



**ROBOTİK KOMPAKT DEPOLAMA VE GERİ ALMA
SİSTEMLERİNİN (RKD/GS) İNCELENMESİ VE BİR
SİMÜLASYON ÇALIŞMASI**

Elif Ravza ÖZARAS

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ROBOTİK KOMPAKT DEPOLAMA VE GERİ ALMA SİSTEMLERİNİN (RKD/GS)
İNCELENMESİ VE BİR SİMÜLASYON ÇALIŞMASI**

(Review of Robotic Compact Storage and Retrieval Systems (RCS/RS) and A Simulation Study)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif Ravza ÖZARAS

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahmut TUTAM

Erzurum
Aralık, 2025



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ danışmanlığında Elif Ravza ÖZARAS tarafından hazırlanan “**ROBOTİK KOMPAKT DEPOLAMA ve GERİ ALMA SİSTEMLERİNİN (RKD/GS) İNCELENMESİ ve BİR SİMÜLASYON ÇALIŞMASI**” başlıklı çalışma 10/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Endüstri Mühendisliği - Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı'nda **Yüksek Lisans** tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof.Dr. Muhammed Emre KESKİN <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza
Jüri Üyesi (Danışman):	Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza
Jüri Üyesi:	Doç.Dr. Mustafa YILMAZ <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza
Jüri Üyesi:	Doç.Dr. Mahmut TUTAM <i>ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN <i>ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

12/12/2025
Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü
e-imza



ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ danışmanlığında sunulan “Robotik Kompakt Depolama ve Geri Alma Sistemlerinin (RKD/GS) İncelenmesi ve Bir Simülasyon Çalışması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Metot	0	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	0	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Elif Ravza ÖZARAS	Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ
10.12.2025	10.12.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca bana her zaman rehberlik eden, desteğini ve motivasyonunu esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sinan Öztaş'a; proje ve tez çalışmalarında bilgi birikiminden ve engin tecrübesinden büyük bir gönüllülükle faydalandığım, her anımda sabırla yolumu aydınlatan kıymetli eş danışmanım Doç. Dr. Mahmut Tutam'a içtenlikle teşekkür ederim.

Erzurum Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (ETÜ BAP) koordinasyonunda yürütülen BAP 2022/006 numaralı 'Robotik Kompakt Depolama/Boşaltma Sistemi için Ayrık Olay Simülasyonu ile Faktör Analizi ve Senaryo Bazlı Sistem Tasarımı' projesi ile TÜBİTAK 3501 kapsamında desteklenen 122M677 numaralı 'Robot Tabanlı Bir Kompakt Depolama/Boşaltma Sistemi Tasarımının Optimizasyonu ve İyileştirilmesi' projesine sağladıkları finansal destek için ETÜ BAP Birimi'ne ve TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, bana her zaman sevgiyle destek veren çok kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim. Varlığınızla her zaman güç buldum, iyi ki varsınız.

Elif Ravza ÖZARAS

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ROBOTİK KOMPAKT DEPOLAMA VE GERİ ALMA SİSTEMLERİNİN (RKD/GS) İNCELENMESİ VE BİR SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Elif Ravza ÖZARAS

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahmut TUTAM

Amaç: Bu çalışma, Robotik Kompakt Depolama ve Geri Alma Sistemlerinin (RKD/GS) farklı tasarım parametrelerinin sistem performansına etkilerini belirlemek ve optimal tasarım boyutlarını ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Yöntem: ARENA 16.0 yazılımında geliştirilen simülasyon modeli ile toplam kutu sayısı, istif yüksekliği, varışlar arası süre ve robot hızı parametreleri kullanılarak 144 senaryo oluşturulmuş, her senaryo 20 replikasyon çalıştırılarak 2.880 simülasyon deneyinden elde edilen veriler analiz edilmiştir. Model doğruluğu, literatürdeki formülasyonlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Bulgular: Analizler, robot hızının performans üzerinde en belirleyici faktör olduğunu, ardından toplam kutu sayısı ve gelişler arası sürenin geldiğini ortaya koymuştur. İstif yüksekliğinin etkisi ise görece sınırlı bulunmuştur. Bu bulgular, depo tasarımında kapasite, istif yüksekliği, robot hızı ve talep hızının birlikte değerlendirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Sonuç: Çalışma, depo tasarımında kapasite, istif yüksekliği, robot hızı ve talep hızının birlikte değerlendirilmesinin operasyonel verimlilik açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle robot hızının performans üzerindeki belirleyici etkisi, sistem optimizasyonunda öncelikli bir parametre olarak dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Robotik Kompakt Depolama ve Geri Alma Sistemleri, Simülasyon

Aralık 2025, 41 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

REVIEW OF ROBOTIC COMPACT STORAGE AND RETRIEVAL SYTEMS (RCS/RS) AND A SIMULATION STUDY

Elif Ravza ÖZARAS

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahmut TUTAM

Purpose: This study aims to determine the effects of various design parameters of Robotic Compact Storage and Retrieval Systems (RCS/RS) on system performance and to identify the optimal design dimensions.

Method: A simulation model was developed using ARENA 16.0 software. A total of 144 scenarios were created by varying parameters such as total number of bins, stack height, inter-arrival times, and robot speed. Each scenario was replicated 20 times, resulting in 2,880 simulation runs whose data were analyzed. Model accuracy was verified through comparison with formulations reported in the literature.

Findings: Analyses revealed that robot speed is the most influential factor affecting system performance, followed by total bin count and inter-arrival time. The effect of stack height was found to be relatively limited. These findings emphasize the necessity of jointly considering capacity, stack height, robot speed, and demand rate in warehouse design.

Results: The study demonstrates that evaluating capacity, stack height, robot speed, and demand rate together is critical for operational efficiency. In particular, the dominant impact of robot speed on performance suggests it should be prioritized in system optimization.

Keywords: Robotic Compact Storage and Retrieval Systems, Simulation

December 2025, 41 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	ix
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Depolamanın Sınıflandırılması	3
Vinci ve forklift sistemleri	4
Karusel ve dağıtıcı sistemler	4
Otomatik yönlendirmeli araç sistemleri	4
Mekik Tabanlı Sistemler ve RKD/GS Yaklaşımı	5
Literatür Taraması	6
MATERYAL ve METOT	9
RKD/GS İşleyiş Süreci	9
Matematiksel Model.....	13
Simülasyon Modeli	15
Varsayımlar	20
Senaryolar	20
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	22
Boyutların Tablosu.....	22
Model Doğrulama Tablosu	23
Simülasyon Sonuçları	23
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	26
KAYNAKLAR.....	28
ÖZGEÇMİŞ.....	30

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Depolama Sistemi Boyutları İçin Parametreler	13
Tablo 2. Depolama Zaman Hesaplamaları için Parametreler	13
Tablo 3. Senaryo Değişkenleri.....	21
Tablo 4. 5000 Kutu İçin Depo Boyutları	22
Tablo 5. 10000 Kutu İçin Depo Boyutları	22
Tablo 6. Matematiksel Model İle Simülasyon Modelinin Karşılaştırılması.....	23
Tablo 7. 5000 Kutu İçin Senaryo Bazlı Simülasyon Sonuçları	24
Tablo 8. 10000 Kutu İçin Senaryo Bazlı Simülasyon Sonuçları	24

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Depolama sistemlerinin gelişim süreci	3
Şekil 2. Depolama sistemlerinin sınıflandırılması	4
Şekil 3. RKD/GS tam görünüm.....	9
Şekil 4. x Ekseni katman görünümü.....	10
Şekil 5. y Ekseni katman görünümü.....	10
Şekil 6. z Ekseni katman görünümü.....	10
Şekil 7. Yığından geri alma ve depolama işlemlerinin gerçekleşmesi.....	11
Şekil 8. RKD/GS süreç rotaları	12
Şekil 9. Simülasyon akış şeması	16
Şekil 10. Simülasyon ARENA görüntüsü	17
Şekil 11. 1 numaralı detay görüntü	17
Şekil 12. 2 numaralı detay görüntü	18
Şekil 13. 3 numaralı detay görüntü	18
Şekil 14. 4 numaralı detay görüntü	18
Şekil 15. 5 numaralı detay görüntü	18
Şekil 16. 2 boyutlu matris görünümü	19

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

OD/GA	: Otomatik Depolama ve Geri Alma
RKD/GS	: Robotik Kompakt Depolama ve Geri Alma Sistemi
RMSKS	: Robotik Mobil Sipariş Karşılama Sistemi
STA	: Sipariş Toplama Alanı
FIFO	: İlk Giren İlk Çıkar (First In First Out)
b_x	: Geri alma konumu x koordinatı
b_y	: Geri alma konumu y koordinatı
b_z	: Geri alma konumu z koordinatı
d_x	: Depolama konumu x koordinatı
d_y	: Depolama konumu y koordinatı
d_z	: Depolama konumu z koordinatı
g_x	: x konumu koordinatı
g_y	: y konumu koordinatı
g_z	: z konumu koordinatı
k_x	: x eksen kutu boyutu
k_y	: y eksen kutu boyutu
k_z	: z eksen kutu boyutu
N	: Toplam kutu sayısı
t_x	: x eksenindeki toplam kutu sayısı
t_y	: y eksenindeki toplam kutu sayısı
t_z	: z eksenindeki toplam kutu sayısı
v_x	: x eksenindeki robot hızı
v_y	: y eksenindeki robot hızı
v_z	: z eksenindeki robot hızı

GİRİŞ

Lojistik; ürünlerin üretim noktasından nihai tüketiciye ulaştırılması sürecinde gerçekleştirilen taşıma, depolama, dağıtım ve ilgili tüm hizmetleri kapsayan bütünleşik bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Bu sürecin temel unsurlarından biri olan depolama, ürünlerin kabulü, korunması ve teslimat aşamalarında kritik bir rol oynamaktadır.

Son yıllarda dijitalleşmenin hızla yaygınlaşması ve özellikle COVID-19 pandemisinin etkisiyle tüketim alışkanlıklarında köklü değişimler meydana gelmiştir. Bu değişim, çevrimiçi alışveriş uygulamalarının dünya genelinde hızla benimsenmesine neden olmuş, ticaret yapısında önemli bir dönüşüm başlatmıştır. Örneğin, 2024 yılında dünya genelinde yaklaşık 2,71 milyar kişi çevrimiçi alışveriş yapmıştır ve bu sayının 2025 yılında 2,77 milyara ulaşması öngörülmektedir. Ayrıca mobil ticaretin toplam e-ticaret içindeki payı 2024'te %67,1 olarak tahmin edilmiş olup, 2025'te %67,6'ya çıkacağı öngörülmektedir. Bu hızlı artış, üretim kapasitesi kadar lojistik ve depo yönetimi süreçlerini de doğrudan etkileyerek daha hızlı, esnek ve verimli sistemlere olan ihtiyacı önemli ölçüde artırmaktadır (DemandSage, 2025.; Backlinko, 2025.).

Artan sipariş yoğunluğu ve değişen müşteri beklentileri, geleneksel depolama sistemlerinin yetersizliklerini daha görünür hâle getirmiştir. Özellikle insan gücüne dayalı operasyon yapıları; alan kullanımı, işlem hızı, doğruluk ve güvenilirlik gibi temel performans kriterleri açısından yetersiz kalmaktadır. Bu durum, işletmeleri daha esnek, otomasyon temelli ve teknoloji odaklı sistemlere yöneltmiştir. Bu bağlamda son yıllarda öne çıkan Robotik Kompakt Depolama ve Geri Alma Sistemleri (RKD/GS), yüksek yoğunluklu depolama ihtiyacına etkin çözümler sunan yenilikçi bir yaklaşım olarak dikkat çekmektedir. Söz konusu sistemler, sadece depolama kapasitesini artırmakla kalmayıp; aynı zamanda depo operasyonlarının doğruluk, hız ve verimlilik düzeylerini de önemli ölçüde artırmaktadır.

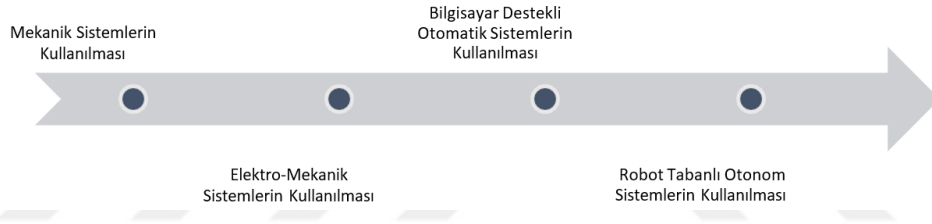
RKD/GS sistemlerinin en temel avantajlarından biri, minimum insan müdahalesi ile operasyonların entegre bir şekilde yürütülmesini mümkün kılmasıdır. Gelişmiş sensör teknolojileri, kontrol yazılımları ve robotik donanımların bir araya geldiği bu bütünleşik yapı sayesinde sistem bileşenleri arasında yüksek düzeyde koordinasyon sağlanmakta, operasyonel hatalar azalmakta ve sipariş süreçleri hız kazanmaktadır. Ayrıca, geleneksel depolarda ihtiyaç duyulan geniş koridor yapılarının ortadan kalkması, alan kullanım verimliliğini büyük ölçüde artırmaktadır. Robot sayısının ve hızının ihtiyaca göre ayarlanabilir olması ise sistemin hem

kapasite yönetimi hem de enerji tüketimi açısından esnek bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır (Tutam *et al.* 2024).

Literatürde RKD/GS sistemlerine ilişkin çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen; sipariş yoğunluğu, depo boyutları, robot hızı ve diğer değişkenlerin sistem performansına etkisini bütüncül bir şekilde ele alan, senaryo tabanlı analizlere sınırlı sayıda rastlanmaktadır. Bu çalışmada, RKD/GS sistemlerinin performansını çok boyutlu olarak incelemek amacıyla ayrıntılı bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Model kapsamında farklı gelişler arası süreler dikkate alınarak kuyruk oluşum süreçleri detaylı şekilde yapılandırılmış; robot hızları, depo boyutları, istif yüksekliği ve kutu sayısı gibi kritik parametrelerin sistem verimliliği üzerindeki etkileri senaryoya dayalı analizlerle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların, optimum depo tasarımının belirlenmesine ve karar destek süreçlerinin iyileştirilmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

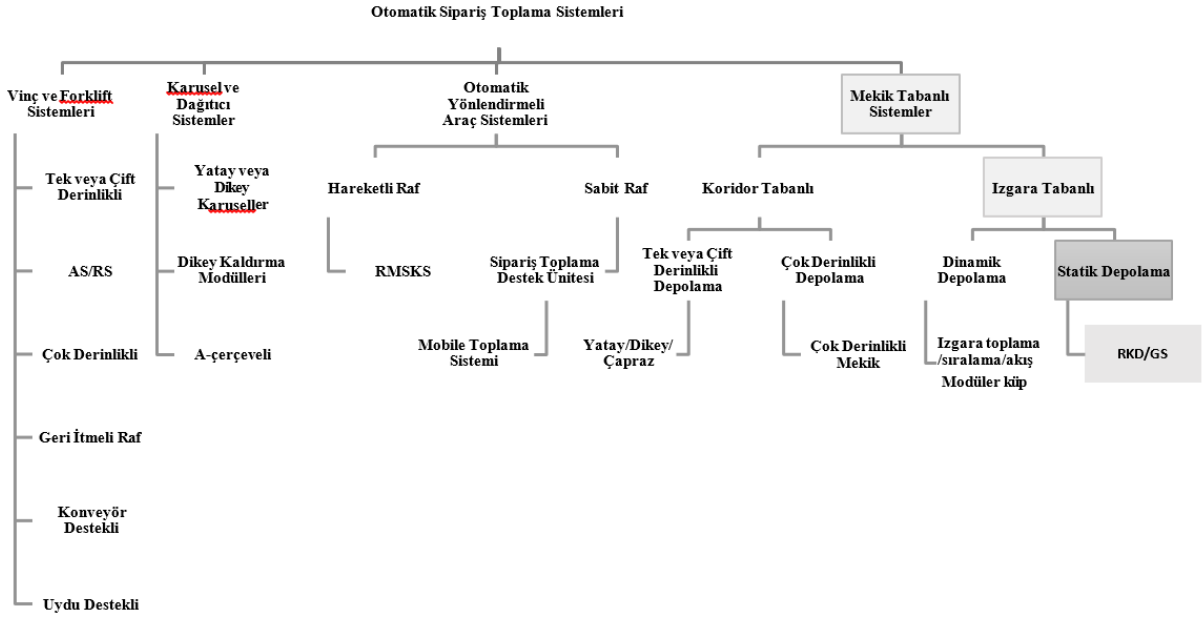
Depolama sistemleri, ilk medeniyetlerde temel gıda ve eşyaların korunmasına yönelik basit ve sınırlı uygulamalarla başlamış; ticaretin gelişmesiyle birlikte daha kapsamlı ve düzenli depolama alanlarının ortaya çıkmasıyla ilerleme göstermiştir. Endüstri 1.0 döneminde temel mekanik taşıma ekipmanlarının kullanımıyla başlayan bu süreç, zamanla motor destekli taşıma çözümlerinin uygulandığı elektromekanik sistemlere dönüşmüştür. Bu aşamada depolama alanları yatay düzenden dikey istiflemeye yönelmiş, operasyonel süreçler ise daha planlı ve sistematik bir yapıya kavuşmuştur. Bilgi ve bilgisayar teknolojilerinin entegrasyonu ile otomasyonun yaygınlaşması depolama faaliyetlerinde köklü değişimlere yol açmış; son aşamada ise yapay zekâ destekli sistemler ve mobil robotların devreye girmesiyle depolama süreçlerinde otonom çözümlere yönelim artmıştır (Tutam, 2022).



Şekil 1. Depolama sistemlerinin gelişim süreci

Depolamanın Sınıflandırılması

Teknolojik dönüşümlerle birlikte depolama sistemlerinin yapısı ve kullanım şekilleri, farklı amaçlar ve çeşitli faktörler doğrultusunda çeşitlenmiştir. Azadeh *et al.* (2019) tarafından yapılan çalışmada depolama sistemlerini; Vinç/Otomatik Forklift Sistemleri, Karusel ve Dağıtıcı Sistemler, Mekik Tabanlı Sistemler ve Otomatik Yönlendirmeli Araçlar olmak üzere dört ana başlık altında sınıflandırılmıştır.



Şekil 2. Depolama sistemlerinin sınıflandırılması (Azadeh *et al.* 2019)

Vinç ve forklift sistemleri

Vinç ve forklift tabanlı sistemler genellikle yüksek raflı depo çözümleri sunulmakta olup, Otomatik Depolama ve Geri Alma (OD/GA) prensibine dayalı uygulamaları kapsamaktadır. Tek veya çift derinlikli OD/GA raf yapılarında, ürünlerin alınması ve yerleştirilmesi süreçleri vinç tabanlı otomasyon sistemleri ile gerçekleştirilmektedir. Çok derinlikli sistemlerde ise geri itmeli raflar, konveyör destekli yapılar veya uydu tabanlı çözümler kullanılmaktadır. Bu sistemler, özellikle yüksek hacimli ve ağır yüklerin kontrollü bir şekilde taşınması ve yönetilmesi amacıyla tercih edilmektedir.

Karusel ve dağıtıcı sistemler

Karusel ve dağıtıcı sistemler, ürünlerin otomatik olarak döndürülmesi veya belirli bir düzen içinde dağıtılması yoluyla toplanmasını sağlayan mekanizmalardır. Yatay veya dikey düzlemde çalışan karusel sistemleri, dönüş yönüne bağlı olarak ürünlerin taşınmasını kolaylaştırırken; dikey kaldırma modülleri ise dikey hareket prensibiyle çalışarak ürünleri doğrudan operatöre ulaştırmaktadır. A-çerçevesi ürün depolama sistemleri ise özellikle küçük parçaların hızlı ve seri şekilde ayrıştırılması ve toplanması amacıyla kullanılmaktadır.

Otomatik yönlendirmeli araç sistemleri

Otomatik Yönlendirmeli Araç sistemleri ise, hareketli veya sabit rafların taşınmasında kullanılan ve genellikle esnek depo tasarımlarına uygun çözümler sunan teknolojilerdir. Depo alanı içerisinde serbestçe hareket edebilen bu araçlar, sensörler ve gelişmiş rotalama algoritmaları ile optimize edilerek ürünlerin etkin bir şekilde taşınmasını sağlamaktadır.

Mekik Tabanlı Sistemler ve RKD/GS Yaklaşımı

Mekik tabanlı depolama sistemleri, yüksek depolama yoğunluğu ve esneklik sunan yenilikçi otomasyon çözümleridir. Bu sistemler genel olarak koridor tabanlı ve ızgara tabanlı olmak üzere iki ana yapıda sınıflandırılmaktadır. Koridor tabanlı sistemlerde, mekikler raflar arasında yatay, dikey ve çapraz hareketlerle ürün taşıma işlevi görürken, çok derinlikli yapılarda raf içlerinde ileri-geri hareket ederek ürün akışını sağlarlar. Izgara tabanlı sistemler ise dinamik ve statik olmak üzere iki farklı yaklaşımla kurgulanır. Dinamik yapılarda; robotik toplama, modüler küp yapılar, akış yönetimi ve otomatik sıralama teknolojileri aracılığıyla ürünler üst üste konumlandırılarak, yapboz benzeri bir mantıkla hızlı erişim sağlanır. Statik sistemlerde ise kompakt ve sabit bir depolama düzeni mevcuttur. Bu bağlamda, tez kapsamında da ele alınan RKD/GS, statik ızgara tabanlı yapıya örnek teşkil etmektedir.

RKD/GS; ürünlerin plastik kutular içerisinde üst üste istiflendiği, bu kutuların ise ızgara yapısı üzerine yerleştirildiği tam otomasyonlu depo sistemleridir (Tutam *et al.* 2023). Robotlar, ızgara sistemi üzerinde x ve y eksenlerinde serbest hareket ederek talep edilen kutuları sistemin tabanında yer alan toplama istasyonlarına ulaştırır. Sistem, modüler yapısı sayesinde robot ve istasyon sayısına bağlı olarak ölçeklendirilebilir kapasite sunar (Zou *et al.* 2018). Geleneksel raf sistemlerinden farklı olarak, kutuların dikey şekilde dizildiği bu yapıda, hedef kutuya erişebilmek için üstteki kutular geçici olarak çevre hücrelere aktarılır ve ardından hedef kutu taşınarak sipariş süreci tamamlanır. Bu model, insan gücüne olan bağımlılığı azaltarak süreç verimliliğini artırır.

RKD/GS dört ana bileşenden oluşmaktadır: depolama ızgarası, robot, kutular ve sipariş toplama alanı (STA). Izgara yapısı, çelik profillerden oluşturulmuş raylı bir ağ sistemiyle robotların hareketini ve kutuların düzenli istiflenmesini mümkün kılar. Sistemin yüksekliği ve modüler genişliği, ihtiyaç duyulan kapasiteye göre özelleştirilebilir. Pille çalışan robotlar sekiz adet tekerlekle donatılmış olup, bu tekerleklerin bir kısmı gerektiğinde kaldırılabilir özellik taşır; bu sayede manevra kabiliyeti ve enerji verimliliği artırılmış olur. Kutu taşıma işlemi, robotların sahip olduğu halat tabanlı dikey kaldırma mekanizması ile gerçekleştirilir.

Ürünler, dayanıklı plastik kutular içerisinde tanımlı konumlara yerleştirilir ve her kutu sistem veri tabanında benzersiz bir kimlik numarasıyla takip edilir. Böylece herhangi bir robot, herhangi bir kutuya erişerek ilgili sipariş istasyonuna teslimat gerçekleştirebilir. STA (veya portlar), ergonomik tasarımıyla operatör konforunu ön planda tutarken sistem verimliliğini destekler. Ayrıca, bu alanlar hem ürün alma hem de yeniden yerleştirme işlemlerine olanak tanıyarak süreç çeşitliliğine uyum sağlar.

RKD/GS; yüksek alan kullanım oranı, modüler kapasite artırımı ve düşük iş gücü ihtiyacı gibi avantajlarıyla özellikle e-ticaret, ilaç lojistiği ve yedek parça dağıtımı gibi sektörlerde yaygın kullanım alanı bulmaktadır (Trost *et al.* 2023).

Literatür Taraması

RKD/GS alanındaki literatür, son yıllarda hem analitik modelleme hem de simülasyon tabanlı performans analizleriyle önemli gelişmeler göstermiştir. Zou *et al.* (2018) tarafından gerçekleştirilen öncü çalışma, bu sistemlerde uygulanan depolama politikalarının sistem performansı ve maliyet üzerindeki etkilerini derinlemesine incelemiş; özellikle adanmış ve paylaşımlı yerleştirme stratejilerinin yarı açık kuyruk ağı yapısına dayanan analitik modellerle değerlendirilmesi literatürde bir dönüm noktası olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, yüksek doluluk oranlarında adanmış depolamanın işlem süresini azalttığını, buna karşılık paylaşımlı depolamanın ise toplam yıllık maliyet açısından daha ekonomik olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yığın yüksekliği, depolama boyutu ve oranlar gibi sistem parametrelerinin performans etkisi sistematik biçimde analiz edilerek farklı işletme koşullarına uyarlanabilir tasarım önerilerinin geliştirilmesine imkân tanınmıştır.

Chen *et al.* (2022) çalışması, RKD/GS' de zaman ve enerji performansını kapsamlı biçimde inceleyen simülasyon temelli bir çalışmadır. Ayrık olay simülasyonu kullanılarak gerçekleştirilen araştırmada hem tek sipariş hem çok sipariş toplama senaryolarında farklı depolama politikaları ve yığın yapılandırmalarının robot kullanımı, enerji tüketimi ve sistem verimliliğine etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş; ayrıca sistem yerleşimi, robot sayısı gibi tasarım değişkenlerinin optimum performans üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Böylece, bu çalışma RKD/GS alanında performans analizini hem zaman hem enerji boyutunda inceleyen ilk kapsamlı simülasyon araştırmalarından biri olarak literatüre önemli katkılar sunmuştur.

Sipariş işleme sırasının performans üzerindeki kritik etkisini ele alan Ko & Han (2022), derinliğe dayalı yığın yapılarında yeniden düzenleme işlemlerini minimize etmek amacıyla geliştirdikleri meta-sezgisel algoritmaları gerçekçi veri setleri üzerinde deneysel olarak değerlendirmiştir. Bu çalışma, yüksek kaliteli ve hızlı sipariş sıralamaları üreterek robot görev sürelerinin ve işlem maliyetlerinin azaltılmasına yönelik uygulanabilir çözümler sunmaktadır.

Tutam *et al.* (2023) çalışmasında, RKD/GS sistemlerinde sınıf temelli depolama politikalarının performans üzerindeki etkileri sistematik ve ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Çalışmada, ürünlerin sınıflandırılmasına dayalı yerleştirme stratejilerinin erişim hızları ve kaynak kullanımı verimliliği gibi kritik performans göstergelerine etkileri karşılaştırmalı deneysel modeller aracılığıyla ortaya konmuş; simülasyon tabanlı analizlerle farklı sınıf

politikalarının uygulanabilirliği test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle yüksek talep gören ürün grupları için öncelikli yerleştirme stratejilerinin sistem performansında anlamlı iyileşmeler sağladığını göstermektedir.

Yener & Yazgan (2023) tarafından yürütülen araştırmada, RKD/GS yeniden düzenleme ve iyileştirme stratejilerinin performans kriterleri üzerindeki etkileri dinamik simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemleri ile analiz edilmiştir. Çalışma, yeniden düzenleme yaklaşımlarının sistem verimliliğini artırdığını ve kritik operasyonel metriklerde kayda değer iyileşmeler sağladığını ortaya koymaktadır.

Görev dağılımının optimizasyonuna odaklanan Cai *et al.* (2024) ise, çift komut işlem süreçlerini dikkate alan karma tam sayılı programlama modeli ve uyarlanabilir açgözlü algoritma önerileriyle robotların boşa çalışma sürelerini minimize etmiş ve sistemin toplam iş hacmini artırmayı başarmıştır. Bu yöntemler ideal robot yapılandırmalarına dair önemli öneriler sunmaktadır.

Khari Jen *et al.* (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışma, RKD/GS’ de farklı giriş/çıkış noktası konfigürasyonlarının sistem performansına etkilerini analitik modelleme ve simülasyon yöntemleriyle kapsamlı biçimde incelemiştir. Duyarlılık analizleri, belirli giriş/çıkış politikalarının geri alma süresi ve enerji tüketiminde iyileşmeler sağladığını göstermiştir.

Trost ve Eder de RKD/GS alanında üç önemli çalışma gerçekleştirmiştir. İlk çalışmaları (Trost *et al.* 2023) tek bir toplama istasyonu senaryosunda RKD/GS performansını simülasyon temelli olarak incelemiştir. Bu araştırmada depo boyutları, yığın yüksekliği, doluluk oranı ve robot sayısı gibi parametrelerin etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiş ve SIMIO yazılımı ile geliştirilen ayrık olay simülasyonu modeli kullanılarak farklı tasarım alternatifleri deneysel olarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, optimum robot sayısının belirlenmesine ve yüksek doluluk oranlarının sistem verimliliğine etkisinin niceliksel olarak ortaya konmasına imkân sağlamıştır. İkinci çalışmalarında (Trost & Eder, 2024b) ise, robotların giriş/çıkış bölgesindeki hareketleri açık kuyruk teorisi çerçevesinde analitik olarak modellenmiş ve model ayrık olay simülasyonu ile doğrulanmıştır. Bu çalışma, hızlı çözülebilen ve gerçek uygulamalarda pratik olarak kullanılacak bir performans tahmin aracı sunmaktadır. Üçüncü çalışmalarında (Trost & Eder, 2024a) ise, birden fazla toplama istasyonuna hizmet veren robotların etkileşimleri iç içe geçmiş kuyruk ağı modeli ile incelenmiş ve robotların performansı ile sistemin genel verimliliği yüksek doğrulukla hesaplanmıştır. Ayrıca, tek robotun birden fazla yığın yüksekliğine hizmet ettiği sistemler için kapalı form döngü süresi modelleri geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Trost ve Eder’in bu üç çalışması, analitik ve simülasyon temelli yöntemleri

entegre ederek RKD/GS karmaşık dinamiklerini anlamada ve performans tahminlerinde literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

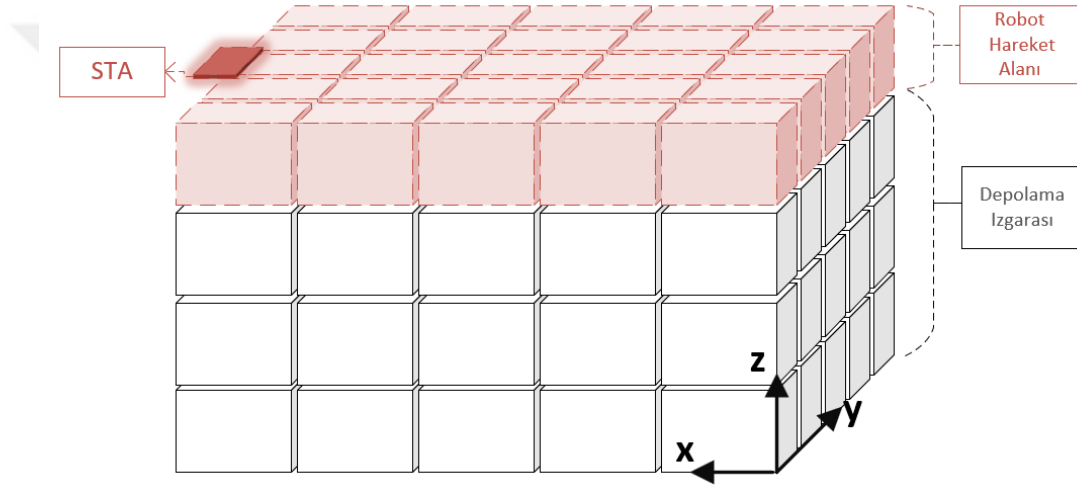
Wang *et al.* (2024) ise yüksek hacimli RKD/GS konteyner yeniden düzenleme stratejilerinin etkinliğini iç içe geçmiş kuyruk ağı modeli ve pekiştirmeli öğrenme algoritmalarıyla analiz etmiştir. Sonuçlar, yeniden düzenleme mesafesi ve işlem süresinin azaldığını, sistem kararlılığının sağlandığını ve robot sayısının performans üzerindeki etkisinin sistematik biçimde incelendiğini göstermektedir

Tutam *et al.* (2024) çalışmasında ise RKD/GS tasarımında depolama kutularının hareketlilik düzeylerindeki çarpıklığın sistemin toplam işlem verimliliğine olan etkisi kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Bu kapsamda kutuların kaldırılması, taşınması ve yerleştirilmesi süreçlerine ilişkin ayrıntılı analizler yapılmış; kapalı form ifadeler kullanılarak operasyon süreleri hesaplanmış ve simülasyon yoluyla doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, hareketlilikteki çarpıklığın sistemin işlem kapasitesi üzerinde anlamlı etkiler yarattığını ortaya koymakta ve RKD/GS tasarımında bu değişkenin göz ardı edilmemesi gerektiğini vurgulamaktadır.

MATERYAL ve METOT

RKD/GS İşleyiş Süreci

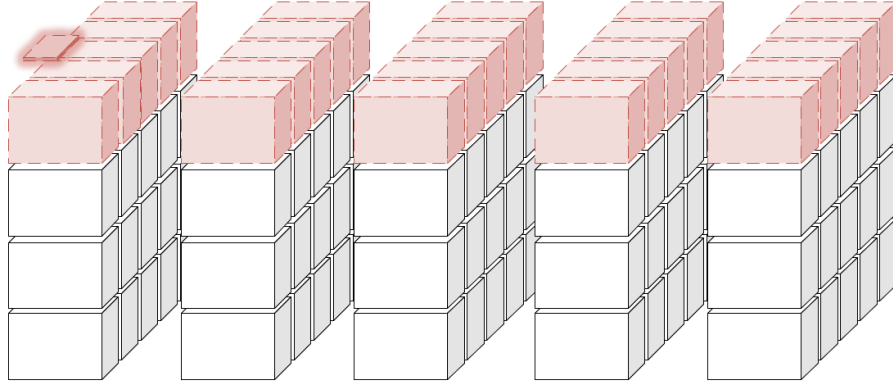
RKD/GS iki temel operasyonel süreçte dayanmaktadır. Bunlardan ilki, kutuların depolama alanından çıkarılarak sipariş toplama bölgesine taşınmasını ifade eden geri alma sürecidir. İkincisi ise, sipariş alma işlemi kutuların yeniden depolama alanına yerleştirilmesini kapsayan depolama sürecidir.



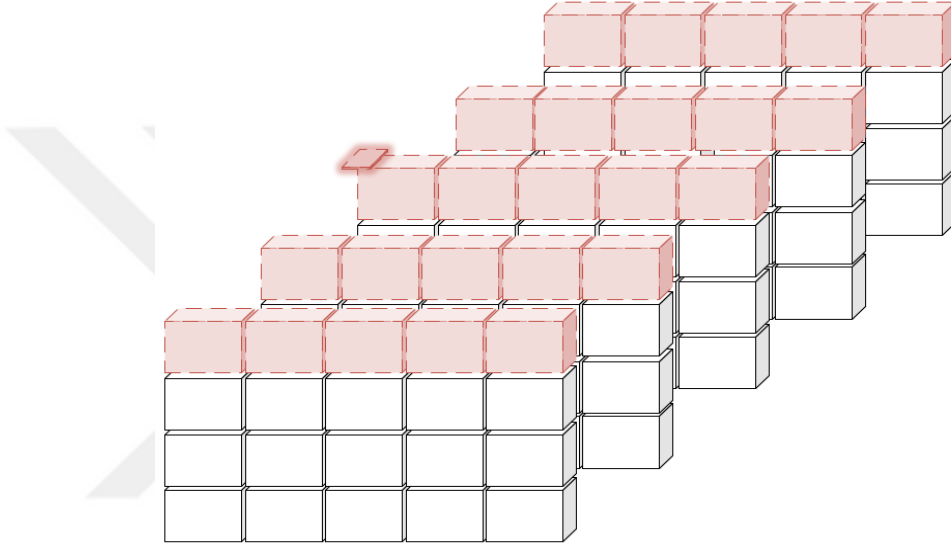
Şekil 3. RKD/GS tam görünüm

Siparişin sisteme ulaşmasıyla birlikte geri alma süreci başlatılmaktadır. Bu süreçte robot, hedef kutuyu almak üzere harekete geçer. Şekil 3'te RKD/GS sisteminin genel görünümü verilmiştir. Burada z ekseninin en üst kısmında yer alan kırmızı renkli katman robotların hareket alanını ifade etmektedir. Y ekseninin orta bölümünde bulunan bölge ise sipariş toplama alanını (STA) göstermektedir. Kırmızı katmanın altında konumlanan bölüm, depolama ızgarasını oluşturmaktadır. Depolama ızgarası, ürünlerin istiflendiği kutuların bulunduğu ve depolama sisteminin temel yapısını oluşturan ana bölgedir.

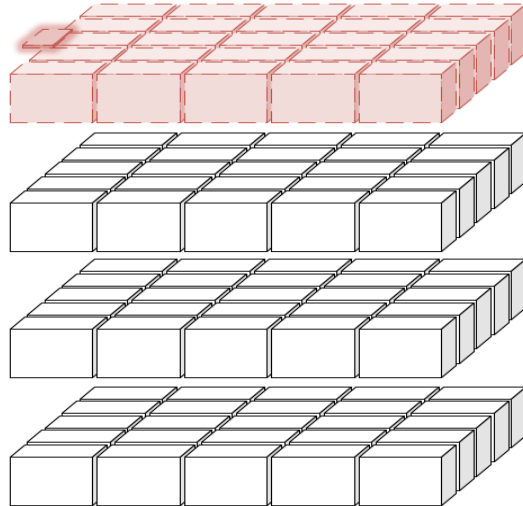
Depolama sisteminin en üst düzeyinde konumlanan robot, x (Şekil 4) ve y (Şekil 6) eksenlerinde yatay hareket ederek, hedef kutunun bulunduğu z eksenini (Şekil 5) koordinatına ulaşır. Eğer hedef kutu yığının en üstünde yer alıyorsa, doğrudan alınarak STA'ya taşınmaktadır. Ancak hedef kutunun üzerinde başka kutular bulunması durumunda robot, öncelikle üstteki kutuları kaldırarak hedef konuma en yakın x eksenini doğrultusunda belirlenen uygun alanlara geçici olarak istiflemektedir. Bu işlem, hedef kutuya ulaşılan kadar sürdürülmektedir.



Şekil 4. x Eksenli katman görünümü



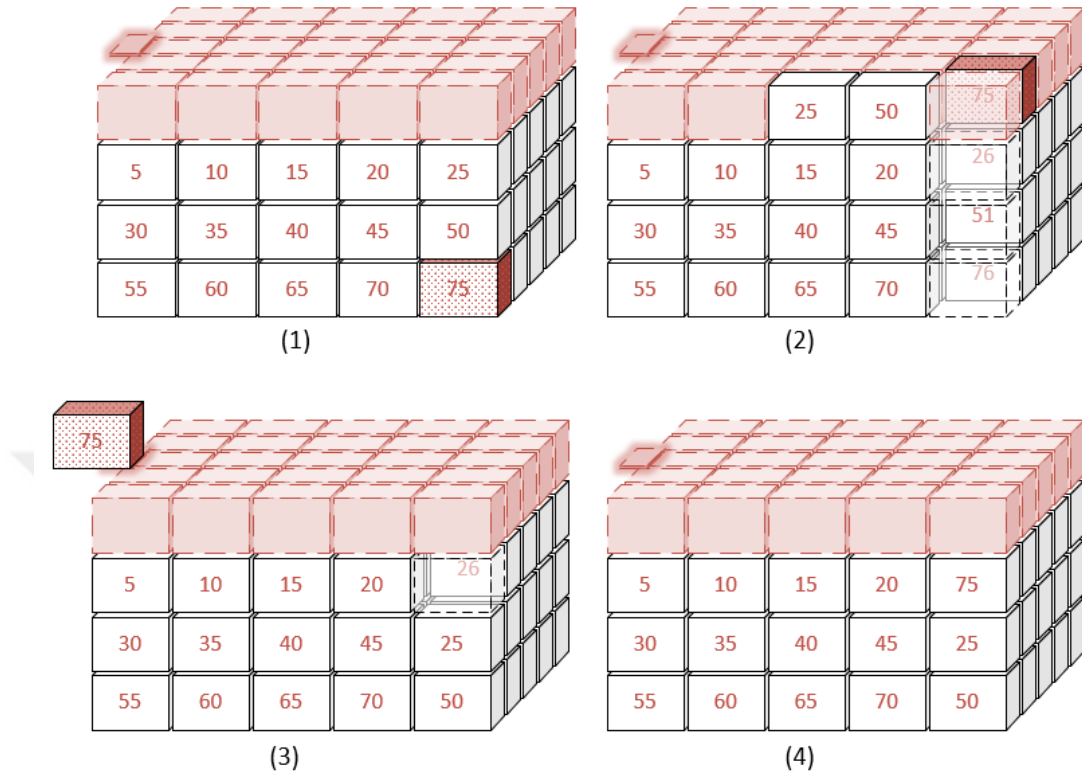
Şekil 5. y Eksenli katman görünümü



Şekil 6. z Eksenli katman görünümü

Hedef kutuya ulaşıldığında, ilgili kutu alınarak en yakın y eksenli yönünde taşınır. Daha önce geçici olarak yerleştirilen kutular, geri alma işleminin başlangıç noktasından itibaren

yeniden üst üste istiflenerek var olan yığının bir parçası hâline getirilir. Böylece, z ekseninin üstü yeniden boşaltılmış olur. Robot, hedef kutuyu x ve y eksenlerinde yatay hareketlerle STA'ya taşır ve bu aşamada geri alma süreci tamamlanır.



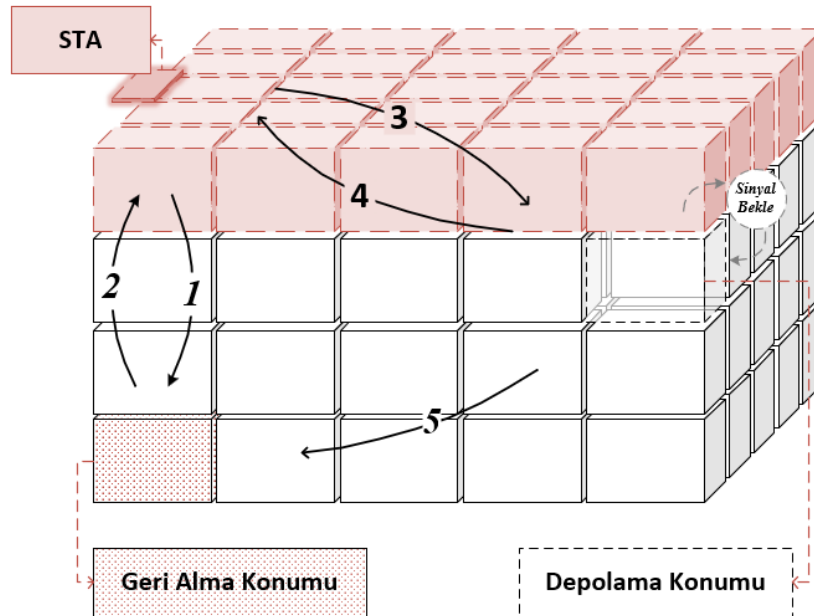
Şekil 7. Yığından geri alma ve depolama işlemlerinin gerçekleşmesi

Örneğin, Şekil 7’de x, y, z sırasıyla 5,5,3 boyutlarında bir depolama sistemi verilmiştir. Bu depolama ızgarasındaki kutular z ekseninin en üst bulunan katmandan başlanmak üzere y eksenini yönünde 1’den 75’e kadar numaralandırılmıştır. Bu sistemde 75 numaralı kutuda bulunan bir siparişin alınabilmesi için öncelikle 25 numaralı kutu, ardından 50 numaralı kutu x eksenini yönünde yerleştirilir. Daha sonra 75 numaralı kutu bulunduğu yığından alınarak y eksenini yönündeki geçici konumlardan birine bırakılır. Bu aşamanın ardından 50 ve 25 numaralı kutular sırasıyla yığına geri yerleştirilir; bu işlem sırasında en alt katmanda bulunan 75 numaralı kutu çıkarıldığı için, kutular önce 75 numaralı kutunun önceki yerinden başlayarak yerleştirilir ve üst katman boş bırakılır. Son olarak, 75 numaralı kutu STA’ya taşınarak işlem tamamlanır. STA’ya ulaştırılan kutulardan siparişe konu olan ürünler alınır ve kutular tekrar depolamaya uygun hâle getirilir. Bu noktada, sistemde depolama süreci devreye girer. Depolama için hazır durumda bekleyen kutular, sistem içerisinde rastgele bir boş konum arar. Uygun bir koordinat belirlendiğinde, robot yeniden yönlendirilerek STA’ dan kutuyu alır ve belirlenen z ekseninin en üstünde bulunan boş konuma kutuyu yerleştirir. Böylelikle depolama işlemi tamamlanmış olur.

RDK/BS, yüksek sipariş hacmine yanıt verebilen esnek ve olay tabanlı bir yapıya sahiptir. Sistem, her bir kutunun depolanması ya da geri alınması gerekip gerekmediğini, o kutunun halihazırda hangi konumda bulunduğunu (depolama konumu, geri alma konumu, STA) ve robotun mevcut operasyonel durumunu (meşgul-hazır) göz önünde bulundurarak karar verir.

Robotlar sistem içerisinde sürekli hareket hâlinindedir. İş yüküne bağlı olarak bazen bir siparişin ardından doğrudan yeni bir sipariş gelirken, bazen de ardışık depolama işlemleriyle karşılaşılır. Bu senaryolar, robotun bir noktadan diğerine olan geçişlerini belirler. Örneğin, bir siparişin tamamlanmasının hemen ardından kutunun tekrar depolanması gerekebilir. Bu durumda robot, STA' dan çıkarak ilgili depolama bölgesine yönelir. Bir başka durumda, iki geri alma işlemi art arda gerçekleşebilir ve robot, bir kutuyu teslim ettikten sonra hemen yeni bir sipariş için diğer kutuya yönelir. Benzer şekilde, depolama işlemleri arka arkaya geldiğinde robot tekrar tekrar STA' ya dönerek yeni kutuları taşır. Alternatif olarak, depolama işleminin ardından sistem bir sipariş talebi oluşturabilir; bu durumda robot, bulunduğu konumdan doğrudan yeni kutuyu almaya yönelir.

Şekil 8'de senaryolara ait işlem rotaları gösterilmektedir. Buna göre, geri alma ardından depolama süreci 1-2-3 rotasını izlemektedir. Ardışık iki geri alma işlemi için rota 1-2-1-2 şeklindedir. Ardışık iki depolama işlemi 3-4-3-4 rotasını takip etmektedir. Son olarak, depolama ardından geri alma sürecinde izlenen rota 3-5-2 olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 8. RDK/GS süreç rotaları

Robotun hareketleri, belirli komutlarla değil, sistemdeki sinyal trafiğine dayalı olarak dinamik biçimde tetiklenir. Her bir işlemten sonra sistemde yeni bir talep oluşmamışsa, robot

aktif bir görev verilene kadar bulunduğu konumda beklemeye geçer. Bu bekleme durumu, sistemin enerji ve kaynak kullanımını optimize eden yapısal bir tercihtir.

Bu operasyonel döngüde dikkat çeken unsur, işlemlerin katı bir sıraya göre değil, esnek ve talep odaklı biçimde gerçekleşmesidir. Böylece robotlar, değişen depo yoğunluğuna ve sipariş davranışlarına göre farklı operasyon kombinasyonlarını kendi akışı içinde sürdürebilir. Sistem bu yönü ile hem zaman kaybını azaltmayı hem de verimliliği artırmayı hedefler

Matematiksel Model

Matematiksel modeller oluşturulurken Tutam ve ark. (Tutam *et al.* 2023) tarafından yayımlanan çalışma temel alınmış, kurulan simülasyon modeline uyum sağlayacak şekilde gerekli uyarlamalar yapılmıştır. Bu doğrultuda, modeller hem sistem boyutlarının belirlenmesinde hem de zaman hesaplamalarının gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır.

Tablo 1. Depolama Sistemi Boyutları İçin Parametreler

Parametreler	Açıklama
k_x	x eksenli kutu boyutu
k_y	y eksenli kutu boyutu
t_x	x eksenindeki toplam kutu sayısı
t_y	y eksenindeki toplam kutu sayısı
t_z	z eksenindeki toplam kutu sayısı
N	Toplam kutu sayısı

Depolama sistemi boyutları için kullanılan formüller:

$$t_x = \sqrt{\frac{k_y}{2k_x}} \sqrt{\frac{N}{t_z}} \quad t_y = \sqrt{\frac{2k_x}{k_y}} \sqrt{\frac{N}{t_z}} \quad (1)$$

Depolama sistemi zaman hesaplamaları için kullanılan formüller:

Tablo 2. Depolama Zaman Hesaplamaları için Parametreler

Parametreler	Açıklama
k_x	x eksenli kutu boyutu
k_y	y eksenli kutu boyutu
t_x	x eksenindeki toplam kutu sayısı
t_y	y eksenindeki toplam kutu sayısı
t_z	z eksenindeki toplam kutu sayısı
N	Toplam kutu sayısı
b_x	Geri alma konumu x koordinatı

Tablo 2. (devamı)

b_y	Geri alma konumu y koordinatı
b_z	Geri alma konumu z koordinatı
d_x	Depolama konumu x koordinatı
d_y	Depolama konumu y koordinatı
d_z	Depolama konumu z koordinatı
g_x	x konumu koordinatı
g_y	y konumu koordinatı
g_z	z konumu koordinatı
v_x	x eksenindeki robot hızı
v_y	y eksenindeki robot hızı
v_z	z eksenindeki robot hızı

Şekil 8’ de belirtilen taşıma rotalarına göre matematiksel model aşağıda verilmiştir.

Rota 1- Robotun kendisine iletilen bir sipariş talebi sonrasında STA’ dan ilgili geri alma konumuna doğru başlattığı ilk hareket aşamasını ifade etmektedir. Bu rota kapsamında robot, herhangi bir dikey konum değiştirme gereksinimi olmaksızın, yalnızca x ve y eksenlerindeki yatay düzlem hareketlerini gerçekleştirerek hedef noktaya ulaşır. Böylece robot, geri alma işlemini başlatmak üzere gerekli konumlanmayı tamamlamış olur.

$$|b_y - 0.5 - 0.5t_y| \frac{k_y}{v_y} + (g_x - 0.5) \frac{k_x}{v_x} \quad (2)$$

Rota 2 – Robotun geri alma konumuna ulaştıktan sonra ilgili kutuyu alma sürecini ifade eden bu aşamada, robot ilk olarak kutunun bulunduğu z eksenı üzerindeki konuma doğru dikey bir konumlanma hareketi gerçekleştirir ve alma işlemini tamamlar. Kutuyu kavradıktan sonra, sistemin gerektirdiği taşıma dizisine uygun olarak x ve y eksenlerinde yatay düzlemde hareket ederek kutuyu STA’ya taşır.

$$|b_y - 0.5 - 0.5t_y| \frac{k_y}{v_y} + (g_x - 0.5) \frac{k_x}{v_x} + \frac{g_z^2 k_z}{v_y} + (g_z^2 - g_z) \frac{k_x}{v_x} \quad (3)$$

Rota 3 ve Rota 4 – Her iki rota da depolama süreçlerine yönelik operasyonları temsil etmekte olup, hareket bileşenleri ve karar adımları açısından aynı formülasyon yapısını paylaşmaktadır. Rota 3 kapsamında robot, STA’da depolanmak üzere hazır durumda bekleyen kutuları alır ve bunları ilgili depolama konumuna doğru taşıyarak depolama sürecini gerçekleştirir. Rota 4’te ise bu sürecin tersi gerçekleşir; robot depolanacak kutuları almak üzere depolama konumundan STA’ ya hareket eder.

$$|d_y - 0.5 - 0.5t_y| \frac{k_y}{v_y} + (g_x - 0.5) \frac{k_x}{v_x} \quad (4)$$

Rota 5 – Bu rota sistemdeki diğer rotalardan farklı olarak, robotun bir depolama işlemini tamamladıktan sonra STA’ya geri dönmeden doğrudan geri alma yapılacak konumuna yöneldiği özel bir hareket dizisini ifade eder.

$$|d_x - b_x| \frac{k_x}{v_x} + |d_y - b_y| \frac{k_y}{v_y} \quad (5)$$

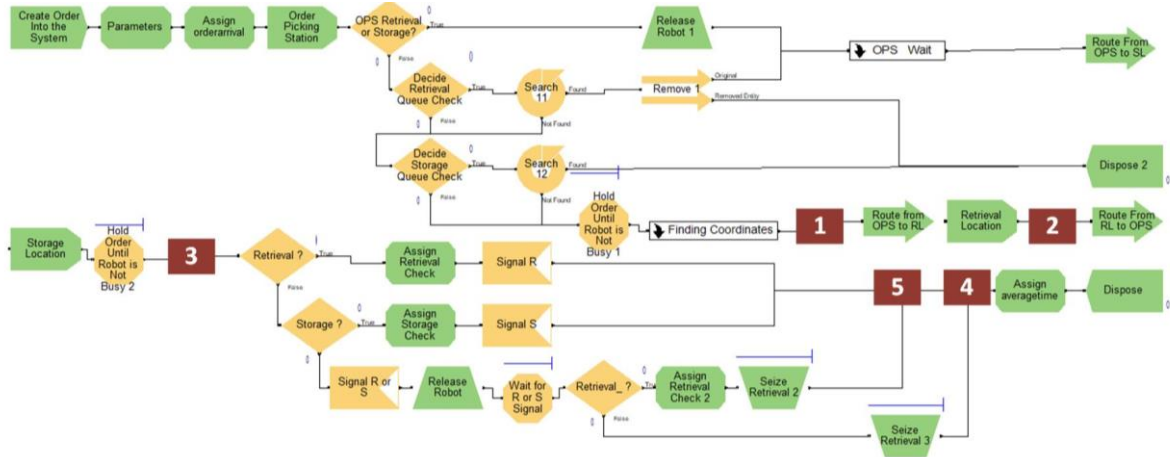
Simülasyon Modeli

Bu çalışmada, depo optimizasyonunu incelemek amacıyla ARENA yazılım paketi kullanılmıştır. Sistem üzerindeki çeşitli faktörler dikkate alınarak simülasyon modeli geliştirilmiş ve bu model, genel akış şeması temel alınarak yapılandırılmıştır. Aşağıda sunulan akış şeması (Şekil 9), simülasyon sürecinin temel adımlarını ve işleyişini göstermektedir.

Geliştirilen RKD/GS simülasyon modeli, sisteme bir siparişin gelmesiyle başlayan ve robotun izlediği yolları ayrıntılı olarak tanımlayan operasyon adımlarını kapsamaktadır. Modelin yapısı, depolama sisteminde gerçekleştirilen operasyonları üç ana kategori altında toplamaktadır. İlk kategori, depolama sisteminden sipariş edilen kutuların alınmasına yönelik geri alma sürecini; ikinci kategori, kutuların depolama sistemine yeniden yerleştirilmesini içeren depolama sürecini; üçüncü kategori ise her iki süreci de yöneten genel sistem operasyonlarını ifade etmektedir.

alma kuyruğunda bulunuyorsa sistem aynı kutuya yönelik yeni işlemi işleme almamakta; ancak sipariş depolama kuyruğunda ise mevcut işlemin bitiminde kutu STA' ya yönlendirilmektedir.

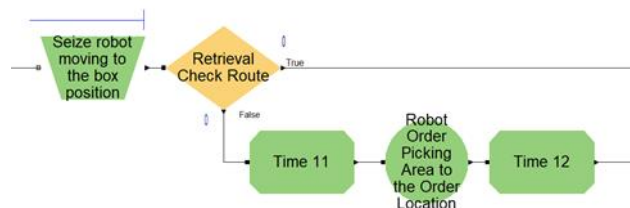
Herhangi bir operasyonu tetikleyen bir olay bulunmadığında sistem bekleme moduna geçmektedir. Bu durumda robot mevcut konumunda sabit kalmakta; depolama konumundaysa orada, sipariş STA' da ise istasyon içerisinde bir sonraki operasyonu beklemektedir.



Şekil 10. Simülasyon ARENA görüntüsü

Operasyon akışında sistem, karar noktalarında işlemin türünün (geri alma veya depolama), ilgili kutunun geri alma veya depolama kuyruğunda bulunup bulunmadığının ve robotun meşguliyet durumunun değerlendirmesini yapmaktadır. Sipariş yoğunluğu ve işlem sırası, uygulanacak operasyon senaryosunu belirlemektedir. Şekil 8’de sunulan rotalar, simülasyon modelinde de aynı karar yapısı ve operasyon mantığı temel alınarak uygulanmıştır. Bu nedenle, Şekil 10’de verilen Arena genel görünümünde yer alan numaralandırmalar da ilgili rotalara karşılık gelecek şekilde düzenlenmiştir.

Şekil 11’de sunulan 1 numaralı detay görüntü, Rota-1’in süre hesaplamalarında kullanılan Arena modüllerini göstermektedir. Simülasyonun genel akışında robot bir kaynak (resource) olarak tanımlandığından, süreç Seize modülü ile robotun göreve atanmasıyla başlatılmaktadır. Robotun uygunluk durumu ve geri alma şartları kontrol edildikten sonra operasyon adımına geçilir. Geri alma süresinin modellenmesi amacıyla Delay modülü kullanılarak ilgili işlem süreleri hesaplanır. Bu akış sayesinde robotun kaynak kullanım mantığı ve geri alma operasyonlarının zamanlaması tutarlı bir şekilde simülasyon modeline yansıtılmış olur.



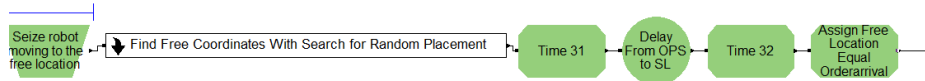
Şekil 11. 1 numaralı detay görüntü

Benzer şekilde, Şekil 12’de yer alan 2 numaralı detay görüntü, Rota-2’nin süre hesaplamalarında kullanılan alt modülü göstermektedir. Bu alt modelde robot, z eksenindeki alma işlemini gerçekleştirmek için kutunun bulunduğu katmana bağlı olarak Şekil 7’de belirtilen işlem adımlarını uygular. Rota-1’de olduğu gibi süre hesaplamaları Delay modülü aracılığıyla yürütülür. İşlem tamamlandıktan sonra, sonraki adımlarda kullanılmak üzere gerekli nitelik ve özellik atamaları gerçekleştirilir.



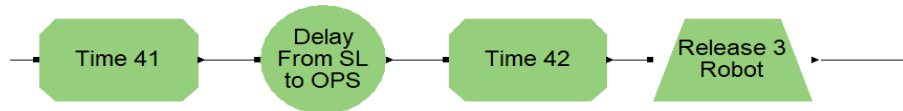
Şekil 12. 2 numaralı detay görüntü

Şekil 13’te Rota-3’e ait modüller sunulmaktadır. Bu rota depolama operasyonunu içerdiği için ek işlem adımlarına sahiptir. Depolanacak kutunun rastgele yerleştirileceği uygun boş konumların belirlenmesi amacıyla ilgili kontrol ve seçim modülleri alt modele dâhil edilmiştir. Böylece Rota-3, hem hareket hem de depolama kararlarının eşzamanlı olarak yönetildiği kapsamlı bir süreç akışı sunmaktadır.



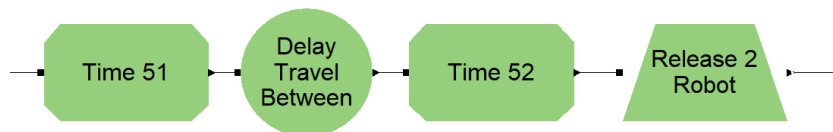
Şekil 13. 3 numaralı detay görüntü

Şekil 14’te Rota-4’e ait, depolanacak kutunun alınmasına yönelik modüller gösterilmektedir. Bu rota, kutunun depolama konumundan geri alınmasına dair temel kontrol ve işlem adımlarını içermektedir. Böylece Rota-4, alım sürecinin modelde temsil edildiği aşamayı oluşturmaktadır.



Şekil 14. 4 numaralı detay görüntü

Şekil 15’de verilen detay görüntü, Rota-5’e ait süre hesaplamalarının modelde nasıl uygulandığını göstermektedir. Bu alt modelde ilgili operasyon adımları sıralı olarak yürütülmekte ve işlem süreleri Delay modülü aracılığıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 15. 5 numaralı detay görüntü

Simülasyon modeli ARENA yazılımında, iki boyutlu matrisler üzerinden kurgulanmıştır. Üç boyutlu bir depolama sistemi, belirli formülasyonlar ve ifadeler kullanılarak iki boyutlu bir matris yapısında temsil edilmiştir. Örneğin, aşağıda yer alan Şekil 16'da ARENA' daki iki boyutlu matrisin bir bölümünü göstermektedir. Matrisin ilk satırı robotların hareket alanını ifade etmektedir. Bu satırda 1111111 değerinin kullanılma nedeni, kutu numaralarından farklı ve benzersiz bir sayı olmasıdır; böylece kutular ile hareket alanı net bir şekilde ayırt edilebilmektedir.

İlgili matris, x, y, z eksenleri sırasıyla 5, 5 ve 3 boyutlarında tasarlanmış bir depolama sistemine aittir (Şekil 7). İki boyutlu matris görünümünde satırlar, sistemin z eksenini; sütunlar ise x ve y eksenlerini temsil etmektedir. Search modülü kullanılarak sistemdeki kutuların yerleri tespit edilmekte; bu sayede iki boyutlu dizi içerisinde kutuların satır ve sütun konumları belirlenmektedir. Örneğin, iki boyutlu matris üzerinde (1, 3) konumuna karşılık gelen 26 numaralı kutu depolama sisteminde (x, y, z) koordinatları (1, 1, 2) olarak belirlenmektedir.

Initial Values										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
4	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60

Şekil 16. 2 boyutlu matris görünümü

Simülasyon modeli, matris yapısı üzerine kurgulandığından, tüm operasyon adımları sisteme entegre edilmiştir. Örneğin, Şekil 7'de gösterilen senaryoda, belirli kutular geçici olarak x eksenini boyunca istiflenmekte, siparişin bulunduğu kutu ise geçici olarak y eksenine bırakılmaktadır. Bu süreç, ilk bakışta tekdüze ve olay akışına bağlı olarak gerçekleşen basit bir işlem gibi görünse de simülasyon yazılımının çalışma prensipleri ve sistem kısıtları nedeniyle model geliştirme sürecinde önemli yapısal düzenlemeler gerektirmiştir.

Örneğin, x ekseninin orta bölgesinde yer alan bir kutu, rahatlıkla eksenin sağ tarafına taşınabilmekte ve bu taşıma, sistemde tanımlı değişkenler aracılığıyla matris içinde yeni konumlara aktarılabilir. Ancak, x ekseninin en sağında bulunan bir kutu için daha sağa yerleşim olanağı bulunmadığından, sistemsel hatalar oluşmaktadır. Bu sorunun önüne geçmek ve sistemin dinamik yapısını güçlendirmek amacıyla, katman yerleştirme algoritmasına ek bir koşul tanımlanmıştır. Buna göre, x ekseninde orta noktadan büyük olan konumlar sol taraftan sağa doğru; orta noktadan küçük olan konumlar ise sağ taraftan sola doğru yerleştirilmektedir.

Benzer şekilde, y ekseninde de eşdeğer bir kısıt bulunmaktadır. Eğer sipariş kutusu, y ekseninin en son konumuna taşınmak zorunda ise, mevcut sistemde bir sonraki pozisyon olmadığı için işlem kilitlenmektedir. Bu durumu önlemek amacıyla, y ekseninin son konumundaki katman yerleşimi için özel bir düzenleme geliştirilmiştir.

Ayrıca, sistem boyutları büyüdüğünde bu tür sınır durumlar daha sık ortaya çıkmakta ve taşıma yönlerinin planlanmasında ek karmaşıklıklar oluşmaktadır. Boyut artışıyla birlikte hem x hem de y eksenlerinde uygulanacak yerleştirme mantığının esnek ve ölçeklenebilir olması gerekmektedir. Bu nedenle, geliştirilen algoritma yalnızca mevcut boyutlar için değil, farklı ölçeklerdeki depolama sistemlerine de uyarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Varsayımlar

Simülasyon modelini gerçekçi sistem dinamikleriyle tasarlamak için aşağıdaki varsayımlar yapılır:

- Sistem işlemleri her zaman bir geri alma işlemiyle başlar.
- Varlıklar, işleme sürecinde İlk Giren İlk Çıkar (FIFO) kuralını izler.
- Siparişler arası varış süreleri üstel dağılıma uygundur.
- Tek bir robot kullanılır.
- Robotun ivmelenmesi ve kutu yakalama süresi göz ardı edilir.
- Robot hem geri alma hem de depolama işlemlerini gerçekleştirir.
- Simülasyonun başlangıcında robot, y ekseninin merkezinde bulunan STA üzerinde konumlanır.
- STA, kutuları 2 dakika boyunca tutar.
- Depolama sistemi rastgele bir depolama politikası benimser.
- Simülasyonun başlangıcında depo tamamen dolu kabul edilir.
- Her model çalıştırması toplam 100.000 sipariş alımını kapsar.
- Model, 20 bağımsız replikasyon ile tekrarlanır.

Senaryolar

RKD/GS'nin optimal tasarım boyutları ve çeşitli operasyonel parametreler altında performansı simülasyon yöntemiyle analiz edilmiştir. Gerçek ortamda uygulanması güç olan alternatif tasarım ve kontrol stratejileri, sanal ortamda modellenerek karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada ele alınan başlıca parametreler; robot hızı, depo boyutları, istif yüksekliği, varışlar arası süreler ve toplam kutu sayısıdır. Bu doğrultuda 144 farklı senaryo kurgulanmış, her bir senaryo 20 replikasyon ile çalıştırılarak toplam 2880 simülasyon gerçekleştirilmiştir. Tüm model çalışmaları yaklaşık 81 gün sürmüş ve ARENA 16.0 yazılımı kullanılmıştır. Literatürdeki pek çok araştırma kuyruk oluşumunun gözlenmediği durumlara odaklanırken, bu çalışmanın özgün katkısı; kuyruk oluşumunun da incelendiği, farklı gelişler arası sürelerin test edildiği ve değişen robot hız seviyelerinin analiz edildiği kapsamlı bir simülasyon modeli sunmasıdır. Bu bağlamda, RKD/GS tasarımında temel değişkenlerin

etkilerini ve etkileşimlerini değerlendirmek amacıyla senaryolar geliştirilmiştir. Tasarım değerlendirmelerinde toplam kutu sayısı

5.000 ve 10.000 adet olarak iki seviyede ele alınmış, istif yüksekliği 3 ile 10 arasında değiştirilmiştir. Kuyruk ve bekleme sürelerinin detaylı incelenebilmesi için varışlar arası süre 500, 5 ve 1 dakikaya ayarlanarak sistem performansına etkileri gözlemlenmiştir. Robot hız senaryoları ise üç seviyede tasarlanmıştır: yavaş (2, 2, 1.2 m/s), orta (3, 3, 1.6 m/s) ve hızlı (4, 4, 2 m/s) olup, bu değerler robotun x, y ve z eksenlerindeki hareket kabiliyetlerini temsil etmektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Senaryo Değişkenleri

Değişkenler	Seviyeler
Toplam kutu sayısı	5000,10000
İstif Yüksekliği	3,4,5,6,7,8,9,10
Varışlar arası süre	1,5,500
Robot Hızları	Yavaş (2,2,1.2),Orta (3,3,1.6),Hızlı (4,4,2)

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Boyutların Tablosu

Matematiksel model bölümünde, Eşitlik (1) kullanılarak elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Simülasyon çalışmasında ise 5000 ve 10,000 birimlik durumlar incelenmiştir.

Tablo 4, Eşitlik (1) kullanılarak 5000 birimlik senaryo için hesaplanan x , y ve z boyutlarını ve bu boyutlardan elde edilen toplam depo hacmini göstermektedir. Bu tablo, orta ölçekli bir depo için formül çıktılarının nasıl bir tasarım boyutu oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4. 5000 Kutu İçin Depo Boyutları

5000			
k_z	k_x	k_y	N
3	34	50	5100
4	29	44	5104
5	26	39	5070
6	24	36	5184
7	22	33	5082
8	21	31	5208
9	20	29	5220
10	19	28	5320

Tablo 5 ise aynı formülün 10.000 birimlik senaryoya uygulanmasıyla elde edilen x , y ve z boyutları ile toplam depo hacmini sunmaktadır. Böylece daha büyük bir sistem için formülün ürettiği tasarım boyutları açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5. 10000 Kutu İçin Depo Boyutları

1000			
k_z	k_x	k_y	N
3	48	71	10224
4	41	62	10168
5	37	55	10175
6	34	50	10200
7	31	47	10199
8	29	44	10208
9	28	41	10332
10	26	39	10140

Model Doğrulama Tablosu

Siparişlerin sisteme varış süreleri başlangıçta 500 dakika olarak belirlenmiştir. Bu seçim, sistemde kuyruk oluşumunu önlemek ve temel operasyonel performansı ölçmek amacıyla yapılmıştır. Simülasyon modelinin doğruluğunu teyit etmek için elde edilen sonuçlar, daha önce gerçekleştirilen çalışmalarla ilişkilendirilmiştir. Bu kapsamda, aşağıdaki tabloda sunulan 500 dakikalık sipariş geliş hızı temelinde yapılan simülasyon çıktıları, Tutam *et al.* (2023) ve Tutam, (2024) tarafından geliştirilen matematiksel model ile uyumlu bulunmuştur. Yapılan analizler, simülasyon sonuçları ile literatürdeki hesaplamalar arasında binde birin altında bir hata payı olduğunu göstermektedir. (Tablo 6)

Tablo 6. Matematiksel Model İle Simülasyon Modelinin Karşılaştırılması

k_z	Matematiksel Model			Simülasyon Modeli		
	yavaş	orta	hızlı	yavaş	orta	hızlı
3	44,94	30,07	22,60	44,96	30,08	22,61
4	40,62	27,25	20,52	40,63	27,26	20,52
5	38,55	25,95	19,58	38,55	25,95	19,58
6	37,93	25,64	19,38	37,93	25,63	19,38
7	38,36	26,03	19,73	38,36	26,03	19,72
8	39,57	26,97	20,49	39,57	26,96	20,48
9	41,56	28,43	21,65	41,56	28,44	21,65
10	43,88	30,13	23,00	43,89	30,14	23,00

Simülasyon Sonuçları

Tablo 7 ve Tablo 8’de, RKD/GS için farklı tasarım senaryolarına ilişkin beklenen operasyon sürelerini kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Bu senaryolar, kutu sayısının, yığma yüksekliğinin, sipariş varış aralığının ve robot hızının değişen seviyelerinde sistem performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Tablo 7’de 5000 birimlik senaryoda katman sayısı arttıkça işlem sürelerinde düzenli bir artış görülmektedir. Robot hızının yavaş–orta–hızlı olarak değiştirilmesi tüm katmanlarda süreleri belirgin biçimde düşürmüştür. Farklı parametre değerlerinde aynı eğilim korunarak sistemin hız ve katman yapısına duyarlı olduğu gözlenmiştir.

Tablo 7. 5000 Kutu İçin Senaryo Bazlı Simülasyon Sonuçları

	500 dk			5 dk			1 dk		
k_z	yavaş	orta	hızlı	yavaş	orta	hızlı	yavaş	orta	hızlı
3	32,35	21,68	16,30	33,86	22,68	17,02	33,70	22,69	17,12
4	29,82	20,05	15,12	32,82	22,05	16,52	32,57	22,10	16,76
5	28,81	19,46	14,72	33,80	22,78	17,04	33,42	22,85	17,45
6	29,28	19,86	15,05	36,84	24,87	18,62	36,09	24,92	19,09
7	30,81	21,00	15,95	39,58	27,56	21,22	39,57	27,56	21,22
8	32,02	21,93	16,71	44,58	30,63	23,17	43,65	30,38	23,36
9	34,38	23,64	18,06	51,30	35,41	26,86	49,51	34,80	26,93
10	37,26	25,82	19,72	59,02	41,00	31,22	56,31	39,77	30,91

Tablo 8’de 10.000 birimlik senaryoda işlem sürelerinin tüm katmanlarda 5000 birimlik senaryoya kıyasla daha yüksek gerçekleştiği görülmektedir. Katman sayısı arttıkça sürelerdeki artış eğilimi korunurken, robot hızının yükselmesi süreleri her durumda belirgin biçimde azaltmıştır. Üç farklı parametre değerinde benzer eğilimlerin sürmesi, sistemin ölçek büyüdüğünde de hız ve katman yapısına duyarlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 8. 10000 Kutu İçin Senaryo Bazlı Simülasyon Sonuçları

	500 dk			5 dk			1 dk		
k_z	yavaş	orta	hızlı	yavaş	orta	hızlı	yavaş	orta	hızlı
3	44,96	30,08	22,61	46,30	31,02	23,32	46,14	30,97	23,31
4	40,63	27,26	20,52	43,25	29,10	21,89	42,92	28,96	21,85
5	38,55	25,95	19,58	42,94	29,00	21,83	42,43	28,82	21,87
6	37,93	25,63	19,38	44,47	30,17	22,76	43,71	29,91	22,80
7	38,36	26,03	22,73	47,49	32,40	24,48	46,44	31,98	24,48
8	39,57	26,96	20,48	50,70	34,77	26,38	49,87	34,49	26,46
9	41,56	28,44	21,65	56,28	38,78	29,50	54,84	38,16	29,37
10	43,89	30,14	23,00	62,60	43,37	33,08	60,48	42,29	32,67

Analiz sonuçlarına göre, kutu sayısının artmasıyla birlikte, özellikle kuyruk oluşmayan durumlarda yığma yüksekliğinin 6 kata kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, daha fazla kutu kapasitesinin depolama alanında daha dikey bir yerleşim stratejisi gerektirdiğini göstermektedir.

Kuyrukların var olduğu senaryolarda ise, orta hız seviyesinde çalışan robotlar için optimal yığma yüksekliği 5 kat olarak belirlenmiştir. Bu noktada robot hızı ve sipariş varış aralığının etkileşimi belirleyici olmaktadır. Robot hızı arttıkça ve siparişlerin daha sık gelişine bağlı olarak sistemdeki operasyonel yük de yükselmektedir; buna bağlı olarak, yığma

yüksekliği ise sipariş yoğunluğuna paralel olarak azalmaktadır. Örneğin, siparişler arası zamanın 500 dakika olduğu düşük yoğunluk senaryolarında yığma yüksekliği 6 kat seviyesinde kalırken, sipariş yoğunluğunun 5 dakikaya düşürüldüğü orta yoğunluk senaryosunda bu yükseklik 5 kata inmektedir. En yüksek sipariş yoğunluğunun (1 dakikalık varış aralığı) söz konusu olduğu senaryoda ise yığma yüksekliği 4 kata kadar azalmaktadır.

Bu sonuçlar, sipariş geliş hızı ve dolayısıyla kuyruk oluşumunun yığma yüksekliğinin belirlenmesinde daha etkin faktörler olduğunu ortaya koymaktadır. Yığma yüksekliğinde, kutu sayısının artması yığma stratejisini daha dikey hale getirirken, kuyruk varlığının etkisi ise sınırlı kalmakta ve yalnızca bir katlık küçük bir azalma şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Robot hızının etkisi incelendiğinde ise, hızın beklenen operasyon süreleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu, ancak yığma yüksekliğini değiştirmediği anlaşılmaktadır. Bu bulgu, robotun hızı ve hareket kabiliyetinin sistemin fiziksel yerleşiminden ziyade operasyonel verimlilik ve işlem süresi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Robot hızı yüksek olduğunda, işlemler daha hızlı tamamlanmakta ve sistemin genel verimliliği artmaktadır; ancak depolama düzeni ve yığma yüksekliği gibi fiziksel parametreler bu hız artışından etkilenmemektedir.

Sonuç olarak, RKD/GS tasarımında yığma yüksekliğinin optimize edilmesinde, kutu sayısı ve sipariş varış hızı gibi temel sistem parametrelerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Robot hızının, genellikle sistem performansı ve operasyonel etkinlik üzerinde iyileştirici bir etkisi olduğu; ancak fiziksel tasarım kararlarını doğrudan etkileyip etkilemediğinin sistemin özelliklerine göre değişebileceği belirtilebilir. Bu kapsamlı değerlendirme, sistem tasarımcılarına hem kapasite yönetimi hem de operasyonel verimlilik açısından kritik girdiler sağlamaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, RKD/GS için geliştirilen ayrıntılı simülasyon modelleri aracılığıyla, sistemin temel tasarım parametrelerinin ve bu parametreler arasındaki etkileşimlerin operasyonel performansa etkilerini kapsamlı biçimde analiz etmektedir. Çalışmada ele alınan başlıca değişkenler; toplam kutu sayısı, istif yüksekliği, varışlar arası süre ve robot hızı olup, bu faktörlerin hem bağımsız hem de birbiriyle etkileşimli şekilde sistem verimliliğine nasıl yansıdığı incelenmiştir. Gerçek depo ortamlarında uygulanması maliyetli veya operasyonel açıdan zor olan senaryolar, ARENA 16.0 yazılımında modellenerek kontrollü şekilde test edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, hem tasarım optimizasyonu hem de operasyonel strateji geliştirme açısından literatürdeki mevcut araştırmalara kıyasla daha kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır.

Çalışmada, farklı depo kapasiteleri, istif yükseklikleri, talep hızları ve robot hızlarının oluşturduğu kombinasyonlar üzerinden çok sayıda senaryo incelenmiş ve elde edilen bulgular, performans açısından kritik faktörlerin öncelik sırasını ortaya koymuştur. Bulgular kısmında ayrıntılı olarak sunulduğu üzere, robot hızı, toplam kutu sayısı ve varışlar arası süre performans üzerinde en belirleyici değişkenler olarak öne çıkmaktadır.

Faktör önemi analizi, operasyonel verimliliği belirleyen en kritik değişkenin robot hızı olduğunu, bunu toplam kutu sayısı ve varışlar arası sürenin izlediğini ortaya koymuştur. İstif yüksekliği ise operasyon süresi üzerinde görece sınırlı bir etkiye sahiptir. Yüksek robot hızları, özellikle büyük depolarda istif yüksekliğini azaltarak erişim sürelerini kısaltmaktadır; ancak küçük ölçekli depolarda bu etki belirgin değildir. Çalışmanın literatüre özgün katkılarından biri, çoğu araştırmanın aksine kuyruk oluşumunun detaylı olarak analize dahil edilmesi ve farklı talep hızlarında kuyruk dinamiklerinin operasyonel performansa etkilerinin sistematik biçimde ortaya konulmasıdır.

Elde edilen sonuçlar, depo tasarımında kapasite, istif yüksekliği, robot hızı ve talep hızı gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesinin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmaların, modeli farklı yönlendirme stratejileri, robot sayısının artırılması ve dinamik görev önceliklendirme yöntemleriyle genişleterek sistemin esnekliğini ve verimliliğini artırması önerilmektedir. Ayrıca, hızlanma-yavaşlama dinamiklerinin, tıkanıklık yönetiminin ve robot-port görev atama optimizasyonunun modele entegre edilmesi, daha gerçekçi operasyon senaryolarının incelenmesine olanak sağlayacaktır. Robot sayısındaki artışa bağlı olarak

Çarpışma  nleme algoritmaları ve yol optimizasyonu üzerine yapılacak çalışmalar da sistem güvenliği ve performansını geliştirecek önemli adımlar arasında yer almaktadır.



KAYNAKLAR

- Azadeh, K., De Koster, R., & Roy, D. (2019). Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments. *Transportation Science*, 53.
- Cai, D., Xiang, X., Lee, L. H., Chew, E. P., & Tan, K. C. (2023). Robot dispatching problem for compact storage and retrieval systems with dual-command transactions. *Engineering Optimization*, 1–22.
- Chen, X., Yang, P., & Shao, Z. (2022). Simulation-based time-efficient and energy-efficient performance analysis of an overhead robotic compact storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 119, 102560.
- Khai Jen, T., Wang, R., & Yang, P. (2024). Determining the I/O point policy in a robotic live-cube compact storage system. *International Journal of Production Research*, 62(19), 7056–7072.
- Ko, D., & Han, J. (2022). A rollout heuristic algorithm for order sequencing in robotic compact storage and retrieval systems. *Expert Systems with Applications*, 203, 117396.
- Trost, P., & Eder, M. (2024a). An analytical approach for the performance calculation of an RCS/RS with several picking stations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(1–2), 627–644.
- Trost, P., & Eder, M. (2024b). A performance calculation approach for a robotic compact storage and retrieval system (RCS/RS) serving one picking station. *Production and Manufacturing Research*, 12(1).
- Trost, P., Kartnig, G., & Eder, M. (2023). Simulation study of RCS/R-systems with several robots serving one picking station. *FME Transactions*, 51(2), 201–210.
- Tutam, M. (2022). Warehousing 4.0 in Logistics 4.0. In Ö. F. \{I\}yigün \{I\}smaail and Görçün (Ed.), *Logistics 4.0 and Future of Supply Chains* (pp. 95–118). Springer Nature Singapore.
- Tutam, M., Liu, J., & White, J. A. (2024a). Consideration of skewness in designing robotic compact storage and retrieval systems. *Expert Systems with Applications*, 248, 123361.
- Tutam, M., Liu, J., & White, J. A. (2023). Performance Analysis of a Class-based Robotic Compact Storage and Retrieval System. *IIE Annual Conference. Proceedings*, 1–6.
- Wang, R., Yang, P., Gong, Y., & Chen, C. (2024). Operational policies and performance analysis for overhead robotic compact warehousing systems with bin reshuffling. *International Journal of Production Research*, 62(14), 5236–5251.
- Yener, F., & Yazgan, H. (2023). Simulation of Re-Arrangement and Healing in Robotic Compact Bin-Storage System. *International Journal of Simulation Modelling*, 22, 100–109.
- Zou, B., Koster, R. De, & Xu, X. (2018). Operating policies in robotic compact storage and retrieval systems. *Transportation Science*, 52(4), 788–811.
- DemandSage, 2025. Ecommerce statistics. DemandSage, <https://www.demandsage.com/e-commerce-statistics/> (14.09.2025).

Backlinko, 2025. Ecommerce statistics. Backlinko, <https://backlinko.com/ecommerce-stats> (14.09.2025).



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Elif Ravza ÖZARAS
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği. Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Yöneylem Araştırmaları Derneği	