giriş sırasına göre sıralanmış; En Yakın Komşuluk algoritmasında ise robotun seyahat mesafesini en aza indirecek şekilde rota oluşturulması sağlanmıştır.

Her iki algoritma aynı sipariş verisi üzerinde uygulanarak toplam seyahat mesafesi Öklid metriği kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, OD/GA sistemlerinde algoritma seçiminin operasyonel performansa olan katkısını değerlendirmek açısından önemlidir. Sıralanmasını istediğimiz sipariş verilerine ait bilgiler Çizelge 4.2'de, FIFO ile sıralanmış siparişler Çizelge 4.3'te ve en yakın Komşuluk algoritması ile sıralanmış siparişler Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Sıralanan siparişlerin verisi

Order_ID	Order_Group_ID	Order_Type	Order_Item	Due Date	Weight	Class	x	y
1	1	1	15	32	2	2	10	8
2	1	1	1	55	2	3	15	10
3	1	1	9	12	2	3	16	8
4	1	2	9	92	2	3	16	5
5	1	2	1	5	2	3	16	3
6	2	1	12	57	1	3	9	10
7	2	2	15	43	1	2	1	8
8	2	2	12	72	1	3	2	10
9	2	1	3	9	1	3	11	10
10	2	1	11	1	1	3	16	1

Çizelge 4.3. FIFO yöntemi ile sıralanmış siparişler

Sequence	ID	Group	Type	Item	Due Date	Weight	Class	x	y	Total Distance
1	1	1	1	15	32	2	2	10	8	256,63
2	2	1	1	1	55	2	3	15	10	
3	3	1	1	9	12	2	3	16	8	
4	4	1	2	9	92	2	3	16	5	
5	5	1	2	1	5	2	3	16	3	
6	6	2	1	12	57	1	3	9	10	
7	7	2	2	15	43	1	2	1	8	
8	8	2	2	12	72	1	3	2	10	
9	9	2	1	3	9	1	3	11	10	
10	10	2	1	11	1	1	3	16	1	

Çizelge 4.4. En yakın komşuluk algoritması ile sıralanmış siparişler

Sequence	ID	Group	Type	Item	Due Date	Weight	Class	x	y	Total Distance
1	6	2	1	12	57	1	3	9	10	213,98
2	8	2	2	12	72	1	3	2	10	
3	9	2	1	3	9	1	3	11	10	
4	4	1	2	9	92	2	3	16	5	
5	1	1	1	15	32	2	2	10	8	
6	5	1	2	1	5	2	3	16	3	
7	2	1	1	1	55	2	3	15	10	
8	7	2	2	15	43	1	2	1	8	
9	10	2	1	11	1	1	3	16	1	
10	3	1	1	9	12	2	3	16	8	

Elde edilen sonuçlar, en yakın komşuluk algoritmasının, FIFO'ya kıyasla robotun toplam seyahat mesafesini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu durum, sıralama algoritmalarının sistem performansı üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymakta ve görev planlamasında mesafeye dayalı sezgisel yaklaşımların tercih edilmesinin operasyonel verimliliği artırabileceğini göstermektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, OD/GA sistemi kapsamında robotun seyahat süresini analiz eden analitik bir model sunulmuş ve bu modelin çıktıları doğrultusunda sistem performansı yorumlanmıştır. Ayrıca, Excel üzerinde geliştirilen VBA tabanlı uygulama ile depo içi atama politikalarının, deponun şeklinin ve siparişleri sıralayan sezgisel algoritmaların etkilerini görselleştiren, gerçek hayatta kullanılabilir nitelikte basit bir simülatör oluşturulmuştur. Bu simülatör, depo yöneticilerine farklı senaryoları test etme ve karar alma süreçlerinde destek olma potansiyeline sahiptir.

Analitik modelde, yatay mekik hareketi ve dikey kaldırma hareketi için seyahat süresi performansı üzerine yapılan analizler, konum ve kat sayısı ile seyahat süresi varyansı arasında güçlü bir pozitif korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. Maksimum hız ve ivmenin artırılması, seyahat süresini ve varyansı düşürerek operasyonel verimliliği artırmıştır. Bu bulgular, sistem tasarımında hız ve ivme gibi parametrelerin, tüm performans metrikleri üzerindeki karmaşık etkileri göz önünde bulundurularak dengeli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Özetle, bu model, sistemin fiziksel büyüklüğü ile performansı arasındaki dinamik ilişkiyi modelleyerek, daha verimli ve dengeli bir sistem tasarımı için önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Depo içi atama politikaları kapsamında, rassal depo içi atama politikası ile sınıf-tabanlı depo içi atama politikası incelenmiştir. ABC analizi ile belirlenen sınıflar doğrultusunda yapılan sınıf-tabanlı atama, yüksek hacimli siparişlerin giriş/çıkış noktasına yakın yerleştirilmesini sağlamıştır.

Depo şeklinin sistem performansı üzerindeki etkisi de çalışmada detaylı olarak analiz edilmiştir. Geliştirilen simülatör, farklı senaryoların görsel olarak test edilmesine imkan tanıyarak, yöneticilerin depo şekli ve yerleşim stratejileri arasında bilinçli tercihler yapmasına yardımcı olmaktadır.

Sipariş sıralama sürecinde kullanılan en yakın komşuluk algoritması, robotun rotasını optimize ederek toplam seyahat süresini azaltmıştır. Bu sezgisel algoritma, özellikle

yüksek sipariş hacmine sahip senaryolarda robotun gereksiz hareketlerini minimize etmeye ve sistemin genel verimliliğini artırmaya yardımcı olmaktadır. Algoritmanın basitliği ve hızlı uygulanabilirliği, gerçek zamanlı sistemler için pratik bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma hem teorik hem de uygulamalı yöntemler sunmaktadır. Geliştirilen analitik model, sistemin performansını sayısal olarak değerlendirme imkanı sunarken; Excel VBA kod ile oluşturulan simülatör, depo yönetim süreçlerinin görselleştirilmesine ve farklı senaryoların test edilmesine imkan sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için değerli bir kaynak niteliğindedir. Gelecek çalışmalarda, daha gelişmiş sıralama algoritmalarının uygulanması ve gerçek zamanlı veri ile sistemin dinamik olarak performansının ölçülmesi üzerine odaklanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Ashayeri, J., Heuts, R. M., Valkenburg, M. W. T., Veraart, H. C., & Wilhelm, M. R. (2002). A geometrical approach to computing expected cycle times for zonebased storage layouts in AS/RS. *International Journal of Production Research, 40(17),* 4467-4483.

Bahrami, B., Aghezzaf, E. H., & Limere, V. (2017, July). Simulation modeling for End-of-Aisle automated storage and retrieval system. *In AIP Conference Proceedings ,1863(1),* AIP Publishing.

Bektaş, S. D. (2019). Otomatik depolama ve geri-alma sistemlerinin simülasyon ile performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi.

Bortolini, M., Accorsi, R., Gamberi, M., Manzini, R., & Regattieri, A. (2015). Optimal design of AS/RS storage systems with three-class-based assignment strategy under single and dual command operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *79*, 1747-1759.

Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F. (2019). Design of diagonal cross-aisle warehouses with class-based storage assignment strategy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *100*, 2521-2536.

D'Antonio, G., & Chiabert, P. (2019). Analytical models for cycle time and throughput evaluation of multi-shuttle deep-lane AVS/RS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *104*, 1919-1936.

Dong, W., Jin, M., Wang, Y., & Kelle, P. (2021). Retrieval scheduling in crane-based 3D automated retrieval and storage systems with shuttles. Annals of Operations Research, 302(1), 111-135.

Ekren, B. Y., & Akpunar, A. (2021). An open queuing network-based tool for performance estimations in a shuttle-based storage and retrieval system. *Applied Mathematical Modelling*, *89*, 1678-1695.

Ekren, B. Y., Akpunar, A., Sari, Z., & Lerher, T. (2018). A tool for time, variance and energy related performance estimations in a shuttle-based storage and retrieval system. *Applied Mathematical Modelling*, *63*, 109-127.

Flores, B. E., & Clay Whybark, D. J. I. J. O. O. (1986). Multiple criteria ABC analysis. *International Journal of Operations & Production Management*, *6*(3), 38-46.

Guo, S. M., & Liu, T. P. (2010, June). An evaluation of storage assignment policies for twin shuttle AS/RS. In *2010 IEEE International Conference on Management of Innovation & Technology* (pp. 197-202). IEEE.

Guo, X. (2016). *Storage policies and maintenance support strategies in warehousing systems*. Springer.
Hachemi, K., Sari, Z., & Ghouali, N. (2012). A step-by-step dual cycle sequencing method for unit-load automated storage and retrieval systems. Computers & Industrial Engineering, 63(4), 980-984.

Hausman, W. H., Schwarz, L. B., & Graves, S. C. (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management science*, *22*(6), 629-638.

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.

Lerher, T. (2006). Design and evaluation of the class-based multi-aisle AS/RS. *International Journal of Simulation Modeling*, *5*(1), 25-36.

Lerher, T., Ficko, M., & Palčič, I. (2021). Throughput performance analysis of automated vehicle storage and retrieval systems with multiple-tier shuttle vehicles. *Applied mathematical modelling*, *91*, 1004-1022.

Liu, J., Liao, X., Zhao, W., & Yang, N. (2016). A classification approach based on the outranking model for multiple criteria ABC analysis. *Omega*, *61*, 19-34.

Mahagaonkar, S. S., & Kelkar, A. A. (2017). Application of ABC analysis for material management of a residential building. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *4*(8), 614-620.

Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S., & Tappia, E. (2012). Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes. *International Journal of Production Research*, *50*(24), 7134-7148.

Mirzaei, M., Zaerpour, N., & De Koster, R. (2021). The impact of integrated cluster-based storage allocation on parts-to-picker warehouse performance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *146*, 102207.

Nia, A. R., Haleh, H., & Saghaei, A. (2017). Dual command cycle dynamic sequencing method to consider GHG efficiency in unit-load multiple-rack automated storage and retrieval systems. *Computers & Industrial Engineering*, *111*, 89-108.

Pareto, V. (1971). Manuale di economia politica (Societa Editrice Libraria, Milano, Italy, 1906), English translation, V. Pareto, Manual of political economy, translated by AS Schwier, M. Augustus.

Petersen, C. G., Aase, G. R., & Heiser, D. R. (2004). Improving order-picking performance through the implementation of class-based storage. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *34*(7), 534-544.

Polten, L., & Emde, S. (2022). Multi-shuttle crane scheduling in automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, *302*(3), 892-908.

Popović, D., Vidović, M., & Bjelić, N. (2014). Application of genetic algorithms for sequencing of AS/RS with a triple-shuttle module in class-based storage. *Flexible services and manufacturing journal*, *26*, 432-453.

Ramtin, F., & Pazour, J. A. (2015). Product allocation problem for an AS/RS with multiple in-the-aisle pick positions. *IIE Transactions*, *47*(12), 1379-1396.

Rizqi, Z. U., Chou, S. Y., & Choon, S. S. (2023, October). Performance of dual stacker automated storage and retrieval system (AS/RS) with double-deep configuration. In *2023 IEEE 5th Eurasia conference on IOT, communication and engineering (ECICE)* (pp. 683-687). IEEE.

Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European journal of operational research*, *194*(2), 343-362.

Roshan, K., Shojaie, A., & Javadi, M. (2019). Advanced allocation policy in class-based storage to improve AS/RS efficiency toward green manufacturing. *International journal of environmental science and technology*, *16*, 5695-5706.

Schenone, M., Mangano, G., Grimaldi, S., & Cagliano, A. C. (2020). An approach for computing AS/R systems travel times in a class-based storage configuration. *Production & Manufacturing Research*, *8*(1), 273-290.

Singbal, V., & Adil, G. K. (2021). Designing an automated storage/retrieval system with a single aisle-mobile crane under three new turnover based storage policies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *34*(2), 212-226.

Tostani, H. H., Haleh, H., Molana, S. H., & Sobhani, F. M. (2020). A Bi-Level Bi-Objective optimization model for the integrated storage classes and dual shuttle cranes scheduling in AS/RS with energy consumption, workload balance and time windows. *Journal of Cleaner Production*, *257*, 120409.

Vasili, M. R., Tang, S. H., Ismail, N., & Sulaiman, S. (2008). Class-based storage assignments for miniload AS/RS with open-rack structure. *International Journal of Engineering and Technology*, *5*(2), 118-128.

Wu, Y., Zhou, C., Ma, W., & Kong, X. T. (2020). Modelling and design for a shuttle-based storage and retrieval system. *International journal of production research*, *58*(16), 4808-4828.

Yan, X., Zhang, Z., Liu, Q., Lv, C., Zhang, L., & Li, S. (2021). An NSABC algorithm for multi-aisle AS/RS scheduling optimization. *Computers & Industrial Engineering*, *156*, 107254.

Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Qin, L. (2015). An integrated optimization of location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *26*, 1145-1159.

Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Ye, B. (2015). 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.

Yetkin Ekren, B. (2021). A multi-objective optimisation study for the design of an AVS/RS warehouse. *International Journal of Production Research*, *59*(4), 1107-1126.

Zhong, Y., Wang, Z., & Xu, X. (2023, November). Research on the configuration of AS/RS warehouse system based on AGV transportation. In *International Conference on Automation in Manufacturing, Transportation and Logistics (iCaMaL 2023)* (Vol. 2023, pp. 195-201). IET.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuğçe AKYÜZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa , 30.03.1997
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Nuri Nihat Aslanoba Anadolu Lisesi, 2015
Lisans : Uludağ Üniversitesi Matematik, 2020
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Endüstri Mühendisliği, 2025

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : YEK Özel Eğitim Kursu , 2020- 2021
Erkurt Holding, 2022- 2023
Şişecam , 2024-

İletişim (e-posta) : tugceeakyuzz@gmail.com

Yayınları : Göç, G. T., Akyüz, T., Özcan, G., & Çavdur, F. Çok dönemli güvenlik hizmetleri çizelgelemesi için hedef programlama tabanlı bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *40*(1), 343-354.