



**ROBOTİK KOMPAKT DEPOLAMA/BOŞALTMA  
SİSTEMLERİ'NİN İNCELENMESİ VE BİR  
SİMÜLASYON MODELİ**

**Elif Burcu KIZILIRMAK**

**Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ**

**Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN ÖZAYDIN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**2024**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ROBOTİK KOMPAKT DEPOLAMA/BOŞALTMA SİSTEMLERİ'NİN  
İNCELENMESİ VE BİR SİMÜLASYON MODELİ

(Investigation of Robotic Compact Storage/Retrieval Systems and A Simulation Model)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif Burcu KIZILIRMAK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ

İkinci Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN ÖZAYDIN

Erzurum  
Şubat, 2024

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

### ROBOTİK KOMPAKT DEPOLAMA/BOŞALTMA SİSTEMLERİ'NİN İNCELENMESİ VE BİR SİMÜLASYON MODELİ

Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ danışmanlığında, Elif Burcu KIZILIRMAK tarafından hazırlanan bu çalışma, 06/02/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Burak ERKAYMAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	.....
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	.....
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Betül TURANOĞLU ŞİRİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	.....
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Mahmut TUTAM <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	.....
İkinci Tez Danışmanı	Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN ÖZAYDIN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	.....

Enstitü Yönetim Kurulunun  
.../.../.... tarih ve ..... sayılı  
kararı.

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

**Unvan Ad SOYAD**

**Enstitü Müdürü**

Bu çalışma Erzurum Teknik Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenmiştir.  
Proje No: 2022/006  
Bu çalışma TÜBİTAK 3501 projesi kapsamında desteklenmiştir.  
Proje No: 122M677

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ danışmanlığında sunulan “**Robotik Kompakt Depolama/Boşaltma Sistemleri’nin İncelenmesi Ve Bir Simülasyon Modeli**” 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	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Yöntem	1	35
Bulgular	0	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	13	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.*

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Elif Burcu KIZILIRMAK	Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ
6.2.2024	6.2.2024
İmza:	İmza:

\* 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

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ'a ve yol göstericiliği, motivasyonu ve destekleriyle her zaman yanımda olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN ÖZAYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın özellikle projelendirme, modelleme ve raporlama gibi önemli kısımlarında destek ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mahmut TUTAM'a en derin şükranlarımı sunarım. Ayrıca BAP 2022/006 numaralı "Robotik Kompakt Depolama/Boşaltma Sistemi için Ayrık Olay Simülasyonu ile Faktör Analizi ve Senaryo Bazlı Sistem Tasarımı" projesine ve TÜBİTAK 3501 kapsamında 122M677 numaralı "Robot Tabanlı Bir Kompakt Depolama/Boşaltma Sistemi Tasarımının Optimizasyonu ve İyileştirilmesi" projesine verdikleri finansal katkı için Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu günlere gelmemde en büyük destekçilerim olan , hayatım boyunca maddi ve manevi yanımda olan babam Yener ERKAL ve annem Neval Hatice ERKAL'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Hayatımın her evresinde daima yanımda olup gücünü hissettiren, çalışmam boyunca gerek sabrı gerek yardımlarıyla desteğini esirgemeyen sevgili eşim Metin Berat KIZILIRMAK'a sonsuz teşekkür ederim.

Elif Burcu KIZILIRMAK

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ ROBOTİK KOMPAKT DEPOLAMA/BOŞALTMA SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE BİR SİMÜLASYON MODELİ

Elif Burcu KIZILIRMAK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN ÖZAYDIN

Lojistik sektörü, akıllı otomasyon sistemlerinin yükselişi ve sürdürülebilir lojistik çözümlerinin ön plana çıkışıyla birlikte, diğer sektörlerle göre daha hızlı bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Bu dönüşüm, işletmeler için rekabet avantajı sağlamak adına yeni fırsatlar sunmaktadır. Bu yeni fırsatlar, lojistik yönetimini daha stratejik bir hale getirmek, envanter kontrolünü optimize etmek ve müşteri memnuniyetini en üst düzeye çıkarmak isteyen işletmelere kapı aralamaktadır. Ayrıca, veri analitiği ve yapay zeka gibi ileri teknolojilerin lojistik sektöründeki uygulamalarıyla birlikte, birçok şirket geleneksel dağıtım sistemlerinden daha akıllı, esnek ve verimli dağıtım sistemlerine geçiş yapma yolundadır.

Dağıtım sistemleri, talep edilen malların müşteriye en kısa sürede, istenilen yerde, doğru kalitede ve doğru bir şekilde teslim edilmesinden sorumludur. Bu nedenle, depolama lojistikteki kilit unsurlardan biridir ve bir organizasyonun başarısına önemli bir katkı sağlar.

Son yıllarda teknoloji ve üretim sistemlerindeki hızlı gelişmeler, müşteri taleplerinin sürekli değişkenlik göstermesi, ürün çeşitliliğinin artması ve ekonomik faktörlerin etkisiyle depolama faaliyetleri daha da önem kazanmıştır. Günümüzde, pandemi ve ekonomik krizler gibi olumsuz etkiler, tüketicileri daha fazla sanal pazarlara yönlendirmiştir. Sanal pazarlardaki artan ilgi ile birlikte ürün çeşitliliği ve sayısı artarken, teslimat süreleri kısalmıştır. Elimizdeki telefon, tablet veya bilgisayarlar ile saniyeler içerisinde sipariş oluşturduğumuz günümüz rekabetçi piyasasında firmalar depolarında daha fazla işi daha kısa sürede gerçekleştirmek için mevcut otonom sistemlerini geliştirmeye veya yeni otonom depolama sistemleri kurmaya mecbur kalmıştır.

Firmalar, depolarını otomatikleştirmeye 1950'lerden itibaren Avrupa'da yaygınlaşan geleneksel otomatik depolama/boşaltma sistemleri (OD/BS) ile başlamışlardır. Sonrasında, artan rekabet ve değişen pazar koşulları nedeniyle, hızla gelişen ve otonom araç (OA) sayısının artırılıp azaltılması, depoda çalışan insan sayısının azaltılması gibi pek çok avantajı olan otonom araç depolama/boşaltma sistemlerine (OAD/BS) geçiş yapmaya başlamışlardır. Ancak bu teknolojide yerini son yıllarda, hızla değişen piyasa koşulları, durdurulamaz teknolojik gelişmeler, endüstrilerdeki robotik teknolojilerin yaygınlaşması ve Endüstri 5.0'ın da etkisiyle robotik kompakt depolama/boşaltma sistemleri (RKD/BS)'ne bırakmıştır.

Bu tez kapsamında, günümüzde gittikçe popüler olan otonom depolama sistemlerine değinilerek bu alanda yapılan akademik çalışmalara yer verilecek, devamında otonom depolama teknolojisinde modellenen RKD/BS'lerin özellikleri, sistemin işleyişi, avantaj ve dezavantajları gibi detaylara yer verilerek, örnek oluşturması açısından 10\*15\*4, 10\*15\*8 ve 10\*15\*12 boyutlarında üç farklı depoda adanmış depolama politikasıyla Arena™ programında simülasyon modelleri oluşturulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Robotik Kompakt Depolama/Boşaltma Sistemleri, Simülasyon.

**Şubat 2024, 69 sayfa**

## ABSTRACT

### MASTER THESIS

## INVESTIGATION of ROBOTIC COMPACT STORAGE/RETRIEVAL SYSTEMS and A SIMULATION MODEL

**Elif Burcu KIZILIRMAK**

**Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Sinan ÖZTAŞ**

**Co-Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN ÖZAYDIN**

The logistics sector is experiencing a faster transformation process than other sectors with the rise of smart automation systems and the prominence of sustainable logistics solutions. This transformation offers new opportunities for businesses to gain competitive advantage. These new opportunities open doors for businesses looking to make their logistics management more strategic, optimize inventory control, and maximize customer satisfaction. Furthermore, with the implementation of advanced technologies such as data analytics and artificial intelligence in the logistics sector, many companies are transitioning towards smarter, more flexible, and efficient distribution systems, surpassing traditional distribution methods.

Distribution systems are responsible for ensuring that requested goods are delivered to customers in the shortest time, at the desired location, with the right quality, and in the correct manner. Therefore, warehousing is one of the key elements in logistics and makes a significant contribution to the success of an organization.

In recent years, warehousing activities have become more important due to rapid developments in technology and production systems, continuous variability in customer demands, increased product diversity and economic factors. Today, negative effects such as pandemics and economic crises have led consumers to virtual markets more and more. With the increasing interest in virtual markets, the variety and number of products have increased, while delivery times have shortened. In today's competitive market, where we create orders in seconds with our phones, tablets or computers, companies are forced to improve their existing autonomous systems or build new autonomous storage systems to perform more work in their warehouses in less time.

Companies started automating their warehouses with traditional automated storage and retrieval systems (AS/RS), which became widespread in Europe from the 1950s onwards. Then, due to increasing competition and changing market conditions, they started to switch to rapidly developing autonomous vehicle storage and retrieval systems (AVS/RS), which have many advantages such as increasing and reducing the number of autonomous vehicles (AVs) and reducing the number of people working in the warehouse. However, in recent years, this technology has been replaced by robotic compact storage and retrieval systems (RCS/RS) due to rapidly changing market conditions, unstoppable technological developments, the spread of robotic technologies in industries and Industry 5.0.

Within the scope of this thesis, autonomous storage systems, which are becoming increasingly popular today, will be mentioned and academic studies in this field will be given, then details such as the features of RKD/BSs modeled in autonomous storage technology, system operation, advantages and disadvantages will be given, and simulation models will be created in Arena™ program with dedicated storage policy in three different warehouses with dimensions of 10\*15\*4, 10\*15\*8 and 10\*15\*12 as an models.

**Keywords:** Robotic Compact Storage/Retrieval Systems, Simulation.

**February 2024, 69 pages**

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	iii
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
ÖZET .....	vi
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ .....	x
GİRİŞ.....	1
ÜRÜNLERİN TAŞINMASI ve DEPOLANMASI.....	5
Depolamanın sınıflandırılması .....	7
Depolama amacına göre sınıflandırma.....	7
Depolama şekline göre sınıflandırma .....	7
Depolama tipine göre sınıflandırma.....	8
Depolama yerine göre sınıflandırma.....	8
Depolama süresine göre sınıflandırma.....	8
Depolama kapasitesine göre sınıflandırma .....	8
Depolama türleri.....	8
RKD/BS.....	10
KURAMSAL TEMELLER.....	15
OAD/BS .....	15
RKD/BS .....	27
MATERYAL VE METOT .....	32
Materyal .....	32
Metot .....	32
Simülasyon.....	32
ARAŞTIRMA BULGULARI .....	38
RKD/BS Simülasyon Modeli.....	38
Arena.....	39
TARTIŞMA ve SONUÇ .....	53
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	59

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Depo operasyon süreci. ....	7
Şekil 2. RKD/BS (AutoStore® Sistem)(Trost vd., 2022). ....	10
Şekil 3. RKD/B sistemlerinde hareket eksenleri. ....	11
Şekil 4. 3*3*3 boyutlu RKD/BS depo yapısı. ....	12
Şekil 5. Sipariş teslim süreci. ....	13
Şekil 6. Sipariş verilen kutu üzerindeki diğer kutuların ızgara üzerine yayılması ve sipariş verilen kutunun robot tarafından alınması. ....	13
Şekil 7. Sipariş teslim edildikten sonra kutunun yerine konulması. ....	14
Şekil 8. Geri beslemeli genel bir sistem yapısı. ....	33
Şekil 9. Model oluşturma aşamaları (Ahmet Kürşad TÜRKER, 2011). ....	37
Şekil 10. Arena™ araç çubuğu. ....	40
Şekil 11. 10*15*4 boyutlu modelin depo genel yapısı. ....	41
Şekil 12. 10*15*4 boyutlu depo modelinin genel görünümü. ....	42
Şekil 13. Sipariş gelişinin tanımlanması. ....	43
Şekil 14. Sipariş özelliklerinin belirlenmesi. ....	43
Şekil 15. aOrder ve vBoxSearch tanımlanması. ....	44
Şekil 16. vBoxSearch değişkeninin sınırlandırılması. ....	44
Şekil 17. Depoda arama işleminin başlangıç, bitiş ve arama koşulunun belirlenmesi. ....	45
Şekil 18. Gelen siparişin koşul sağlanana kadar “Hold” modülü ile tutulması. ....	45
Şekil 19. Sipariş ile kutu konumunun eşlenmesi. ....	46
Şekil 20. Sipariş konumunun ve üzerlerinin doluluk kontrolü. ....	46
Şekil 21. Siparişlerin buldukları katmanlara göre şartlandırılmaları. ....	47
Şekil 22. Siparişi içeren kutunun üzerindeki kutuların kaldırılması. ....	48
Şekil 23. “Request” modülü ile Robot talep edilmesi. ....	49
Şekil 24. G/Ç noktasına taşıma için “Transport” modülü kullanımı. ....	50
Şekil 25. Izgara üzerindeki noktalara taşıma için “Transport” modülü kullanımı. ....	50
Şekil 26. G/Ç noktasında kutunun işlem görmesi için “Process” modülünün tanımlanması. ....	51
Şekil 27. Kutunun robot tarafından alındığı yere taşınması. ....	52

## KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

- OD/BS:** Otomatik Depolama/Boşaltma Sistemi (AS/RS)
- OAD/BS:** Otonom Araç Depolama/Boşaltma Sistemi (AVS/RS)
- RKD/BS:** Robotik Kompakt Depolama/Boşaltma Sistemi (RCS/RS)
- MOD/BS:** Mekik Tabanlı Otomatik Depolama/Boşaltma Sistemi (SBS/RS)
- VOD/BS:** Vinç Tabanlı Otomatik Depolama/Boşaltma Sistemleri (CBAS/RS)
- OAD/BS/HA:** Hareketli Asansör Kullanan Otonom Araç Depolama/Boşaltma Sistemi
- ARKD/BS:** Asma Robotik Kompakt Depolama/Boşaltma Sistemi
- G/Ç:** Giriş/Çıkış Noktası
- OA:** Otonom Araç
- ORA:** Otomatik Rehberli Araç
- HA:** Hareketli Araç
- KROP:** Kompakt Robotik Otomatik Park
- D/B:** Depolama/Boşaltma
- TK/ÇK:** Tek Komut/ Çift Komut (SC/DC)
- KA:** Kuyruk Ağı (QN)
- AKA:** Açık Kuyruk Ağı (OQN)
- YAKA:** Yarı Açık Kuyruk Ağı (SOQN)
- KKA:** Kapalı Kuyruk Ağı (CQN)
- SPA:** Sistem Performans Analizörü
- MGM:** Matris-Geometrik Yöntem
- STB:** Hedef Stok Tutma Birimleri
- DES:** Ayrık Olay Simülasyonu

## GİRİŞ

Depo, hammadde, yarı mamul ve mamullerin taşınmayı beklerken fiziksel olarak saklandığı ve tedarik zinciri içinde nakledilmeyi bekledikleri alanlara verilen isimdir. Bu alanlar, ürünlerin geçici olarak korunması, düzenlenmesi ve yönetilmesi için kullanılır. Depolama süreci, tedarik zincirinin düzenli ve etkin işleyişini sağlamak, talep doğrultusunda stokları yönetmek ve müşterilere zamanında teslimat sağlamak için kritik öneme sahiptir. Müşteri taleplerinin değişkenlikleri, üretim ve tüketim oranlarındaki farklılıklar, üretim tesisleri ile pazarlar arasındaki coğrafi uzaklık gibi etkenler, belli bir miktarda stok tutma ihtiyacını doğurmaktadır. Bu sebepten dolayı, tedarik zincirinde ciddi derece öneme sahip olan depoların kurulması ve etkin olarak yönetilmesi sistemin doğru işleyebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ürünler depolandıkları yerden çıkarılarak dağıtım sürecine geçiş yaparlar. Bu aşamada depodan alınan ürünler, lojistik ve dağıtım ağı aracılığıyla müşterilere ulaştırılmak üzere nakledilir. Depolama ve dağıtım süreçleri, tedarik zincirinin işleyişinde birbirini tamamlayan kritik bileşenlerdir.

Günümüzde ekonomi, hizmet sistemleri, enformatik ve sosyokültürel alanlarda hızlı teknolojik değişimler ve gelişmeler gözlemlenmektedir. Globalleşen dünyada teknolojiye sürekli arz eden değişimler, piyasada sürekli artış gösteren rakiplerin varlığı, müşteri taleplerinin sayısı ve niteliğindeki hızlı değişimlere bağlı olarak rekabet koşullarının zorlaşması gibi etmenler işletmelerin varlıklarını sürdürebilmeleri ve diğer firmalar ile rekabetlerinde üstünlük sağlayabilmeleri için sahip oldukları kaynakları en verimli, en üst seviye kalitede ve minimum maliyetle sunabilmelilerdir. Firmalar sürekli değişkenlik gösteren bu müşteri taleplerine en hızlı şekilde cevap verebilecek esnek bir üretim sağlayabilmek ve tedarikçilerden son tüketiciye kadar zincirdeki oluşabilecek tüm aksaklıkları gidermek zorundadır. Diğer sektörlere kıyasla üretim sektöründe yaşanan birçok aksaklığın temeli malzeme taşıma ve depolama sistemlerine bağlı faktörlerden kaynaklanmaktadır (Atmaca ve Öztürk, 2013).

Bir malın üretilmeden önce hammadde temininden ürünün satış aşamasına kadar olan süreçlerin en önemlisi depolama/boşaltma işlemleridir. Bu işlemler, geleneksel ve otomatik depolama olmak üzere iki türde gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yöntemler, tamamı ile insan gücü kullanılarak gerçekleştirilen işlemlerdir. Malların üretiminden satışına kadar olan süreçlerin büyük bir kısmı manuel olarak gerçekleştirilir. Diğer yöntem olan otomatik depolama/boşaltma sistemleri (OD/BS), insan müdahalesinin minimum olduğu ve ürünlerin depolanması ile boşaltılması için gerekli adımların otomatik olarak gerçekleştirildiği sistemlerdir.

Dağıtım sistemleri, müşterilerin talep ettiği ürünlerin doğru zamanda, doğru yere, istenilen kalitede ve sorunsuz şekilde ulaştırılmasından sorumludur. Lojistik sektörü son yıllarda, iş dünyasının en hızlı değişen ve dönüşen alanlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sektör, diğer sektörlerle karşılaştırıldığında çok daha dinamik bir yapıya sahiptir ve bu dinamizm, lojistiğin işletmeler için stratejik önemini her geçen gün daha da yükseltmektedir. Lojistik, ürünlerin ve hizmetlerin tedarik zincirlerinde sorunsuz bir şekilde hareket etmesini sağlayarak rekabet avantajı oluşturur. Ancak son yıllarda dünya genelinde yaşanan pandemi, savaş ve ekonomik krizler gibi olumsuz etkenler, tüketicilerin alışveriş alışkanlıklarını kökten değiştirmiştir (Jäkle T., 2021). Tüm bu olumsuzluklar neticesinde tüketiciler artık fiziksel mağazalardan uzak durmaya ve daha fazla çevrimiçi alışveriş yapmaya yönelmişlerdir. Çevrimiçi pazarlara olan bu artan talep ile birlikte ürün çeşitliliğini sayısı artarken, günümüz rekabet piyasasında müşterilerin ürünlerini daha hızlı bir şekilde teslim almayı beklemelerinin bir sonucu olarak teslimat süreleri kısalmıştır. Müşteri taleplerine kısa sürede cevap vererek teslimatları vaktinde gerçekleştirebilmek doğru ve etkin bir depolama stratejisine bağlıdır.

Depolama, lojistik süreçlerinin vazgeçilmez bir parçasıdır ve ürünlerin tedarik zincirindeki hareketini düzenlemek açısından hayati bir rol oynar. Üretilen her ürün, depolama merkezlerinde bir süre bekledikten sonra, distribütörlere veya doğrudan tüketicilere yönlendirilir. Ancak, bu teslimatların belirlenen süre içinde tamamlanması son derece önemlidir. Günümüzde, her birimizin bilgisayar, telefon, tablet gibi çeşitli teknolojik cihazlarla anında sipariş verebildiği bir çağda, marketlerden ulusal ve uluslararası lojistik firmalarına kadar tüm dağıtım merkezleri için zamanında teslimat zorunluluğu büyük bir öneme sahiptir. Son zamanlarda değişen tüketici talepleri, artan ürün çeşitliliği, sipariş boyutlarındaki azalma ve teknolojik gelişmeler gibi birçok etken, işletmelerin depo ve lojistik süreçlerini gözden geçirmelerine neden olmuştur. İşletmeler, müşterilere daha hızlı ve verimli bir şekilde hizmet vermek ve diğer işletmelerle rekabet edebilmeleri için mevcut depolama sistemlerini iyileştirmenin veya yeni otonom depolama sistemleri kurmanın yollarını aramışlardır.

OD/BS ilk olarak 1950'lerden itibaren Avrupa'da kullanılmıştır (Roodbergen ve Vis, 2009). 1960'lı yıllarda daha da yaygınlaşmış ve 2000'li yıllara kadar sürekli geliştirilmiş ve şirketler tarafından sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır.

OD/BS'ler birden fazla koridordan oluşur; Koridorun her iki tarafında depolama rafları, en az bir depolama/boşaltma (D/B) makinesi ve giriş/çıkış (G/Ç) istasyonu bulunur. D/B makineleri, ürünlerin raflardan çıkarılmasına veya raflara yerleştirilmesine izin verir. Her koridorda bulunan D/B makineleri, koridorun her iki tarafındaki depolama raflarına ulaşma

yeteneğine sahiptir. Gerekli D/B makinelerinin miktarı, çıktı kapasitesine göre belirlenir. Çıktı kapasitesinin yüksek olduğu durumlarda her depolama rafında D/B makinesi kullanılmalıdır (Khojasteh-Ghamari, 2012).

Otonom araç (OA) teknolojisi ve endüstri 4.0 kavramı ile birlikte robotik teknolojilerin endüstrilerde kullanılması, standart OD/BS alternatif olarak görülen otonom araç depolama/boşaltma sisteminin (OAD/BS) popülerlik kazanmasına sebep olmuştur. Geleneksel OD/BS'lere göre OAD/BS'ler OA'ların ve asansörlerin sayısı ve konumlarının depo ihtiyaçlarına göre ayarlanabilmesi, yatay ve dikeyde serbest hareket edebilme yeteneği gibi avantajlar sunar. Ayrıca OD/BS'ler genellikle aynı türde ve boyutta ürünlerin depolanmasını içerirken OAD/BS'ler farklı boyut ve türlerdeki ürünlerin birlikte depolanmasına olanak tanır. OAD/BS'ler dikey depolama/boşaltmaya odaklanır. Dikeyde hareket için dikey karosel veya asansörler kullanılır. Yatay hareket ise OA'lar ya da robotlarla sağlanır. OA'ların depolama raflarına erişimi ve sistem içindeki sayılarının esnek bir şekilde değiştirilebilmesi gibi önemli özellikleriyle diğer otonom sistemlere göre büyük avantajlar sunmaktadır. OAD/BS'leri ile ilgili ilk akademik çalışma Malmberg (2002)'dir. Malmberg bu çalışmada, OAD/BS'nin performansını katmandan katmana bir yapılandırma ile değerlendirmek için analitik kavramsal araçlar tanıtmıştır. OAD/BS ile ilk çalışmaların yapıldığı yıllardan sonra, OAD/BS ile birlikte mekik tabanlı depolama/boşaltma sistemleri (MOD/BS)'ne yönelikte çok sayıda araştırma yapılmıştır. OAD/BS ve MOD/BS teknolojileri benzer olsalar da aralarındaki temel fark, taşıdıkları yük türüdür. OAD/BS paletli birim yüklerle ilgilenirken, MOD/BS "tote" olarak bilinen plastik bir kap tarafından temsil edilen birim yükleri ele alır (Battara vd., 2022).

Endüstri 5.0 ile birlikte lojistik, depolama ve yapay zeka alanlarındaki son gelişmeler neticesinde günümüzde OAD/BS'lerinin yerini almaya hazırlanan ve bu tez konusunu içeren robot tabanlı kompakt depolama/boşaltma sistemleri (RKD/BS) birçok küçük plastik kutunun bir kafes sistemi içine düzenli bir şekilde yerleştirilmesinden oluşur. Bu kutuların içerisinde, depolanan mallar yer almaktadır. Depolama alanı dikdörtgen biçiminde ızgaradan oluşmaktadır ve kutular robotlar tarafından bu ızgara üzerinde x, y ve z doğrultusunda hareket ettirilmektedir. OAD/B sistemlerinden farklı olarak RKD/B sisteminde depolama koridorları bulunmaz. Bu da depolamada önemli bir etken olan alan tasarrufunda önemli avantaj sağlar. Bunun dışında RKD/B sisteminin; yüksek depolama yoğunluğu, esneklik, yüksek hızlı ve doğru sipariş hazırlama, iyi bir envanter yönetimi, düşük işletme maliyeti ve çevre dostu olması gibi birçok önemli avantajı da vardır.

RKD/BS'lerde dikey istifleme yaklaşımı kullanılır. Kutular ya adanmış politika ile alındığı yere bırakılır ya da rastgele politika ile bir hedef kutuyu almak için, üzerinde bulunan

tüm kutuların yeniden karıştırılması gerekir. Bu tez konusu adanmış politika ile RKD/B sistemini kapsamaktadır.

Bu çalışma ile ilk otonom depolama/boşaltma sistemlerinden başlayarak geliştirilen otonom depolama sistemlerinin tanıtılması, karşılaştırılması ve yeni sistemin üstünlükleri de incelenerek günümüzde en son ve yeni bir teknoloji olan RKD/B sistemlerine ışık tutulmuş ve daha iyi anlaşılması için Arena™ ile bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu bağlamda tez çalışmasının akışı şu şekildedir; 1. bölüm giriş bölümüdür. Bu bölümde geçmişten bugüne kadar tüm otonom depolama/boşaltma sistemleri üzerinde durulmuş ve sistemler birbirleriyle karşılaştırılmış ve son olarak tezin kapsamı belirtilmiştir. 2. bölümde dağıtım ve lojistik süreçlerinde oldukça önem arz eden malzeme taşıma ve depolama üzerinde durularak, depolama, daha detay olabilecek depolamanın nedenleri, hedefleri, depolamanın sınıflandırılması, depolama türleri gibi başlıklar altında incelenmiştir. 3. Bölümde ayrı bir başlık altında tez kapsamında yer alan RKD/B sistemleri anlatılmış ve sistem hakkında detaylara başvurularak örnekler ile sistemin daha iyi kavranması amaçlanmıştır. 4. Bölümde OAD/BS ve RKD/BS ile ilgili yayınlanan akademik çalışmaların detayları sunulmuştur. 5 ve 6. Bölümlerde tez kapsamının Arena™ yazılımı ile ilgili bilgi verilerek modele ait modüller detaylıca açıklanmıştır. 7. ve son bölüm, sonuç bölümüdür. Bu bölümde tez genelinde yapılan araştırmalar ve yorumlamalar yer almaktadır. Ayrıca oluşturulan simülasyon modelleriyle gelecekte yapılması planlanan çalışmalar anlatılmıştır.

## ÜRÜNLERİN TAŞINMASI ve DEPOLANMASI

Ürünlerin taşınması ve depolanması, lojistik ve tedarik zinciri yönetiminin temel taşlarıdır. Bu süreçler, ürünlerin etkili bir biçimde depolanmasını ve gerektiğinde hareket ettirilmesini sağlayarak işletmelerin verimliliğini artırır.

Taşıma, doğru malzemenin, doğru zamanda, doğru yere, minimum maliyetle ulaştırılmasıdır. Ayrıca malzemenin taşınması ile ifade edilen taşıma, depolama, koruma, kontrol etme faaliyetleri oldukça önemlidir;

- Taşıma; Bu faaliyet ile bir malzemenin bir yerden başka bir yere taşınabilmesi için, boyut, şekil, ağırlık, taşınacak yolun durumu ve taşıma sıklığı gibi faktörler dikkatlice incelenmelidir.
- Depolama; Bu süreçte malzemenin boyutu, şekli, durumu, yığılma özellikleri, depolama alanı gerekliliği ve bina sınırlamaları gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.
- Koruma: Malzemenin hasar görmeden muhafaza edilmesi faaliyetidir. Bu faaliyetler malzemenin yanlış yere taşınmasını, yanlış kullanılmasını, yanlış sırayla işlenmesini önlemeye yöneliktir.
- Kontrol etme: Malzeme kontrolü, fiziksel kontrol ve durum kontrolünü içerir. Fiziksel kontrol, yönlendirme, sıralama ve malzemeler arasındaki boşluğun denetimini sağlar. Durum kontrolü ise, malzemenin mevcut konumunu, miktarını, hedefini, kaynağını, sahibini ve zamanlama düzenini kontrol eder.

Malzeme taşıma sistemlerinin amacı, hammadde, yarı mamul, bitmiş ürün ve araç gereçlerin bir noktadan diğerine etkin bir şekilde taşınmasını sağlamaktır. Otonom depolama/boşaltma sistemlerinin ilk kurulum maliyetlerini de düşünecek olursak bu sistemler aynı zamanda depolardaki depolama/boşaltma faaliyetleri için de kritik bir rol oynamaktadır. Malzeme taşıma maliyetleri, toplam üretim maliyetleri içinde önemli bir paya sahiptir. Bu nedenle, sadece uygun bir malzeme taşıma sistemi seçmekle iş bitmemektedir; aynı zamanda bu sistemin, imalat operasyonları doğrultusunda etkili bir şekilde kullanılması da gerekmektedir. Bu, verimliliği artırmanın ve maliyetleri azaltmanın kritik bir unsurudur. Ürünlerin içinde bulunduğu depolardaki taşıma işlemleri için depo teknolojisine göre konveyör, vinç, forklift, asansör, OA'lar, hareketli asansörler (HA) ve robotlar kullanılmaktadır.

Depolama, malzeme taşıma sisteminin temel elemanlarından biridir. İşletmelerde ürünlerin belirli bir süre boyunca saklanması, düzenlenmesi, korunması ve izlenmesi için

kullanılan sistemlerin ve uygulamaların bütünüdür. Depolama ihtiyacı ve süreci, insanlık tarihinin en eski dönemlerine dayanmaktadır. İnsanlar, ilk kez yiyecek gibi temel ihtiyaç maddelerinin çevresel ve iklimsel etkenlerden nasıl etkilendiğini gözlemleyerek, bu maddeleri korumak amacıyla kapalı alanlarda depolama yöntemlerini benimsemişlerdir. İnsanlığın gelişmesi ile birlikte insanlar, sadece yiyecek saklamakla kalmayıp, ticaret, endüstri, lojistik gibi alanlarda da depolama sistemlerini geliştirdiler. Bu ilerlemeler, depolama süreçlerini daha etkin ve verimli hale getirdi ve toplumların refah düzeylerine büyük katkılar sağladı. Günümüzde depolama sistemleri, karmaşık teknolojiler ve modern lojistikle birleşerek, malzeme yönetiminde kritik bir rol oynamakta ve sürekli olarak gelişmektedir. Depolama sırasında kullanılan palet ve kutular, depolama sürecinde kritik ekipmanlardır. Depolar, depo yöneticileri, sevkiyat sorumluları, bilgisayar operatörleri ve toplama ekipmanı operatörleri gibi uzman kişilerin faaliyet gösterdiği işletme birimleridir.

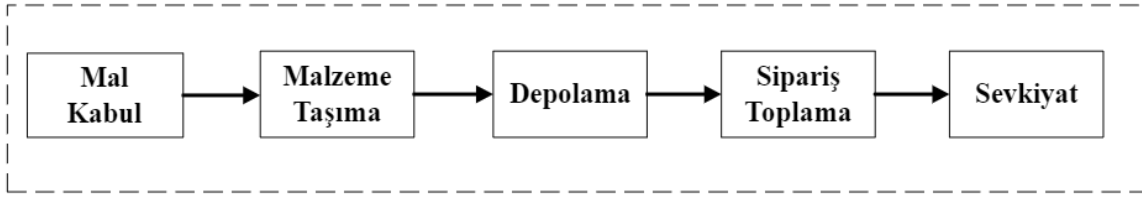
Depolamanın nedenleri;

- Talepteki belirsizlikler
- Bazı ürünlerin yalnızca belirli zamanlarda üretilmesi
- Üretim düzeyinin değişiklik göstermesi
- Ürünlerin fiyatlarındaki belirsizlikler veya dalgalanmalar
- Risk yönetimi
- Toplam maliyetin azaltılması
- Daha etkin tedarik zinciri yönetimi

Depolamanın hedefleri;

- Stok yönetimi ve kontrolü
- Verimlilik
- Maliyetin azaltılması
- Müşteri memnuniyeti
- Risk yönetimi
- Lojistik ve tedarik zinciri optimizasyonu
- Kalite kontrol
- Alan kullanımı ve düzen

Depo operasyon sürecini özetleyen akış şeması Şekil 1’de sunulmuştur.



**Şekil 1.** Depo operasyon süreci.

Şekil 1’de görüldüğü üzere depolarda öncelikle mal kabulü, malzeme taşıma, depolama, siparişlerin toplanması ve sevkiyat faaliyetleri yürütülür. Bu depo operasyonlarının etkili bir şekilde gerçekleşmesi için ise depo tasarımı aşamasında uygun yerleşim konfigürasyonu yapılmalıdır. Bu düzenlemenin başarısı, depo operasyonlarını sürece en uygun şekilde organize etmeye bağlıdır (Baker ve Canessa, 2009).

Depo yerleşim düzeni, depolama gereksinimleri ve ürün özelliklerine uygun depolama yöntemleri ile raf sistemlerinin seçimini içerir. Bu süreçte, rafların uzunluk, yükseklik ve derinlikleri gibi detaylar belirlenerek depolama alanının boyutları planlanır. Aynı zamanda sipariş toplama metodolojileri ve gerekli ekipmanların seçimi, sevkiyat ve teslimat noktalarının belirlenmesi ile G/Ç noktalarının düzenlenmesi gibi kritik unsurlar, depo tasarım sürecinde değerlendirilir (Revillot Narvaes vd. 2020).

## **Depolamanın sınıflandırılması**

### **Depolama amacına göre sınıflandırma**

**Stok Depolama:** Temel olarak üretim süreçlerinde kullanılmak üzere malzemelerin ve ürünlerin depolandığı depolama türüdür. Bu depolama türünde amaç, üretim için gerekli olan malzemelerin belirli bir düzen içinde saklanması ve gereksinim duyulduğunda hızlı bir şekilde erişimini sağlamaktır.

**Dağıtım Depolama:** Ürünlerin dağıtım sürecine hazırlık için depolandığı depolama türüdür. Bu depolama türünde amaç, müşterilere veya perakende noktalarına yönelik ürünlerin hazır bulundurulması ve bu ürünlere hızlı bir şekilde erişim sağlanarak dağıtım sürecinin etkin bir şekilde yönetilmesidir.

### **Depolama şekline göre sınıflandırma**

**Raf Sistemleri:** Ürünlerin düzenli bir şekilde raflarda depolandığı sistemlerdir.

**Blok Depolama:** Ürünlerin paletler üzerinde yığılarak veya düzenli bir şekilde depolandığı sistemlerdir.

### **Depolama tipine göre sınıflandırma**

Soğuk Zincir Depolama: Düşük sıcaklıkta depolama gereksinimini olan ürünlerin saklandığı sistemler (örneğin: gıda, ilaç).

Oda Sıcaklığında Depolama: Normal oda sıcaklığında depolama gereksinimine sahip ürünlerin saklandığı sistemler.

### **Depolama yerine göre sınıflandırma**

Merkezi Depolar: Ana depolama alanları, genellikle üretim tesislerine yakın veya büyük şehirlerde bulunur.

Dağıtım Merkezleri: Ürünlerin daha yakın bölgelere dağıtımını için kullanılan depolama alanları.

### **Depolama süresine göre sınıflandırma**

Kısa Süreli Depolama: Ürünlerin kısa süreli saklandığı depolama.

Uzun Süreli Depolama: Ürünlerin uzun bir süre boyunca saklandığı depolama.

### **Depolama kapasitesine göre sınıflandırma**

Küçük Ölçekli Depolama: Küçük işletmelerin veya perakende satış noktalarının ihtiyaçlarını karşılayan depolama alanları.

Büyük Ölçekli Depolama: Büyük üretim tesislerinin veya lojistik firmalarının ihtiyaçlarını karşılayan büyük depolama alanları.

### **Depolama türleri**

Statik depolama: Ürünlerin sabit konum ve düzenle depolanması anlamına gelir. Ürünler belirli bir konuma yerleştirilir ve genellikle belirlenen yerde muhafaza edilir. Bu tür depolama, daha az hareketli parçalar içerir ve ürünlerin belirli bir düzen içinde depolanmasını sağlar. Örneğin, raflarda veya paletlerde ürünlerin düzenli bir şekilde depolanması statik depolama örneğidir. Statik depolama sistemleri, genellikle 'raf istifleme' olarak adlandırılan sistemlerdir. Statik depolama sistemlerine örnek olarak; çift derinlikli (double deep) raf sistemi, tek paletli raf sistemi, sırt sırta raf sistemi, içine girilebilir raf sistemi verilebilir.

Dinamik depolama: Ürünlerin hareket ettirilerek depolandığı bir sistemdir. Bu tür sistemlerde ürünler, konveyör bantları, rulolar, kayışlar veya diğer mekanizmalar yardımıyla hareket ettirilir. Ürünlerin depolandığı ve alındığı yerler genellikle değişkendir. Bu sistemler,

depo içindeki hareketliliği artırabilir ve ürünlere daha hızlı erişim sağlayabilir. Dinamik depolama, tedarik zinciri süreçlerini optimize etmek ve verimliliği artırmak için kullanılır.

Bu iki depolama türü, depo yönetiminde farklı avantajlar ve kullanım alanları sunar. Statik depolama genellikle belirli bir düzeni ve organizasyonu korurken, dinamik depolama süreçleri hızlandırabilir ve ürün akışını iyileştirebilir. Depo ihtiyaçları ve işletme gereksinimlerine bağlı olarak, işletmeler bu iki türü veya bunların bir kombinasyonunu kullanabilirler.



## RKD/BS

Depolarda günümüzde sık rastlanan bir sorun olan arazi kıtlığı, yeterli büyüklükte arazi bulma sıkıntısı ve artan fahiş arazi fiyatları ile birlikte depo kullanıcıları daha az alanda daha fazla ürün depolayabilecekleri sistemlerin arayışına girmişlerdir (Tutam vd., 2023). Giderek teslimat süresilerinin daha da kısalması, müşteri memnuniyeti gibi sebepler neticesinde tedarik zinciri ve lojistikteki gelişmeler ve Endüstri 5.0’ında etkisiyle depolarda kullanılan otonom sistemler yerini RKD/BS’lere bırakmıştır. Bu tür depolama sistemleri 20 yıl önce ortaya atılmış olmasına rağmen konu hakkında çok az sayıda bilimsel makale bulunmaktadır. Literatürün bulunmamasının bir başka nedeni de dünya çapında yalnızca iki üreticinin bulunmasıdır: Norveç'ten Autostore® ve İngiltere'den Ocado. Bu tür sistemlerin verimi veya çevrim süresi hakkında çok az bilgi vardır. Araştırmacılar çalışmalarında çoğunlukla; Hangi etkileyici faktörler ortaya çıkıyor ve birbirlerini nasıl etkiliyorlar? Kullanılan robot sayısının verim üzerinde nasıl bir etkisi var? Robotlar birbirlerine müdahale ediyorlar mı? sorularına cevap aramışlardır. (Trost vd., 2023).

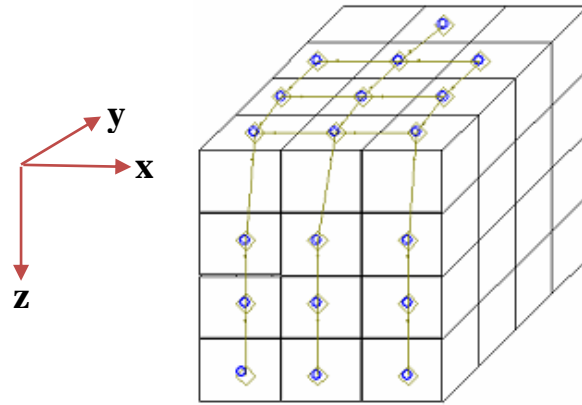
RKD/B sistemleri alan kullanımını artırmak için geliştirilmiştir. RKD/BS’ler geleneksel toplama ve koridorlar arası geçişlere ihtiyaç duymazlar. Böyle bir sistemde, ızgara tabanlı bir depolama alanı, üst üste dizilmiş kutular içerir. Ayrıca robotlar, istiflerdeki kutuları kaldırmak veya indirmek için sistemin çatısında çalışır (Tutam vd., 2023).



Şekil 2. RKD/BS (AutoStore® Sistem)(Trost vd., 2022).

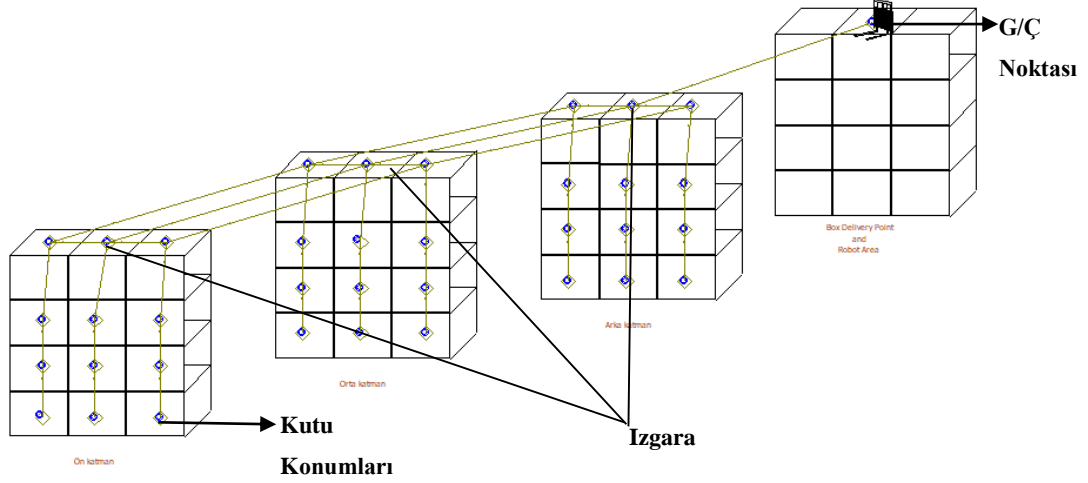
RKD/B sistemi, yenilikçi bir depolama çözümü olarak otomatik depolama/boşaltma işlemlerinde sıklıkla kullanımı olan bir sistemdir. Birçok küçük plastik kutunun bir kafes sistemi içinde düzenli bir şekilde yerleştirilmesinden oluşur. Bu kutuların içerisinde depolanan ürünler yer almaktadır. Depolama alanı çeşitli geometrilerde ızgaradan oluşmaktadır ve kutular bu ızgara üzerinde hareket etmektedir. Otonom robotlar kutuları istenilen konuma taşıyarak teslim etmekte ve sonrasında kutuyu geri götürmektedir. Hareket eksenleri x, y ve z olmak üzere üç boyuttadır (Şekil 3). OAD/B sistemlerinden farklı olarak RKD/B sisteminde depolama koridorları bulunmaz. Böylelikle depolamada önemli bir etken olan alan tasarrufunda büyük bir avantaj sağlar. RKD/B sisteminin avantajları şunlardır (Trost vd., 2022);

- Basit ve modüler tasarım
- Ölçeklenebilirlik
- Esneklik
- Yüksek depolama yoğunluğu
- Düşük alan talebi
- Yüksek sistem güvenilirliği
- Yüksek enerji verimliliği
- Robotlar tarafından tamamen otonom olarak çalıştırılma
- İşletmeden bağımsız uygulanabilirlik



**Şekil 3.** RKD/B sistemlerinde hareket eksenleri.

RKD/B sisteminde depo işleyişinin daha kolay kavranabilmesi adına süreç 3\*3\*3 boyutlu bir depo üzerinden örneklendirilmiştir. 3\*3\*3 boyutunda bir RKD/B sisteminin genel depo yapısı Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** 3\*3\*3 boyutlu RKD/BS depo yapısı.

RKD/B sistemleri dört ana bileşenden oluşur:

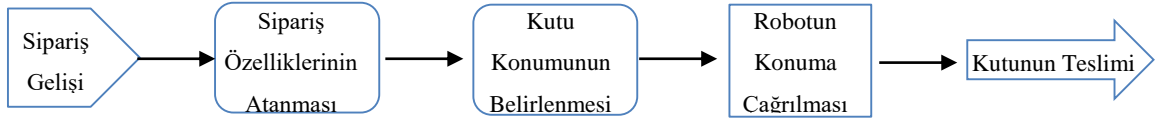
**Depolama ızgarası:** Izgara, cıvatalı alüminyum veya çelik profillerden yapılmıştır ve robotlar için ortogonal bir ray ağı ve depolama konteynırları için bir ızgara bölümü görevi görür. Izgara boyutu veya uzunluk/genişlik oranıyla ilgili herhangi bir kısıtlama yoktur. Depolama ızgarasının yüksekliği salonun yüksekliğine veya üst üste istiflenebilecek maksimum plastik kap sayısına bağlıdır. Bu konteynerin tipine bağlıdır (Trost vd., 2022).

**Robot:** Robot pille çalışır ve sekiz tekerleği vardır (her yönde dört); Robotun belirli bir yönde hareket etmesini sağlamak için dördü kaldırılabilir veya alçaltılabilir. Yön değişikliği belli bir zaman alır. Döngü başına yön değişikliği sayısını en aza indirmek, verimi en üst düzeye çıkarmak için faydalıdır. Bu aynı zamanda her depolama döngüsü için hızlanma ve frenleme sıklığını da en aza indirir. Piyasada bulunan araçların neredeyse tamamında enerji geri kazanım sistemi bulunmaktadır. Robot, bir konteyneri almak için dört halat dizisine sahip açılı profilli bir çerçeve kullanmaktadır. Bu mekanizma aynı zamanda konteyneri istifin üzerine/istifinden aşağı/yukarı indirmek/kaldırmak için de kullanılır. Robotun hücre boyutu, robotun geometrisi nedeniyle ihtiyaç duyduğu alanı tanımlar. Eski serilerin temel ölçüsü genellikle iki ızgara elemanını kapsıyorken, yeni seriler yalnızca bir veya bir buçuk elemanı bloke etmektedir. Farklı tipte robotların bir araya getirildiği sistemlerde yavaş olanlara daha hızlı uyum sağlanması gerekmektedir (Trost vd., 2022).

**Kutu:** Depo içerisinde ürünler plastik kaplar içerisinde üst üste istiflenir. Bu, teknik olarak konteynerlerin yüksekliği ile koşullandırılmış maksimum istiflemeyle sonuçlanır. Konteynerlerin boyutları genel olarak 600 x 400 milimetredir. Yükseklik açısından ise 200 ile 425 milimetre arasında çeşitleri bulunmaktadır. Bu, yaklaşık 45 ila 100 litrelik dolun hacimleriyle sonuçlanır. Konteynerler ayrıca farklı stok tutma birimlerini (SKU) depolamak için bölünebilir (Trost vd. 2022).

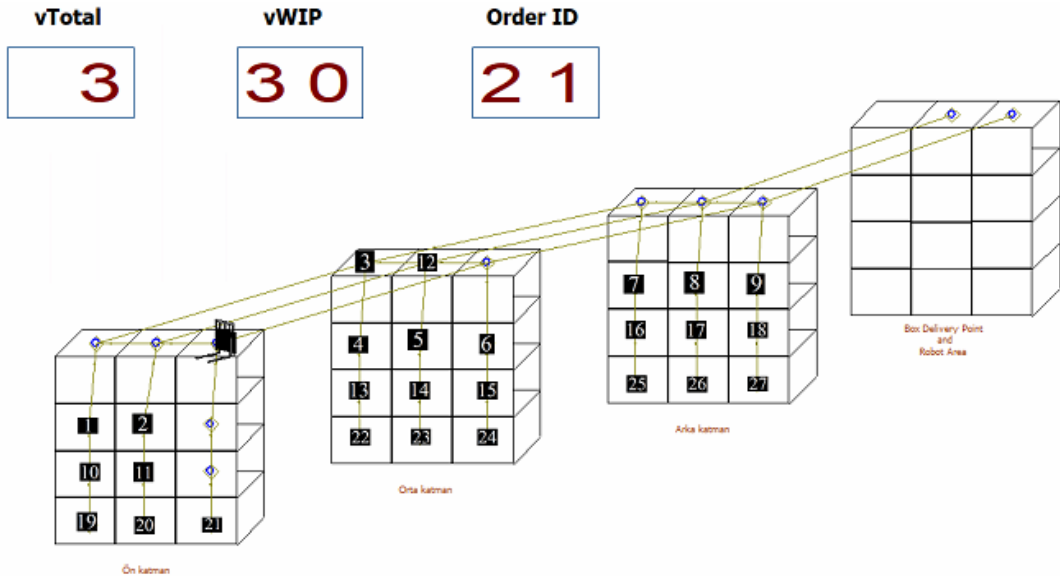
Toplama istasyonu: Deponun önündeki toplama istasyonu (port olarak da bilinir) G/Ç şaftı ile şebeke seviyesine bağlanır. Bir toplama istasyonu yalnızca depolama için veya yalnızca boşaltma için kullanılabilir, ya da hem depolama hem de boşaltma için kullanılabilir. Bazı sistemler, bir depolama ögesi kaldırıldıktan hemen sonra başka bir nesnenin aynı kutuda depolanmasını sağlayacak şekilde toplama istasyonlarında çalıştırılır (Trost vd., 2022).

RKD/B sistemlerinde kutular içerisine yerleştirilmiş olan ürünler G/Ç noktalarına robotlar aracılığıyla taşınmaktadır. Ürünlerin depoya yerleştirildiği bir sistemin ilk aşamasında siparişler gelmektedir. Sipariş gelişinde kutunun teslimine kadar olan sürecin akışı Şekil 5'te verilmiştir.



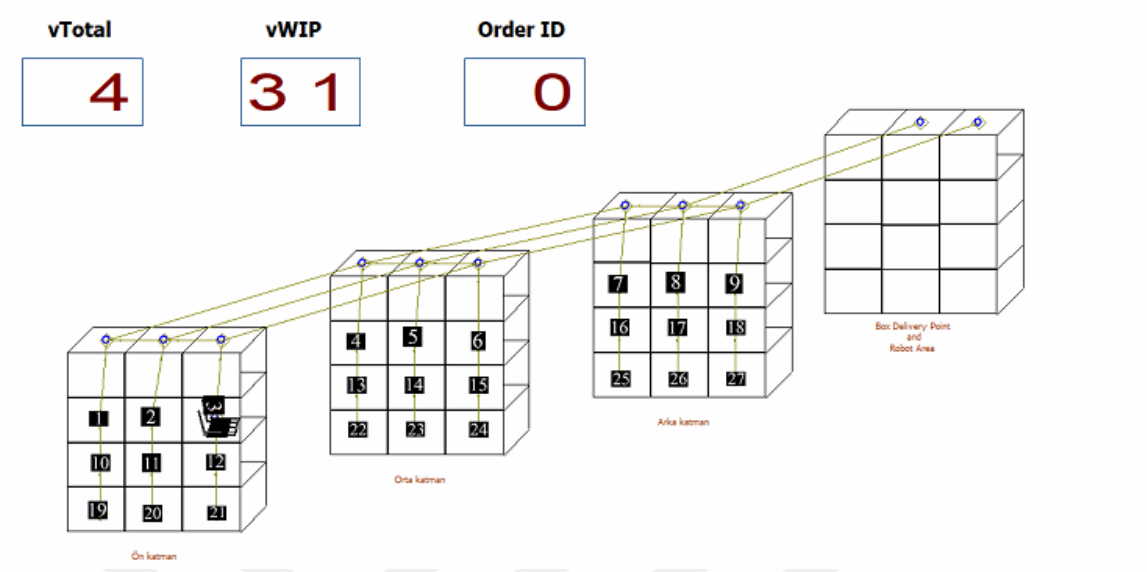
Şekil 5. Sipariş teslim süreci.

Sonraki aşamada robot RKD/B sistemi üzerinde bulunan ızgara üzerinde x ve y doğrultusunda hareket ederken, sipariş verilen ürünün bulunduğu kutunun üzerinde başka kutuların bulunması halinde z doğrultusunda kutuları çıkarmakta ve ızgara üzerine yaymaktadır. Üzerindeki kutular alındıktan sonra sipariş verilen kutu robot tarafından alınarak G/Ç noktasına taşınmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Sipariş verilen kutu üzerindeki diğer kutuların ızgara üzerine yayılması ve sipariş verilen kutunun robot tarafından alınması.

Teslim edilen kutudan sipariş alındıktan sonra kutu robot tarafından yerine götürülmekte ve ızgaraya yayılan kutular yerlerine konulmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Sipariş teslim edildikten sonra kutunun yerine konulması.

## KURAMSAL TEMELLER

### OAD/BS

OAD/BS üzerine yapılan ilk ve en önemli çalışma olarak kabul edilen Malmberg (2002) çalışmasında, kapasite kullanımı ve D/B döngü sürelerini değerlendirmek amacıyla OD/BS ve OAD/BS sistemleri arasında karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirmiştir. Ayrıca, birim yük depolama/boşaltma sistemleri için teknoloji seçimini ve performans uygunluğuna yönelik basit analitik kavramsal araçlar OAD/BS sistemleri için önerilmiştir. Araştırmacı, depolama politikalarını içeren çalışmasında, depolama politikasına ve fiziksel sistem konfigürasyonuna bağlı olarak koridorlarla ayrılmış olma yeteneğinin, tek talimatlı döngülere kıyasla OAD/BS'de çift komut D/B döngülerinin sayısını artırabileceğini ifade etmiştir. Maliyet faktörlerini göz önünde bulundurarak, Malmberg (2003a), sistem maliyeti ile performans ölçümleri arasındaki dengeyi değerlendirmek için bütçe kısıtlamasına uygun bir entegre model önermiştir. Daha sonraki bir çalışmasında, Malmberg (2003b), alternatif OAD/BS tasarım konfigürasyonları için TK/ÇK döngü sürelerini ve araç kullanımını değerlendirmek amacıyla ilk modellerini genişleterek çift komutlu operasyonların oranını tahmin etmiştir.

Tappia vd. (2015), otomatik depolama çözümlerinin (OD/BS ve OAD/BS) enerji tüketimini ve çevresel etkilerini değerlendiren analitik bir model önermiştir. Daha önceki çalışmalarda operasyonel ve ekonomik yönlerin öne çıktığı göz önüne alındığında, enerji tüketimine ve çevresel performansa yeterince vurgu yapılmadığını belirtmişlerdir. Bu çalışmanın benzersiz yönü, enerji tüketimini depo yapılandırması ve ekipman özellikleriyle ilişkilendirmesidir. Yani, çevresel sürdürülebilirlikteki eksikliği giderme açısından mevcut literatüre katkıda bulunmaktadır. Farklı depolama kapasiteleri ve geçiş kapasiteleri altında 25 senaryo ile analiz edilen modelde sonuçlar, otomatik depoların değerlendirilmesinde ekonomik, operasyonel, enerji tüketimi ve çevresel yönlerin göz önünde bulundurulmasının önemini vurgulamıştır. Ayrıca, çevresel etki dikkate alındığında, teknoloji seçiminin OD/BS'den OAD/BS'ye doğru kaydığını göstermektedir. Ancak, modelin bir kısıtlaması olarak, maliyetlendirme aşamasında bazı kullanıcı ile ilgili unsurların (finansal kaynaklar vb.) dikkate alınmadığı belirtilmiştir. Bu, çalışmanın geliştirilmesi için bir fırsat sunmaktadır; özellikle daha önce incelenen OAD/BS sistemlerinde çevresel faktörleri de içerecek şekilde iyileştirmeler yapılabilir.

Manzini vd. (2016), genellikle gıda ve içecek endüstrisinde sıkça kullanılan ve sınırlı çeşitli büyük hacimli ürünlerle çalışan ve çoklu çok derin depolama şeritleri ile çalışan G/Ç noktalarına göre düzen ve sistem yapılandırmalarına göre seyahat edilen mesafeyi ve döngü

süresini belirlemek için orijinal analitik modeller kümesini sunmuştur. Çalışmada olduğu gibi, yayınlanma zamanında literatürde daha önce incelenmemiş yapılandırmalarda OAD/BS'nin döngü süresini ve seyahat mesafesini tahmin etmek için analitik modeller geliştirilmiştir. Önerilen analitik model ve simülasyon sonuçlarıyla hem TK hem de ÇK için ortalama süre ve mesafe karşılaştırılmıştır. Toplam depolama maliyetlerini içeren kapsamlı modellemenin yapılabilmesi için ileriye dönük araştırmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca, bu çalışmada eşit olarak kabul edilen uydu ve mekik sayılarının eşit olmadığı durumları içeren çalışmalar da göz önünde bulundurulabilir.

Daha önceki çalışmalardan farklı olarak, Lerher (2018) tarafından önerilen çalışma, yatay ve çapraz hareket edebilen mekik taşıyıcıları için analitik seyahat süresi modellerini içermektedir. Analitik modellerin performans analizlerini doğrulamak amacıyla simülasyon modeli de uygulanmıştır. Araştırmacılar, önerdikleri model sayesinde belirli varsayımlar altında maliyetin azaldığını bildirmişlerdir. Ayrıca, önerilen analitik modellerin performans karşılaştırması sonucunda hata payının %1.14'ten az olduğu belirlenmiştir. Bu durum, modelin doğruluğunun oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Lerher vd. (2021), Lerher'in (2018) çalışmasının aksine, farklı raflama konfigürasyonlarını dikkate alarak çok seviyeli bir mekik aracının simülasyon tabanlı karşılaştırmasını yapmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada, farklı raf düzenlemeleri altında çoklu mekik araçlarının performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Simülasyon tabanlı performans karşılaştırmasının sonuçlarına göre, sapmaların %1'den az olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, çok seviyeli mekik aracının farklı raf konfigürasyonlarında tutarlı bir performans sergilediğini ve seçilen raf düzenlemelerine bağlı olarak etkili bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu çalışma, lojistik ve depolama sistemlerinde çok seviyeli mekik araçlarının kullanımı konusunda önemli bir anlayış sağlamak ve endüstri profesyonellerinin etkili kararlar almasına yardımcı olmaktadır.

D'Antonio vd. (2018), OAD/BS sistemlerinin yaygın kullanımına rağmen performans metriklerinin değerlendirmesindeki eksikliklere dikkat çekmiş ve bu nedenle çalışmalarındaki ayrıntılı boşlukları doldurmayı amaçlayarak OAD/BS'nin performansını tahmin eden orijinal analitik modeller sunmayı hedeflemişlerdir. Başlangıçta, bu modeller, mekik ve uydunun farklı görevleri eş zamanlı olarak gerçekleştirme yeteneğini dikkate alarak ürünlerin depolanması ve alınmasına yönelik gerçek kriterleri hesaba katmaktadır. Araştırmacılar bu çalışmada döngü süresinin ortalama değerini ve standart sapmasını değerlendirmiştir. Farklı depo konfigürasyonları ve farklı dağıtım senaryolarında simülasyonlar aracılığıyla çalışmalarını doğrulamışlardır. Sayısal sonuçlar, gerçek dağıtım koşullarını dikkate almanın OAD/BS performansının daha doğru bir değerlendirmesi için önemli olduğunu göstermiştir. Bununla

birlikte, analitik sonuçlar ile simülasyonlar arasındaki standart sapma değerlerinde daha büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu nedenle, modelin doğruluğunu artırmak için döngü süresinin standart sapması üzerine daha fazla çalışma yapılmalıdır. Bu konudaki gelecekteki çalışmalar için OAD/BS tasarımlarında enerji denklemleri ve verimliliği üzerine çalışmalar yapılabilir. Gerçekçi depo konfigürasyonları ve dağıtım politikalarının amacı, depo tasarımında sistemlerin performansının değerlendirilmesine önemli destek sağlamaktadır.

D'Antonio ve Chiabert (2019), çalışmalarında çoklu mekik derin koridorlu OAD/BS performansını değerlendirebilen yeni analitik modeller önererek literatürde depolama teknolojilerini genişletmeyi amaçlamışlardır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, önerilen model, S/R için gerçek kriterleri dikkate almayı ve araçların aynı anda farklı görevlerini yerine getirme yeteneklerini göz önünde bulundurarak döngü süresini ve verimliliği değerlendirmek için imkan sağlamaktadır. Model, farklı döngü tipleri için farklı raflama yapılarındaki farklı araç sayıları ile OAD/BS'ler üzerinde simülasyonlarla doğrulanmıştır. Model, performans ölçümlerinin tahmininde hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Ancak, gelecekte model enerji denklemleri ile genişletilebilir.

Battara vd., (2022), derin koridorlu çoklu uydu OAD/BS sistemi için benzersiz bir tasarım geliştirmek için yenilikçi bir analitik-simülasyon modeli önermiş ve uygulamışlardır. Birçok çalışma, işlem sistemi kuyruklarına karşılık gelen tampon bölgelerini değerlendirmek yerine hizmet sürelerini incelemeye odaklanmıştır (Manzini vd., 2016). Bu çalışmada, araştırmacılar önceki çalışmalarda araçlar arasındaki etkileşimler, depolama operasyonlarında bekleme süreleri, mekiklerin ve uyduların boşta bekleme süreleri, depolama operasyonlarında hizmet süreleri ve araçların depolama veya boşaltma operasyonlarında kullanımı gibi unsurları göz ardı etmişlerdir. Ancak bu çalışmada, hizmet süresi gibi parametreler dikkate alınmıştır. Ayrıca, bu çalışmada nadiren bahsedilen derin koridor ve çoklu uydu sistemlerini, içecek endüstrisine dair bir olasılık karşılaştırmalı ve rekabetçi çoklu senaryo analizi gerçekleştirerek bir vaka çalışmasına uygulamışlardır. Bu nedenle araştırmacılar, çalışmalarını analiz, literatür ve gerçek uygulamalar arasındaki boşluğu kapatan gerçekçi varsayımlara dayandırmaktadır. Gelecekte bu hibrit model depo düzeni, şerit derinlikleri, asansör sayısı ve araç kullanımı, maliyetlendirme gibi birçok parametrede geliştirilebilir. Farklı parametreler temelinde diğer depolama/boşaltma sistemleriyle karşılaştırılabilir (döngü süresi, kaynak kullanımı, maliyet, raf yapılandırması, verimlilik).

Kang (2021), diğer çalışmalardan farklı olarak, dikey olarak yığılmış ve üstten alım OAD/BS sistemi için tekrar sıralama işlemlerini en aza indiren bir sıralama düzenini belirlemek için sezgisel bir açgözlü algoritma önermektedir. Önerilen algoritmanın sayısal sonuçlarına

göre, en iyi çözümün rastgele sıralama ortalamasından %12.7 daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma, depolama ve alım sistemlerinde önemli bir gelişme olarak kabul edilebilir. Ancak, algoritmanın hem doğruluk hem de hesaplama süresi açısından geliştirilebileceği unutulmamalıdır. Önerilen algoritma açgözlü bir yaklaşım benimsediğinden, iyi performans gösteren sıralama problemleri için heuristik yöntemler, tabu arama veya genetik algoritma gibi alternatif algoritmalar denenebilir. Bu tür iyileştirmeler, gelecekteki araştırmaların ve uygulamaların depolama ve lojistik sistemlerinde daha etkili ve verimli çözümlere ulaşmasına yardımcı olabilir.

Yu vd. (2023), OAD/BS içinde sıralama problemine odaklanarak önemli bir katkı yapmaktadır. Bu problem NP-Hard kategorisinde olmasına rağmen, dinamik programlama kullanarak sıralamanın optimizasyonu sağlanmıştır. Çalışmada sadece alım sırasına odaklanılmış ve tek talimat döngüsü ile çalışılmıştır. İleriki çalışmalarda, D/B operasyonlarına odaklanan çift komutlu döngülerle çalışmayı içeren iyileştirmeler yapılabilir. Aynı zamanda işlem, katmandan katmana raf yapılandırılmalarına genişletilebilir. Ayrıca, gelecekteki çalışmalarda sonuçlar simülasyonlarla doğrulanabilir ve maliyetler modellere entegre edilerek diğer depolama sistemleri ile karşılaştırmalar yapılarak daha kapsamlı bir bakış açısı elde edilebilir. Bu şekilde, OAD/BS içindeki sıralama problemine daha kapsamlı bir bakış açısı elde edilebilir ve depolama sistemlerinin verimlilik ve maliyet etkinliği açısından değerlendirilmesi yapılabilir.

Ekren (2021), OAD/BS tasarımı için pareto-optimal çözümler sunarak analitik modelleme yapan tek çalışmadır. Bu çalışmada, Ekren (2021), diğer çalışmalardan farklı olarak, bir OAD/BS tasarımı için ortalama döngü süresinin minimumunu ve işlem başına ortalama enerji tüketimini eşzamanlı olarak en aza indirmeyi amaçlayan hiyerarşik bir yaklaşımla çok hedefli bir optimizasyon modeli sunmuştur. Bu, OAD/BS gözden geçirmesinde çok hedefli bir optimizasyon modeli kullanılan ilk çalışmadır. Yine pareto-optimal çözümler için sunum yapılması bu çalışmayı ayıran özelliklerindedir. Çalışmada, amaç fonksiyonunun ortalama döngü süresi ve işlem başına enerji tüketiminin eşzamanlı minimizasyonu ile ilgili bir OAD/BS tasarımı incelenmiştir. Sonuçlar simülasyonlarla doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, döngü süresi büyük ölçüde ayak izi şekli tarafından etkilenmekte ve elektrik tüketimi sistemin kat sayısından etkilenmektedir. Bu bağlamda, iki hedef göz önünde bulundurulduğunda, pareto-optimal çözümlerin, düşük derinlikte tasarım faktörleri ve düşük sayıda katın performans ölçütlerini önemli ölçüde etkilediği söylenebilir. Bu çalışma, farklı depo kapasitesi senaryoları için pareto-optimal çözümler göz önünde bulundurularak geliştirilebilir. Yine bir katkı olarak,

aynı çalışma üzerinde maliyet hesaplamaları yapılarak performans ölçütleri üzerindeki etkileri araştırılabilir.

Analitik modelleme yaklaşımını kullanan çalışmalar düşünüldüğünde, Tappia vd. (2015) hariç, tüm çalışmaların TK/ÇK döngülerini kullandığı görülmektedir. Çalışmalarında dinamik programlama ve pareto-optimal çözüm yaklaşımlarını kullanan yazarlar, TK döngülerine odaklanmıştır. Raf yapılandırması göz önüne alındığında, çalışmaların çoğunun çok katmanlı raf yapılandırması ile çalıştığı görülmektedir. Yine çoğu çalışmada olduğu gibi araştırmacıların çoğunlukla döngü süresi, verimlilik ve kaynak kullanımı gibi temel ölçümlere odaklandığı, tasarım senaryoları, maliyet ve enerji tüketimi gibi önemli parametreleri ele alan çok az çalışma olduğu görülmektedir. Bu konudaki literatürde büyük bir boşluk bulunmaktadır. Gelecekteki çalışmaların genellikle maliyet ve enerji tüketimi gibi önemli performans ölçümlerine odaklanması ve bunları farklı yapılandırmalarla karşılaştırması önerilebilir.

Kuyruk ağı (KA), müşterilerin hizmet ihtiyaçlarını karşılamak için ziyaret ettikleri hizmet istasyonlarının bir koleksiyonudur (Ekren ve Heragu, 2012). Literatürde çeşitli kuyruk ağı türleri bulunmaktadır: açık kuyruk ağı (AKA), kapalı kuyruk ağı (KKA) ve yarı-Açık kuyruk ağı (YAKA) (Heragu et al., 2011). AKA, müşterilerin belirli bir hızda sınırlı sayıdaki sunucuda işlenmek üzere bir veya daha fazla kuyruğa beklediği bir ağıdır. AKA'nin aksine, KKA sisteminde dolaşan sabit sayıda müşteri bulunmaktadır. YAKA ise KKA ve AKA sistemlerinin bir varyasyonudur. Bu ağda müşteriler belirli bir hızda gelir ve herhangi bir anda işlenebilecek maksimum müşteri sayısı sabittir. Bir senkronizasyon istasyonu, gelen müşterileri ağ kaynaklarından bir senkronizasyon kuyruğu kullanarak tahsis eder (Battara et al., 2022).

Kuo vd. (2007), Fukunari ve Malmborg (2008) ile Zhang vd. (2009), iç içe kuyruk modeline odaklanarak ayrı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu durumun sebebinin, önceki OAD/BS performans analizlerine dayalı akademik çalışmalarda kullanılan durum denklemleri modelinin hesaplamalarının oldukça zaman alıcı olması olduğu söylenebilir.

Kuo vd. (2007), tek derinlikli ve katmanlı yük depolama/boşaltma sistemleri için gerçekçi işletme varsayımları altında beklenen operasyonel çalışma süresini tahmin etmek için 12 hizmet senaryosu ile asansörlerin ve araçların seyahat sürelerini ve olasılık dağılımlarını formüle etmişlerdir. Model, sistem performansı, bekleme süreleri ve araç kullanım parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, rastgele veya değişken ürün gözü depolama politikalarının avantajları da çalışmada belirtilmiş ve sistem maliyetinin hesaplamalarına da yer verilmiştir. Araştırmacılar, mevcut OAD/BS modellerinin sistemin performans yönlerini etkin bir şekilde ele almadığını belirtmişler ve mevcut çalışmalarının bu ihtiyaca cevap verdiğini bildirmişlerdir. Çalışmanın bulgularına göre, model araç kullanımı için doğru tahminler

sağlamış ancak diğer önemli performans ölçütlerini tahmin etmede nispeten düşük doğruluk elde etmiştir.

Fukunari ve Malmberg (2008), Malmberg'un (2002) çalışmasını genişletmişlerdir. Bu modelde, araştırmacılar, koridor sayısı, OA'lar ve depolama rafları gibi faktörleri dikkate alarak rastgele depolama varsayımları ve iç içe kuyruk modeli yaklaşımlarını kullanmışlardır. Araştırmacılara göre, büyük problemler için bu yöntem, önceki modellere kıyasla verimli bir şekilde ölçeklendirilebilir. Önceki çalışmalardan farklı olarak, model doğruluğu simülasyon ile doğrulanmıştır.

Zhang vd. (2009), Kuo (2007) ve Fukunari & Malmberg (2008)'un önceki çalışmalarının OAD/BS döngü süresi modellerinin işlem bekleme sürelerini tahmin etmede yetersiz olduğunu belirttikleri bir dönemeç noktasındadır. Onlar varyansa dayalı ağ yaklaşımından dinamik olarak seçim yapan bir yaklaşım önerdiler. Bu çalışmada, araştırmacılar ayrıca koridor sayısı, depolama rafları, raf derinliği, genişlik ve OA'lar gibi çeşitli parametrelerin otonom depolama ve çıkarma döngü süreleri üzerindeki etkilerini incelediler. Bu önerilen yaklaşımın sonuçları, işlem bekleme süresi tahminlerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır.

Ozaki vd. (2016), grup kısıtlamalarını dikkate alarak OAD/BS tasarımı için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Algoritma oluştururken kuyruk teorisinden yola çıkmışlardır. Önerilen algoritmanın etkinliği, simülasyonlar aracılığıyla çeşitli faktörlerin hesaplanması ile gösterilmiştir. Tasarım sonuçları, bu faktörleri göz ardı eden tasarımlarla karşılaştırıldığında önemli farklılıklar ortaya koymuştur. Araştırmacılara göre, bu sonuçlar, önerilen yöntemin OAD/BS tarafından uygulanan kısıtlamaların kesin nicel değerlendirilmesini sunduğuna dair kanıt olarak hizmet etmektedir. Çalışmada sadece maliyet ve verimlilik performans ölçütleri olarak ölçümler yapılmıştır. Yazarlar, modelin önerilen yöntemle dinamik bir ağ akışı modelini entegre ederek ve çoklu depolama ve çıkarma planları oluşturarak yeniden değerlendirilebileceğini bildirmişlerdir.

Heragu vd. (2011), Marchet vd. (2012) ile Epp vd. (2017), önceki çalışmalardan farklı olarak AKA modellerini çalışmalarında kullanmışlardır. OD/BS ve OAD/BS sistem değişkenlerini katmanlı bağlayıcı yapıda AKA yaklaşımı ile modellemiş ve bu sistemlerin performansını bir üretim sistem performans analizörü (SPA) ile analiz etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, MPA'nın iki sistemin alternatif konfigürasyonlarını hızlı bir şekilde değerlendirmede simülasyona göre üstünlüğünü vurgulamıştır. Araştırmacılar, bu çalışmanın, OD/BS ve OAD/BS performans ölçümlerini analitik bir model kullanarak katmanlı bağlayıcı yapıda ilk kez tahmin etmeye yönelik olduğunu iddia etmektedirler. Çalışmanın sonuçları

değerlendirildiğinde, katmandan katmana OAD/BS analizinde AKA yaklaşımını kullanmanın doğru olmadığı durumlarda diğer kuyruk ağı modellerinin denenebileceği sonucuna varılmıştır.

Tek koridorlu OAD/BS'lerin ortalama performans ölçütlerini hesaplama yöntemleri, Marchet vd. (2012) ile Lerher vd. (2015) tarafından geliştirilmiştir. OAD/BS literatüründeki önceki katkıları genişleterek, Marchet vd. (2012), özel bir katmandan katmana yapılandırma ile OAD/BS modelini, açık bir sıra ağı kullanarak katman bağımlı bir yapıda tasarlamışlardır. Erken dönem çalışmalarda model etkinliğini doğrulamak için nadiren kullanılan simülasyon tekniği, bu çalışmada performans ölçütlerinin de doğruluğunu göstermek için kullanılmıştır. Mevcut araştırmalar, OAD/BS raf yapılandırması ve ürün kutuları için maliyet-etkililik çalışmaları yürüterek daha da geliştirilebilir.

Epp vd. (2017), katman bağımlı tek koridorlu araçlarla OAD/BS'lerin performansını değerlendirmek için bir yöntem sunmuşlardır. Sistem, bir kesikli zamanlı AKA olarak modellenmiş ve kuyrukların hizmet süreleri, asansör ve araç hareketlerini değerlendirerek elde edilmiştir. Araştırmalarda, hizmet sürelerinin asansörler ve araçlar için sürekli olarak dağıtıldığı varsayımı altında, yaklaşık olarak tahmin edildiği görülmektedir. Ancak, sürekli zaman yerine stokastik süreçlerin olduğu bir yaklaşım varsa, bu süreler kesin olarak modellenemez. Epp vd. (2017), bu yöntemi önceki modellerde kullanılan sürekli zamanlı MPA ile karşılaştırmışlar ve tahmindeki hata oranının poisson gelişlerine sahip yapılandırmalarda daha düşük, poisson olmayan gelişlerde ise daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Bu sonuçla, yöntemlerinin karmaşık iç lojistik sistemlerin tasarım süreçlerinde karar destek sistemlerine destek sağlayacağını belirtmişlerdir.

Roy vd., (2014), araç blokajının performans ölçümleri üzerindeki etkilerini incelemek için bir kuyruk ağı yaklaşımı önermişler ve aynı zamanda YAKA yaklaşımı ile performans ölçümleri üzerine çalışmalarında ele alınmışlardır. Daha önceki OAD/BS tasarımı ve performans analizi çalışmalarında hiçbir şekilde blokaj etkileri ele alınmamıştır. Bu açıdan bu çalışma, türünde bir ilk niteliği taşımaktadır. Ancak, otomatik rehberli araç (ORA) tabanlı malzeme taşıma sistemlerinde müdahale etki analizleri detaylı bir şekilde tartışılmıştır (Anh ve De Koster, 2008). Bu modelde, araştırmacılar tek seviyeli OAD/B sistemi performansı üzerinde blokaj gecikmelerinin etkilerini analiz etmek için analitik modeller geliştirmişlerdir. Bu çalışmada da, yazarların daha önceki çalışmalarında kullandıkları çok sınıflı YAKA kullanmışlardır. Sonuçların etkinliği aynı zamanda simülasyon ile de doğrulanmıştır ve sonuçlar, performans tahminlerinin oldukça doğru olduğunu göstermiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar, blokaj gecikmelerinin işlem döngü süresi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir (%10-20). Bu geliştirilen analitik modeller aynı zamanda gelecekteki çok

seviyeli OAD/BS sistemi performanslarının temelini oluşturacaktır. Ayrıca, bu çalışmanın, diğer önceki YAKA yaklaşımli çalışmalar gibi, tek bir talimat döngüsü, yani depolama ve çıkarma döngülerini birleştirme özelliği olmaması, çalışmanın eksikliği olarak görülebilir. Gelecekte, blokaj etkisi çift talimat döngülerinde de incelenebilir.

Roy vd., (2015a) araç bekleme noktası konumlarının ve çapraz koridor konumunun seçimini araştırmak için tek bir katman için modeller geliştirmiştir. Roy vd., (2015b) konveyör tabanlı çok katmanlı OAD/BS'nin performansını değerlendirmek için ilk modellerini genişletmiş ve her bir katmanı birbirine bağlamak için konveyörler kullanmıştır. Takip eden bir çalışmada Roy vd., (2017), dikey aktarım mekanizması olarak bir asansör ve bir konveyör sistemi kullanan katmanlı bir OAD/BS'nin performansını değerlendirmek için önceki araştırmalarını genişletmiştir. Katmanlar arasındaki dikey transferler için bir AKA ile bireysel katmanlar içindeki seyahat için YAKA modellerini birleştirerek entegre bir model geliştirmişlerdir.

Depo tasarımında, bugün ve gelecekte tüm koşullarda talepleri karşılayabilen engelsiz bir OAD/BS tasarlamak önemlidir. Bu tür sistemlerin kurulumu hem maliyetli hem de zaman alıcı olduğundan, doğru depoyu ilk seferde tasarlayabilmek çok önemlidir. Bu nedenle, tüm performans ölçümleri OAD/BS tasarlanırken karşılaştırmalar ve simülasyonlarla desteklenmelidir.

Ekren ve Heragu (2012), OAD/BS tasarımı için iki modelleme yaklaşımı olan analitik ve simülasyon modellerini kullanmış ve sistem performans ölçütleri ve maliyet açısından vinç tabanlı otomatik depolama/boşaltma sistemleri (VOD/BS) ile karşılaştırmışlardır. Hem OAD/BS hem de VOD/BS için deneyler yapılmış ve simülasyon ile doğrulanmıştır. Sonuçlardan, OAD/BS'nin döngü sürelerinin VOD/BS'ye göre nispeten düşük olduğu görülmüştür. Ancak, OAD/BS'nin maliyeti her zaman VOD/BS'den daha yüksektir. Bu nedenle maliyet açısından VOD/BS, OAD/BS'ye göre daha iyi bir alternatif gibi görünmektedir. Ancak, maliyetle ilgili bölümlerde, OAD/BS ve VOD/BS'nin en önemli bileşenleri olan araçlar, asansörler ve vinçlerin kesin maliyet verilerine ulaşamamaları ve makaleler ve web siteleri gibi kaynaklardan tahmin etmeye çalışmaları, çalışmanın maliyetle ilgili çıkarımlarının güvenilirlik seviyesini düşürmektedir.

YAKA yaklaşımı ile yapılan başka bir çalışmada, Ekren vd. (2013), analitik bir model kullanarak tek sınıf, çoklu sunuculu bir OAD/BS sistemi olarak bir OAD/BS sistemi modellemiştir. Bu çalışmada model, kuyruk bekleme sürelerini dikkate almaktadır. Oluşturulan model tekniği daha sonra simülasyon ile doğrulanmıştır. Ekren vd. (2013)'ne göre, bir sistemde sonsuz sayıda kaynak ve dışarıda bekleyen sonsuz sayıda müşteri olmayacağından, KKA ve

AKA kullanmanın sistemdeki zamanları gerçek zamanlardan uzaklaştırdığı için, KKA ve AKA kullanımı büyük öneme sahiptir. Bu çalışma, KKA ve AKA yaklaşımlarını kullanarak performans ölçümlerini elde etmek için genişletilebilir.

Ekren vd., (2014), OAD/B sistemi için alternatif depo konfigürasyonlarını değerlendirmek için kullanılabilir analitik modelleri, tek sınıf, çok sunuculu YAKA olarak değerlendiren analitik modelleri modellemiştir. Ancak, önceki çalışmalarının aksine, bu çalışmada analiz yapmak için bir matris-geometrik yöntem (MGM) uygulamışlardır. Modelden elde edilen dört farklı performans ölçümü, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, MGM'nin temel performans ölçümlerini tahmin etmede daha iyi çalıştığını göstermektedir.

Önceki çalışmalardan farklı olarak, Cai vd., (2014), performans ölçümlerini değerlendirmek için iki farklı senkronizasyon politikasına göre analitik yöntemler sunmuşlardır: çok sınıflı, çok aşamalı YAKA ile senkronizasyon ve performans ölçümlerini değerlendirmek için fiziksel senkronizasyon. Çalışmanın sonucunda, sanal senkronizasyona sahip bir OAD/BS'nin fiziksel senkronizasyona göre daha iyi bir performans değeri sunduğu sonucuna varılmıştır.

Kuo vd. (2008), OAD/BS uygulamaları için KKA yaklaşımı kullanarak D/B sistemleri için sınıf tabanlı bir döngü süresi modeli önermektedirler. Bu çalışmada daha önce bahsettiği maliyet kavramını içermemiştir. Farklı konfigürasyon senaryoları altında döngü süresi, kaynak kullanımı ve bekleme süresi gibi parametreleri analiz etmişlerdir. Gelecekte, maliyetleri kapsamlı bir şekilde düşünerek önleme veya araç müdahalesi gibi alternatif tasarım modellerine genişletilebilir. Ayrıca, talebe göre araç asansör filosunun belirlenmesi ve raf konfigürasyonlarının optimizasyonu gibi konularda çalışmalar, bu alandaki literatüre önemli katkılar yapacaktır. Fukunari & Malmborg, (2009), OAD/BS'yi kavramlaştırmak için KKA yaklaşımını kullanarak döngü süresi modeli önermektedir ve bu modeli vinç tabanlı OD/BS ile performans metriklerini karşılaştırmışlardır. Önerilen modeller aynı zamanda geçmiş modelleri geliştirmektedir.

Zou vd., (2016), katman bağımlı OAD/BS modellemesini analiz etmiş ve asansör ve araçların önceki çalışmalardan farklı olarak sıralı değil eş zamanlı olarak istekte bulunabileceği bir paralel işleme politikasını önermişlerdir. Araştırmacılar, modelin performans ölçütlerini fork-join kuyruk ağı ile başlangıçta formüle etmişlerdir. Sonuçlar simülasyonlarla doğrulanmıştır. Analiz sonucunda fork-join kuyruk ağının, paralel işleme politikası içinde sistemin performans kriterlerini doğru şekilde öngördüğü gözlemlenmiştir. Sayısal deneyler, 10 katmanın altındaki sistemlerde paralel işleme prensibinin performansının sıralı işleme prensibinin en az %5,51 daha iyi olduğunu göstermiştir. Ancak, paralel işleme politikasının

dezavantajı, raf yüksekliği ve koridor uzunluğu arttıkça etkinliğinin azalmasıdır. Gelecekteki çalışmalarda, katmanlı bağımlı OAD/BS paralel işleme prensibinin performansının incelenmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

Zhang vd., (2011), önceki çalışmalardan farklı olarak genişletilmiş OAD/BS sistemlerinin kavramsallaştırma modellerini içermektedir. Önceki çalışmalarında gömülü kuyruk modeli ile çalışarak, araştırmacılar, poisson olmayan kuyruk sistemlerinde kuyruk uzunluklarının olasılık dağılımını tahmin etmek için yeni bir algoritma önermişlerdir. Araştırmacılar, asansör sayısının araç sayısına eşit olduğu önceki çalışmaların aksine, asansör hizmet sürelerinin poisson olmayan olduğu durumları tartışmışlardır. Sonuçlar simülasyonlarla doğrulanmıştır. Döngü süresi modelleri, OAD/BS'nin ve OD/BS teknolojisinin seçiminde kullanılmak üzere en uygun raf yapılandırmalarını ve araçlar ile asansörlerin optimal sayısını belirlemek için kullanılabilir ve gelecekteki çalışmalarda kullanılmak üzere OAD/BS ve OD/BS teknolojisinin seçimine karar vermede kullanılabilir.

Kuyruk ağları kullanılan hiçbir çalışma çok katmanlı yapıyı ele almamıştır. Geçmiş çalışmalar genellikle tek veya çift katmanlı raflara odaklanmıştır. Manzini vd. (2016), çok katmanlı yapı üzerine ilk çalışmayı gerçekleştirmiştir. Bu alandaki literatürde boşluk bulunmakta ve bu sebeple gelecekte çok katmanlı yapılar ile çalışmalar yapılması önerilebilir. Yinede, sırayla kuyruk ağı yaklaşımlarını incelediğimizde, iç içe kuyruk modelini kullanan çalışmaların hem tek komutlu ve çift komutlu olanları ile ilgili çalışmaları içeren çalışmalar olduğunu, diğer yaklaşımları kullanan çalışmaların genellikle sadece tek komutluyu içerdiğini görülmektedir. Ekren ve Heragu (2012) çalışmalarında YAKA yaklaşımını kullanarak çift komut döngülerini kullandılar, Cai vd., (2014) ile Fukunari ve Malmborg (2009) aynı kuyruk ağı yaklaşımı ile TK/ÇK döngülerini ele alan bir çalışma gerçekleştirdiler. Tüm bu çıkarımlara dayanarak, gelecekte, kuyruk ağı yaklaşımları ile OAD/BS tasarımlarını farklılaştırarak, verimlilik, tasarım senaryoları ve enerji tüketimi gibi parametrelerde daha fazla alan bırakacak çalışmalar yürütülebilir.

OAD/BS üzerine ilk çalışmaların ardından, araştırmacılar, önerilen tasarımların döngü süresi, verimlilik, maliyet, bekleme süresi gibi çeşitli performans ölçümlerini karşılaştırarak modelleri doğrulamayı amaçlamışlardır. Direkt simülasyon veya analitik modellerle geliştirilmiş çalışmaların doğrulanmasında araştırmacılar genellikle animasyon özellikleri sağlayan Arena™ ticari simülasyon yazılımını kullanmaktadırlar. Bunun yanı sıra Flexim, Matlab gibi yazılımlarla da uygulamalara rastlanmaktadır.

Ekren vd., (2010), önceden belirlenmiş senaryolardan en iyi asansör ve araç sayısını seçerek Dwell-Point (bekleme noktası), G/Ç noktası, sırayla karıştırma kuralı ve zamanlama

kuralını dikkate alarak bir deney tasarlamışlardır. Çalışmada ortalama döngü süresi, ortalama araç kullanımı ve ortalama asansör kullanımı parametreleri incelenmiştir. Sonuçlar, her parametre üzerinde %95 güven düzeyinde etkisi olduğunu göstermektedir. Çalışmada, her faktörün yüksek seviyesinin, tüm üç performans ölçüsü üzerinde etkisi olduğunu ve varış oranlarının en uygun kombinasyonunu belirlediği bulunmuştur. Bu bulgu, her yüksek seviye faktörünün performans ölçütleri ve varış oranları üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, bu özelliklerin sistemin en iyi performansını sağlamak için birlikte optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Ekren ve Heragu'nun (2011) çalışması, geçmiş araştırmaların aksine, yüksek performansı sağlayan çeşitli raf yapılandırma senaryoları altında OA'ların ve asansörlerin sayısı için neredeyse optimal değerleri bulmayı amaçlamıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemin büyük bir asansör sayısı ve büyük bir yer sağlamanın daha iyi performans sağladığını göstermiştir. Gelecekte bu çalışmaya maliyet faktörünün eklenmesi ve geleneksel vinç tabanlı otomatik depolama/boşaltma sistemi (VOD/BS) ile karşılaştırma yapılması düşünülebilir. Böylece, daha ekonomik ve verimli depolama sistemlerini belirlemek ve seçmek için daha kapsamlı bir bakış açısı sunulabilir.

Ekren (2011), bu çalışmada çeşitli önceden belirlenmiş tasarım senaryoları altında simülasyon yoluyla OAD/BS performans analizi gerçekleştirmiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada bekleme süreleri, kuyruk uzunluğu ve sistemin toplam maliyeti de sisteme entegre edilmiştir. Performans metriklerinin ayrıntılı incelenmesi, en iyi depo tasarımının değerlendirilmesine olanak tanır. Şirketin önceliklerine göre seçilen en iyi depo tasarımı değişmektedir. Bu çalışma, Arena™'da OptQuest kullanılarak farklı tasarım kriterleriyle genişletilebilir. Aynı şekilde, bu çalışma alternatif depo tasarımları ile karşılaştırılabilir.

Ekren ve Heragu (2012a) çalışmalarında, YAKA yaklaşımı ile analitik bir model önermiş ve bu modeli simülasyon ile doğrulamıştır. Simülasyon sonuçları, tüm faktörlerin %95 güven düzeyinde yanıtlar üzerinde önemli etkilerinin olduğunu göstermektedir.

Ekren ve Heragu (2012b), çalışmalarında, OAD/BS ve VOD/BS'nin temel performans ölçütlerini karşılaştıran bir çalışma simülasyon aracılığıyla yapılmıştır. Sonuçlar, özellikle S/R makinelerinin döngü süreleri göz önüne alındığında, OAD/BS'nin çoğu durumda VOD/BS'yi geride bıraktığını göstermektedir. Bununla birlikte, sistem maliyetleri göz önüne alındığında, en iyi tasarımın VOD/BS ile elde edildiği görülmüştür. Bu çalışma, farklı taşıma ve depolama sistemlerinin karşılaştırılması ve performans açısından avantaj ve dezavantajları konusunda değerli bilgiler sağlar. Sistem tasarımında ve uygulamasında performans ve maliyet faktörlerini dikkatli bir şekilde dengelemenin gerekliliğini vurgular.

Marchet vd. (2013), Birleşik Krallık'ta OAD/BS kullanan önde gelen bir malzeme taşıma sağlayıcısından elde edilen verileri kullanarak bir katman yapılandırması kullanarak OAD/BS performans ölçütlerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada maliyetin, raf yapılandırmasının etkisi analiz edilmiş ve son olarak, raf yapılandırmasının verimliliğe etkisi simülasyon yoluyla gösterilmiştir. Sonuçlar, literatürde daha sık incelenen katmandan katmana yapılandırmayı, bu çalışmada incelenen katman bağımlı yapılandırmayla karşılaştırmıştır. Katmandan katmana sistemlerde daha kısa koridorların daha uygun olduğu gözlemlenirken, bir katman bağımlı OAD/BS'nin en uygun yapılandırmasının daha az uzun koridorlara sahip olduğu görülmüştür.

Kumar vd. (2014), sistemin performans ölçütleri üzerindeki etkisini inceleyen ve bölge bağımlı bir OAD/BS modeli oluşturan ilk çalışmadır. Bu çalışma, dikey bölgelerin miktarını ve sınırlarını değiştirmenin sistemin performansı üzerinde nasıl bir etki yarattığını bir simülasyon modeli aracılığıyla incelemektedir. Ayrıca, bu çalışmadaki araştırmacılar, bir katman içinde koridor hizalamasının döngü süreleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmanın sonucunda, dikey bölgelerin optimal bölümlendirilmesi ile işlem döngü sürelerinin %1 ila %12 arasında azaltılabileceği, daha iyi koridor konfigürasyonu ile ise %0,2 ila %15,0 arasında azaltılabileceği gösterilmiştir. Bu çalışma, çok katmanlı sistemlerde araç interferansının etkilerini dikkate alarak daha da geliştirilebilir. Gelecekte çok katmanlı OAD/BS'nin performans ölçütlerini analiz etmek için detaylı bir YAKA yaklaşımı analitik modeli geliştirilebilir.

Akpınar vd. (2017), önceki çalışmalardan farklı olarak bir OAD/BS sisteminin görev başına enerji tüketimini minimuma indirmeyi hedefleyerek çeşitli tasarımları değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Tasarım sürecinde, koridor sayısı, kat sayısı, raf sayısı ve OA sayısı gibi faktörlere dayalı olarak 81 simülasyon deneyi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar bir histogram grafiği ile özetlenmiştir.

Guerrazzi vd., (2019), depo sürdürülebilirliğine katkı sağlayarak derin koridorlu OAD/BS'nin enerji değerlendirmesini analiz ederek bu alana katkıda bulunmuşlardır. Gerçek sistemin özelliklerini dikkate alan simülasyon, seyahat süresi ve enerji modellerini içermektedir. Simülasyon ile doğrulanmış modelin sonuçlarına göre, derin koridorlu OAD/BS'nin enerji tüketiminin yaklaşık %28'i geri kazanılabilir. Ayrıca, oluşturulan model, farklı depolama yapılarındaki enerji tüketimi ve geri kazanımına olan etkiyi incelemek için bir çerçeve sunmaktadır.

Jerman vd., (2021), farklı raf konfigürasyonları altında yeni bir tasarım olan hareketli asansörleri kullanan otonom araç depolama/boşaltma sistemi OAD/BS/HA için iki alternatif

tasarım denemişlerdir. Araştırmacılar, OAD/BS/HA sistemi tasarımlarının, katman bağımlı MOD/BS'ye alternatif olarak geliştirilen ilk tasarımlar olduğunu belirtmişlerdir. OAD/BS/HA simülasyonu, bir G/Ç noktası ve iki G/Ç noktası ile iki farklı tasarım ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, iki ayrı G/Ç noktası tasarımlarının, tek bir G/Ç noktası tasarımlarından daha iyi verimlilik sağladığını göstermektedir. Ayrıca, sistemdeki sütun sayısının azaltılması sistemin performansını artırmaktadır. Araştırmacıların tasarladığı OAD/BS/HA modelinde, çarpışmaları önlemek için ORA'lar ve HA'ler için herhangi bir seyahat kuralı bulunmamaktadır.

Ekren vd. (2023), çalışmalarında, ORA ve HA'lerin çarpışmalarını önlemek için mevcut OAD/BS/HA tasarımına ek olarak farklı iki kural içeren yeni bir tasarım önermiş ve bu tasarımı katman bağımlı MOD/BS ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, yüksek verimlilik gereksinimleri için katman bağımlı MOD/BS'nin maliyet açısından etkili olduğunu ancak düşük ve orta verimlilik gereksinimleri için OAD/BS/HA teknolojisinin tercih edilebilir olduğunu göstermektedir.

Ekren ve Heragu (2010), çalışmasında diğer çalışmalardan farklı olarak, önceki çalışmalardan elde edilen verilerle OAD/BS raf yapılandırması için simülasyon tabanlı bir regresyon analizi modeli önerilmiştir. Modelde, altı depo senaryosu için 30 farklı regresyon modeli geliştirilmiştir. Sonuçlar, depo tasarımının pratikte mümkün olduğunca x-ekseninde uzun olması gerektiğini önermektedir. Bu, depo performansını artırmak ve sistem verimliliğini maksimize etmek açısından önemli bir bulgu olarak değerlendirilebilir. Çalışma, analitik bir model yerine simülasyon tabanlı regresyon analizi ile OAD/BS raf yapılandırmasını dikkate alarak benzersiz ve değerli bir katkı sağlamaktadır.

## **RKD/BS**

RKD/BS henüz yeni bir teknoloji olması ve az sayıda firmada uygulanmaya başlanmış olması sebebiyle akademik alanda bu konuyla ilgili henüz yayınlanmış olan çalışmaların sayısı da oldukça azdır. Bu otomatik depolama sistemindeki akademik çalışmalar incelendiğinde birçoğunun amacının optimum depo boyutlarının ne olması gerektiğini belirlemek olduğu görülmektedir. Çünkü sistemin çalışma süreleri robotların hızına, x-, y- ve z boyutlarına ve kutu sayısına bağlı olarak farklılık gösterir.

De Koster (2018), çalışmasında, farklı türdeki otomatik sistemlerin yanı sıra bu tür sistemler hakkında bilinen bir dizi bilimsel sonucu tartışmıştır. İlk olarak birim yükler (kutular ve paletler) için depolama sistemlerini araştırmıştır. Sonrasında tek tek paketlerin toplanabildiği sipariş toplama sistemleri incelenmiştir. Son olarak, depo otomasyonuna ilişkin gelecekte yapılabilecek çalışmalar üzerine düşüncelerini sunmuştur.

Azadeh vd., (2019), bu çalışmalarında, dikey sistem performansını analiz etmek ve yatay sistem ile işlem kapasitesini karşılaştırmak için bir çerçeve oluşturmuşlardır. Bu amaçla, tasarımı optimize etmek için KKA oluşturmuşlardır. Sonuçlar, dikey sistemin optimum yükseklik/genişlik oranının yaklaşık bir olduğunu göstermiştir. Çok sayıda sistem robotu sistemde engelleme ve gecikmelere yol açabileceğinden farklı robot engelleme politikalarının (robot geri dönüş ve bekleme noktası politikası) sistem verimi üzerindeki etkisini karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre bekleme-noktası politikası, sistemdeki robot sayısı azken daha yüksek bir sistem işlem kapasitesi üretmekte, ancak, sistemde çok sayıda robot bulunduğu, robot geri dönüş politikası bekleme-noktası politikasını domine ettiğini anlaşılmıştır. Araştırmacılar bu çalışmada ek olarak, dikey ve yatay taşıma sistemlerinin işletme maliyetlerini karşılaştırmışlardır. Buna göre bir G/Ç noktasına sahip sistemler için, dikey sistem her zaman benzer veya daha yüksek bir sistem işlem kapasitesi ürettiği ve yatay sistemle karşılaştırıldığında daha düşük işletme maliyetine sahip olduğu, ayrıca, iki G/Ç noktasına sahip sistemlerde yatay sisteme göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Azadeh vd., (2019), bu makalede, mekik tabanlı depolama/boşaltma sistemleri, mekik tabanlı kompakt depolama sistemleri ve robotik mobil sipariş karşılama sistemleri gibi yeni otomatik ve robotik taşıma sistemleri kategorileri gözden geçirilmiştir. Araştırmacılar her sistem için literatürü üç gruba ayırmışlardır: sistem analizi, tasarım optimizasyonu ve operasyon planlama ve kontrol. Odak noktası olarak, araştırma konusunu ve sorunu analiz etmek için benimsenen OR modelleme metodolojisini tanımlamışlardır. Araştırmacılar pratikte artan kullanımlarına rağmen pek çok yeni robotik sistem ve uygulamanın akademik literatürde pek incelenmediğini belirtmişlerdir. Yerleşim düzeni, depolama ve sipariş toplama sistemi tasarlama yöntemleri gibi hayati önem taşıyan tüm depo tasarımı, planlama ve kontrol mantığı yeni robotize depolar için seçme, depolama yerleştirme, sipariş gruplama, toplayıcı yönlendirme ve toplayıcıdan siparişe atamanın yeniden gözden geçirilmesi gerektiğini bildirmişlerdir. Araştırmacılar bu makalede özellikle siparişleri yerine getirmek için robotik teknolojilerin kullanımı olmak üzere otomatik depolamadaki son trendlere genel bir bakış sunmuştur. Ayrıca, literatürde yeterince (veya hiç) ilgi görmemiş yeni teknolojileri ve yönleri de tartışmışlardır. Yerleşik sistemlerde ele alınmamış araştırma soruları özetlenmiş ve gelişmekte olan teknolojiler için araştırma soruları ortaya koyulmuştur.

Wu vd., (2020), çalışmalarında kompakt robotik otomatik park (KROP) sistemleri adıyla anılan yeni bir malzeme taşıma sistemi üzerinde çalışmaktadır. Böyle bir sistemde, arabalar çift depolama halkasında depolanır ve içteki döner halka, arabayı yükleyen/boşaltan yatay katmanlı bir ORA ile çalıştırılan yatay taşıma için kullanılır. Asansör, dikey bir ORA ile

işletilen dikey taşıma için kullanılır. ORA'nin hareketi ile sistem verimi artırılabilir. İlk katman diğer katmanlardan farklıdır. Araştırmacılar çalışmalarında ilk olarak kuyruk ağı modellerini kullanarak sistem performansını tahmin etmişlerdir. İkinci olarak, analitik modelleri simülasyon ve gerçek bir vaka aracılığıyla doğrulamışlardır. Simülasyon sonuçları tahminlemelerinin doğru olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar üçüncü olarak, araç boşaltma süresini en aza indirerek sistem konfigürasyonlarını optimize etmişlerdir. Son olarak, aynı depolama kapasitesi göz önüne alındığında, gerçek bir uygulamaya ve KROP sisteminin ayak izi alanına dayalı olarak araç boşaltma süresini CAP sistemi ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, sistem kapasitesi 400 olduğunda araç boşaltma süresinin en az %29,7 oranında azaltılabileceğini ve alan kullanımının en az %32,0 oranında iyileştirilebileceğini göstermiştir. Analitik modellerin sistem performansını doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir. Araştırmacılar gelecekteki çalışmalar için, depolama katmanlarında ve çoklu asansörlü KROP sisteminde farklı ORA işletim politikalarını incelemenin ilginç olacağını bildirmişlerdir.

Ko ve Han (2022), yaptıkları çalışmada, RKD/BS'de verilen bir sipariş kümesi için işlem sırasını belirleme problemini ele almışlardır. Bu problemin karmaşıklığına göre, kısa bir hesaplama süresi içinde yüksek kaliteli bir çözüm bulmak için bir rollout sezgisel algoritma önermişlerdir. Ayrıca önerilen algoritmanın performansını artırmak için çeşitli stratejiler sunmuşlardır. Gerçek dünya verilerine dayalı olarak oluşturulan rastgele örnekler üzerinde yapılan hesaplama deneyleri aracılığıyla, önerilen rollout sezgisel algoritmasının gerçek dünya örneklerine etkili bir şekilde uygulanabileceğini göstermişlerdir. Hesaplama sonuçları, önerilen algoritmanın gerçek büyüklükteki örnekler için bilinmeyen optimal değerden %3-%4 arasında farklılık gösteren çözümler elde etmede yeterince etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, önerilen iki performans iyileştirme stratejisinin, çözüm kalitesindeki bozulmayı en aza indirirken hesaplama çabasını önemli ölçüde azaltarak algoritmanın verimliliğini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir.

Chen vd. (2022), bu makalede bir asma robotik kompakt depolama/boşaltma sistemi (ARKD/BS) değerlendirilmiştir. Temel depolama ve taşıma konteynerlerinin bulunduğu yeni bir otomatik kompakt sistem olan her bir düzlemde kutu yığınları oluşturmak için üst üste istiflenir. Kutu toplama robotları, siparişleri yerine getirmek için hedef stok tutma birimlerini (STB) içeren kutuları merkeze taşımakla görevlendirilir. Performansı analiz etmek için bir ayrık olay simülasyon modeli geliştirmişler ve bir ARKD/BS'nin verimlilik ve enerji tüketimi açısından değerlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Verim, robot kullanımı ve sistem enerji tüketimi vb. performans göstergeleri hem tek-STB hem de çoklu-STB için adanmış ve rastgele depolama politikaları ile elde edilmiştir. Sonuçlar, bir ORKD/BS'nin optimum tasarımı için

örneğin verimi optimize etmek için en iyi yerleşim düzeni, belirli bir verimi elde etmek için gereken robot sayısı sınırlı bir depo alanındaki verim ve depolanması gereken maksimum kutu sayısı gibi değerli öneriler sunmaktadır. Bu çalışmada ORKD/BS'nin verimlilik ve enerji tüketim düzeyini simüle etmek için DES kullanılmıştır. Siparişin çevrim süresini, enerji tüketimini ve robot kullanım oranını gözlemleyerek, verimlilik ile enerji verimliliği arasında bir denge kurmak için optimum düzen, robot sayısı ve depolama politikası hakkında yararlı bilgiler elde etmişlerdir. Araştırmacılar gelecekteki çalışmalarda ORKD/BS'de verimli robot planlama ve sipariş dağıtım kurallarının geliştirilmesine odaklanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Trost vd. (2022), çalışmalarında Autostore® sistemi gibi RKD/BS, yukarıdan robotlar tarafından tam otomatik olarak çalışan ve yığın içinde son giren ilk çıkar depolama stratejisi uygulanarak üst üste istiflenen plastik kutularda depolanan ve daha aşağıda bulunan konteynerlere ihtiyaç duyulursa robotlar bunların yerini değiştirdiği bir sistemi incelemişlerdir. Sistem parametrelerine ek olarak, kullanılan robotların veya toplama istasyonlarının sayısı gibi sistem davranışını etkileyen çok sayıda başka faktör varlığını incelemişlerdir. Ayrıca, sistemin kalbi olan robotların birbirleri ile nasıl davrandıkları, limit verimin belirli bir ızgara boyutunda nerede olduğu ve bunun yığın sayısı ile ilişkili olarak nasıl davrandığı sorusu araştırmışlardır. Simio simülasyon programındaki ayırık olay simülasyonu ile olası tasarım değişkenleri ve çalışma modları hakkında bilgi edinmişler ve bunun sonucunda robot sayısının Autostore® sisteminin verimi üzerinde büyük etkisi olduğunu bildirmişlerdir. Araştırmacılar gelecekte, daha büyük ızgara boyutlarına ve optimize edilmiş robot rotalarına sahip simülasyonlar araştırılacağını ve farklı parametre varyasyonlarının ve kombinasyonlarının kullanılmasının, otomatik depolama sistemlerinin envanter stratejileri hakkında daha fazla bilgi sağlayabileceğini bildirmişlerdir.

Trost vd. (2023), bu çalışmalarında da 2022 yılında yaptıkları çalışmalarında olduğu gibi Autostore® sistemi gibi RKD/BS sistemini “son giren ilk çıkar” depolama stratejisi uygulayarak sistemin verimine ve optimum çalışan robot sayısına odaklanmışlardır. Tasarım parametrelerini SIMIO simülasyon programındaki ayırık olay simülasyonu (DES) kullanarak uygulamışlardır. Araştırmacılar sistemi etkileyen birçok parametre ve etki olduğunu belirtmiş bunların nasıl etkileşime girdiğini değerlendirmiştir. Çalışmada farklı ızgara boyutları, doldurma dereceleri, istif yükseklikleri ve genişlik-uzunluk oranları için optimum robot sayısı belirlenmiştir. Son olarak, depolama yerlerinin belirli bir talebi için hangi performansın mümkün olduğu sorusuna kolay ve hızlı yanıtlar verebilmek amacıyla bir tahmin ve ilk uygulama alanı sunulmuştur. İleriye yönelik olarak optimize edilmiş robot yönlendirmeleri ve

farklı depolama stratejileri içeren simülasyonlar incelenmiştir. Farklı sınıf bazlı depolama stratejileri de test edilmiştir. Sayısal simülasyonu doğrulamak ve bir yandan en uygun çalışma koşullarını belirlemek için ve mekik tabanlı sistemler gibi diğer depolama sistemleriyle karşılaştırma yapabilmek için çevrim süresini ve verimi hesaplamak amacıyla RKD/B sistemlerine yönelik analitik bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Tutam vd. (2023), çalışmalarında RKD/BS'nin boyutlarının ne olması gerektiği sorusundan yola çıkmışlardır. Bu bağlamda araştırmacılar sistemin çalışma sürelerinin robotların hızına, x, y ve z boyutlarına ve kutu sayısına bağlı olarak farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarını 10000, 20000 ve 30000 kapasiteli depolar üzerinden gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, kutu sayısı 10.000 olduğunda, sistem için önerilen algoritma ile en iyi boyutlar x, y ve z yönlerinde sırasıyla 37, 55 ve 5'tir. Kutu sayısının 20.000 veya 30.000'e çıkarılmasının z yönündeki bölme sayısını 6'ya yükselttiği belirtilmiştir. Doğal olarak, x veya y yönlerinde en iyi kutu sayısı farklılık göstermektedir (20.000 için 48x71 ve 30.000 için 58x87). Araştırmacılar kullandıkları parametre değerleri için, x, y ve z için en iyi değerler sınıf tabanlı ve rastgele depolama politikaları için aynı olduğunu fakat bu durumun her zaman geçerli olmayacağını bildirmişlerdir.

## MATERYAL VE METOT

### Materyal

Literatürde OD/BS'lerin performans ölçümlerinin yapılabilmesini içeren geçmiş yıllarda oldukça fazla sayıda analitik model yer almaktadır. Fakat, bu tarz problemlerin çözümü için analitik yöntemlerin kullanılması, problemin sistem analizi yapılırken sistemde var olan stokastik durumlar ve OD/B sistemleriyle ilgili problemlerin genellikle büyük boyutlu olmaları gibi sebeplerle zor olabilmektedir. Bu sebeple, bu tür problemlerde sistem analizi ve senaryoların incelenebilirliği hakkında daha esnek ve kullanışlı bir çözüm olan simülasyon modellerinin analitik modeller ile veya tek başına çok sık kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Ekren vd. (2014), yarı açık kuyruk ağı modellerini kullanarak performans ölçümü yaptıkları çalışmalarında, karşılaştırma ve doğrulama yapabilmek amacıyla analitik yöntem ve simülasyonu birlikte kullanmışlardır.

Bu araştırma, 2023 yılında TÜBİTAK 3501 projesi kapsamında Dr. Öğr. Üyesi Mahmut TUTAM'ın proje yürütücüsü olduğu 122M677 numaralı ve "Robot Tabanlı Bir Kompakt Depolama/boşaltma Sistemi Tasarımının Optimizasyonu ve İyileştirilmesi" başlıklı proje kapsamında yürütülmüştür. Tez çalışması süresince Atatürk Üniversitesi ve Erzurum Teknik Üniversitelerinin Mühendislik Fakülteleri Endüstri Mühendisliği bölümlerinin fiziki ve akademik imkanlarından faydalanılmıştır. Araştırmanın uygulama kısmında Arena™ ticari yazılımı kullanılmıştır.

### Metot

#### Simülasyon

Sistem, farklı bir amaç için organize edilmiş, bileşenleri arasındaki karşılıklı etki yoluyla girdilere yanıt olarak çıktılar üretebilen, etkileşim halindeki öğelerin topluluğudur. Bir sistem bir veya daha fazla alt sistemden oluşur ve bu alt sistemler toplu olarak sistemin tamamını oluşturur (Şekil 8).



Gösterim biçimlerine göre modeller;

Sözel Modeller: Gerçek sistem veya süreçler, kelimeler ve cümleler aracılığıyla anlatılan modellerdir. Bu tip modellerde, bileşenler ve ilişkiler sözcüklerle açıklanır.

Şematik Modeller: Gerçek sistem veya süreçleri, genellikle resim ve diğer görsel simgeler aracılığıyla ifade eden modellerdir.

Zaman esasına göre modeller;

Statik Modeller: Zaman boyutunda olabilecek değişiklikleri göz önüne almayan modellerdir. Örnek olarak işletmelerdeki zamanla değişim göstermeyen organizasyon şemaları bu modellemeler için uygundur.

Dinamik Modeller: Temel özellikleri belirli bir zaman diliminde değişim gösterme yeteneğine sahip olmaları olan modellerdir. Bu tip modeller, olayların zaman doğrusu üzerinde meydana geldiği bir bağlamda, değişikliklerin gerçek yapısını ortaya koymaya çalışır. Dinamik modellerin öne çıkan bir özelliği ise kendini düzenleyici bir dönüşüm sürecine sahip olmalarıdır.

Bilgi miktarlarına göre modeller:

Deterministik Modeller: Belli bir modeldeki tüm değişkenlerin, parametrelerin ve ilişkilerin net bir şekilde bilindiği modellerdir. Deterministik modellerin bir örneği, statik modellerin önemli bir yer tuttuğu durumlar olabilir.

Stokastik Modeller: Girdilerin veya sürecin kendi olasılık dağılımlarıyla temsil edildiği modellerdir. Bu tip modellerde, girdilerin dağılımlarla ifade edilmesinin yanı sıra çıktı değerleri de olasılık dağılımlarıyla anlatılabilir.

Belirsizlik Hali Modelleri: Gerek modeli oluşturan bileşenler gerekse aralarındaki ilişkiler konusunda kesin ya da olasılıksal bilgilere sahip olunamayan, fakat daima en iyi (optimal) çözümler bulmayı amaçlayan modellerdir. Oyun teorisi bu tür modellere örnektir.

Kapsamlarına göre modeller;

Genel Modeller: Bir çok uygulama alanı bulunan doğrusal programlama ve kuyruk kuramı gibi konularda oluşturulmuş modellerdir.

Özel Modeller: Yalnızca fonksiyonel alanda uygulama imkanı olan modellerdir. Bu türdeki modeller tekil bir sisteme, sürece, soruna ilişkin olarak hazırlanırlar. Ulusal bir felaket sonrasında ilgili görevleri yerine getirmesi amacıyla oluşturulan özel örgüt modeli buna örnektir.

Simülasyon, genellikle uygun yazılıma sahip bir bilgisayarda gerçek sistemin davranışını taklit etmek için geniş bir yöntem ve uygulama koleksiyonunu ifade eder. Aslında, "simülasyon" son derece genel bir terim olabilir, çünkü fikir birçok alan, endüstri ve uygulama için geçerlidir. Bu günlerde, bilgisayarlar ve yazılımlar her zamankinden daha iyi olduğu için simülasyon her zamankinden daha popüler ve güçlüdür.

Bilgisayar simülasyonu, genellikle zaman içinde sistemin işlemlerini veya özelliklerini taklit etmek için tasarlanmış yazılımları kullanarak sayısal değerlendirme yoluyla çok çeşitli gerçek dünya sistemleri modellerini inceleme yöntemlerini ifade eder.

Analitik yaklaşımla kıyaslandığında simülasyon modeli, karmaşık problemlerin modellenmesi ve çözümünde daha başarılıdır. Değişkenler arasındaki ilişkiler simülasyon modelleri ile daha kolay gözlemlenmektedir.

Bir simülasyon çalışması yapılacaksa gerçek bir sistemin girdi ve çıktılarını ifade edecek bir model oluşturularak gerçek sistemi kurulan model üzerinden tanımlama ve inceleme, farklı senaryoları gerçek sistem üzerinde uygulamadan tecrübe ederek gözlemleyebilme ve elde edilen sonuçlar ile sistemle ilgili çıkarımlarda bulunabilme ve bunlardan yola çıkarak uygulama kararı alabilme avantajlarına sahip olunabilir. Dolayısıyla optimum sonucun istenildiği problemlerde simülasyon modelleriyle de optimuma yakın sonuçlar elde edebilmek mümkündür, ancak ulaşılan sonucun optimum olduğu kesin olarak söylenemez.

Araştırılan probleminin tam anlamıyla matematiksel modeli yoksa, matematiksel model analitik yöntemler ile çözülemiyorsa, analitik çözüm var ancak çok karmaşık bir matematik modelden oluşuyorsa, çalışılacak gerçek sistemin deney ve analiz için uygun olmaması, sistemin davranışsal olarak incelenmesi istenmesi simülasyon modellerinin kullanılmasını zorunlu kılar.

### ***Simülasyonun avantaj ve dezavantajları***

Avantajları;

- Gerçek hayat problemleri çoğunlukla stokastiktir. Bu tür problemlerin tam bir matematiksel modellemesi yapılamadığından bu tarz problemler simülasyon yardımıyla çözümlenir.
- Elde edilmek istenilen çıktılar gerçek sisteme göre simülasyon ile daha düşük maliyetle ve daha kısa zamanda çözümlenir.
- Simülasyon modelleri girdi ve çıktı arasındaki ilişkileri daha ayrıntılı tanımlayabilmektedir. Daha anlaşılır ve açıklayıcıdır.

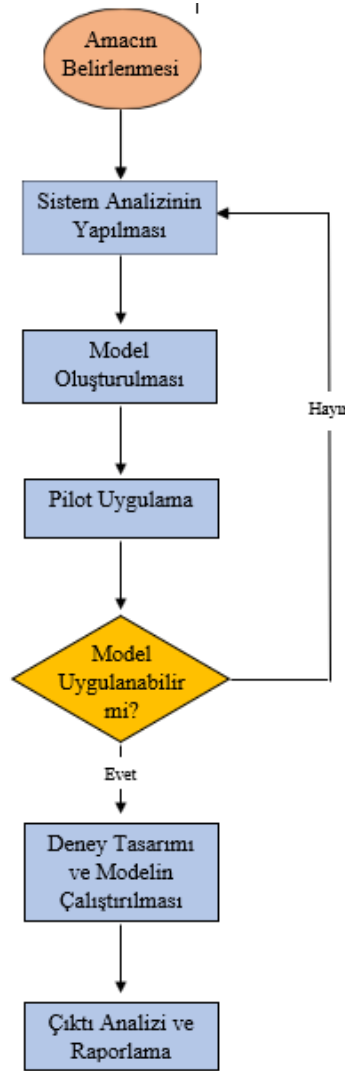
- Simülasyon modellerinde analitik modellerde olduğu gibi ihtiyaç olmayan gereksiz varsayımları kullanmadan sistemin özellikleri amaca uygun olarak çözümlenebilir.
- Simülasyon modelinde sistem parametreleri açıkça gözlemlenerek bu parametreler farklı senaryolar altında kontrol edilebilir.
- Simülasyon modeli ile analitik modelleme de olduğu gibi kısıtlı bir performans ölçümü yoktur. İstenilen düzeyde tüm ölçümler yapılabilir.
- Sistemin işleyişinde önemli sorunlar teşkil eden darboğazların tespiti simülasyon modeliyle yapılacak uygulamalarla tespit edilebilir.
- Oluşturulan simülasyon modeli üzerinde değişiklik yapmadan önerilen yeni senaryolar ve stratejiler denenebilir.
- Bir teknolojik yatırım yapılmadan önce sonuçlarının neler olabileceğine dair bulgulara simülasyon modelleriyle ulaşılabilir. Bu sayede yatırımcı sistemi uygulamaya almadan önce kararını daha şeffaf şekilde önceden görerek verebilir.
- Simülasyon modellerinde kullanıcı zamanı istediği şekilde yönetebilir. Gerçekte uzun süreler içeren uygulamalar simülasyonda oldukça kısa zaman ile ifade edilebilir.
- Sistemi başka senaryo ve sistemler ile karşılaştırma imkanı sağlar.
- Parametreler üzerinde istenildiği zaman ve aşamada değişiklikler yaparak etkileşimlerini gözlemleyebilir.

#### Dezavantajları;

- Simülasyon kullanımına alışıldığında kolaylıkla çözülebilecek küçük boyutlu bir analitik modelin çözümü içinde simülasyon modeli kullanılabilir.
- Oluşturulan simülasyon modeli tam optimum sonucu vermez. Optimuma yakın sonuç verdiği söylenebilir. Simülasyon modelinin oluşturulması aşamasında gözden kaçırılan küçük bir ayrıntı sonuçların dolayısıyla alınacak kararların üzerinde olumsuz bir etki yapar.
- Simülasyon modeli kurmak uzmanlık ve yetenek gerektirmektedir.
- Parametrelerin belirlenmesi oldukça güç hatta bazen imkansız olabilmektedir.
- Simülasyon modelleri insan etkisine açıktır. Yani insan müdahalesiyle istenilene yakın sonuçlar elde edilebilecek hamleler yapılabilir.

Şekil 9'da, kullanıcıya model oluşturma aşamasında yol gösterecek adımlar gösterilmektedir. Buna göre şekil üzerinden de görüleceği üzere, her simülasyon modelleme çalışması problemin amacının belirlenmesi ile başlamalıdır. Sonrasında sistem analizinin yapılması, modelin kurulması, oluşturulan pilot modelin çalıştırılması, modelin

uygulanabilirliğinin denetlenmesi, eğer uygulanabilirse modelin deney tasarımı yapılır ve çalıştırılır son olarak raporlanması sağlanır. Şekil 9’da gösterilmese de model oluşturulurken her aşamasında problemin formülasyonunda değişiklik yapılması gerekebilmektedir. Süreç bunu da elverişli kılmaktadır.



**Şekil 9.** Model oluşturma aşamaları (Ahmet Kürşad TÜRKER, 2011).

Tez konusu dahilinde çalıştığımız simülasyon modeli ayrık olay simülasyonunu içermektedir. Ayrık olay simülasyonu, karmaşık sistemlerin modellenmesi için önemli bir araçtır. Deneyler yapmak amacıyla bir bilgisayar programında üretim, nakliye ve hizmet sistemlerini temsil etmek için kullanılır. Sistemin bir bilgisayar programı aracılığıyla, modellenmekte olan sistemi kesintiye uğratmadan mühendislik tasarım değişikliklerinin test edilmesini sağlar. Simülasyon modellemesi, sistem modelleme, bilgisayar programlama, olasılık ve istatistik ve mühendislik tasarımı unsurlarını içerir. Simülasyon modellemesi bireysel olarak zorlu konular içerdiğinden öğrenilmesi zor olabilmektedir.

## ARAŞTIRMA BULGULARI

### RKD/BS Simülasyon Modeli

Tez dahilinde 3 farklı senaryo üzerinden simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Senaryolar depoların boyutları üzerinden farklılık göstermektedir. Sistem modeli sonraki çalışmalarda performans ölçümlerinin kıyaslanabilmesi ve optimum depo boyutlarını simülasyon ile belirleyebilmek amacıyla depo boyutları 10\*15\*4, 10\*15\*8 ve 10\*15\*12 olmak üzere 3 farklı senaryo olacak şekilde belirlenmiştir.

Çalışmada, 10\*15\*4, 10\*15\*8 ve 10\*15\*12 boyutlarındaki bir RKD/B sisteminin, 1 adet robot kullanılarak adanmış senaryoda (kutuların aynı yerlerine konulduğu) Arena™ yazılımı ile modellenmesinin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

Her üç boyuttaki depolara öncelikle random (expo) dakikada 1 adet olmak üzere sırasıyla 600, 1200 ve 1800 adet kutu gönderilmekte ve kutular robot aracılığı ile depoya yerleştirilmektedir.

Depoya malların yerleştirilmesi işlemi tamamen bittiğinde asıl simülasyon çalışmasına konu olacak işlemler olan depolama/boşaltma süreçleri başlamaktadır. Yani depoya siparişler gelmekte robot tarafından sipariş konumundan alınan kutu G/Ç noktasına bırakılmakta ve sipariş teslim edildikten sonra kutu robot tarafından tekrar yerine konulmaktadır.

Senaryoların ortak varsayımları şunlardır;

- Depoya constant (sabit) olarak dk. 1 sipariş geldiği varsayılmaktadır.
- Her üç boyutta da sistem adanmış depolama politikasını kullanmaktadır.
- Her üç boyutta da sistemde 1 adet G/Ç noktası bulunmaktadır.
- Robotun bekleme noktası, son depolama veya boşaltma işleminin tamamlandığı yerdir.
- Her üç boyutta da sistemde varlıklar ilk gelen ilk çıkar politikasına göre işlem görmektedirler.
- Sipariş teslim süresi, kutu G/Ç noktasına bırakıldıktan sonra 1 dk.'dır.
- Robotlar için hızlanma ve yavaşlama ivmesi ve dönüş ivmeleri dikkate alınmamıştır.
- Robotun hareket ederken kullandığı rota olan network link'ler tüm süreçte gidiş dönüş şeklinde iki yönlü iken yalnızca G/Ç noktasında çıkmaz yol'dur.

Genel işleyişte gelen bu siparişler öncelikle depoda aratılarak gelen sipariş depoda mevcut ise robotun o konuma giderek belirtilen siparişin olduğu kutuyu alıp G/Ç noktasına bırakması amaçlanmaktadır. Sonraki aşamada robot teslim edilen sipariş sonrası G/Ç noktasından aldığı kutuyu tekrar aynı (adanmış) yerine getirerek yerleştirmektedir.

Sistem Arena™ paket programı kullanılarak modellenmiştir.

### **Arena**

Arena™, bilgisayar simülasyon modellerinin geliştirilmesini ve yürütülmesini kolaylaştıran ticari bir yazılım programıdır. Arena™, SIMAN adı verilen temel simülasyon dili kullanılarak modellerin oluşturulmasına izin veren bir ortam aracılığıyla erişim sağlar. Arena™ ortamında dil modelleme yapılarına erişim sağlayan paneller bulunur. Ayrıca ortam, modelin canlandırılması, modelin çalıştırılması ve sonuçların görüntülenmesi gibi ortak simülasyon etkinliklerine araç çubuğu ve menü erişimi sağlar (Rossetti, 2016).

Şekil 10'da, Arena™ programı açıldığında karşılaşılan araç çubuğu (file, anasayfa, hareketlendir, çiz, git, görünüm, araçlar ve geliştirici sekmeleri) ana hatlarıyla yer almaktadır. Örneğin bu araç çubuğunda yer alan File kısmında yeni Arena™ modeli oluşturma, var olan modelleri açma, açık olan pencereleri kapatma işlemleri yer alır. Ayrıca bu kısımda AutoCAD (veya DXF formatındaki başka CAD programlarından) gibi programlardan CAD çizimleri Arena™'da kullanılmak üzere alınabilir. Bu bölümde kaydetme, yazdırma, paylaşma gibi komutlar da yer alır. Bunun yanı sıra programın kendi içerisinde yer alan örnek uygulamalara da yine bu kısımdan erişilebilmektedir.

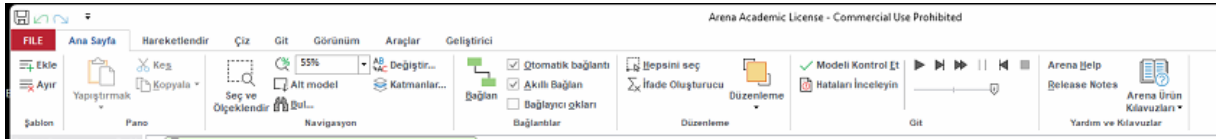
Anasayfa kısmı Şekil 10'dan da görüleceği üzere model içerisinde gerekli olan temel işlemleri içerir. Bu kısımdan model kopyalama ve yapıştırma işlemleri yapılabilir, çalışılan model içerisinde alt model (submodel) oluşturulabilir, alt modeller arasında geçiş yapılabilir, modülleri birbirine bağlamak için bağlan işlevi kullanılabilir, modeli çalıştırmadan önce model içerisinde hata olup olmadığı kontrol edilebilir, ve yine program içerisinde kullanıcılara yardımcı olması için yardım ve ürün kılavuzlarına da bu kısımdan erişilebilmektedir.

Hareketlendir bölümünden oluşturacağımız model için görsellik oluşturabilecek saat, değişken, grafikler eklenebilir. Bunun dışında yine model içerisindeki varlıkları, kuyrukları ve taşıyıcılar gibi öğeleri buradan görselleştirilmektedir.

Çiz kısmından ise model içerisinde herhangi bir bölümde şekil ve metin gibi öğelerin eklenmesi işlemleri gerçekleştirilebilir. Arena™ sembol fabrikası denilen program dahilinde yer alan sembolleri içeren öğede burada yer almaktadır.

Git bölümünde modeldeki oluşabilecek hataların kontrol edilmesi, modelin uygulanmasında önemli bir bileşen olan modelin çalıştırılma ayarları (çalışma hızı, başlangıç ve bitiş zamanı, çalışma uzunluğu, zaman birimleri, raporlama dili, kayıt yeri gibi) yapılabilmektedir. Rapor paneli, bir simülasyon çalışmasından sonra oluşturulan raporları ayrıntılı olarak incelemenizi sağlar.

Görünümle ise, modelin uzaklaştırılıp , yakınlaştırılması, ölçeklendirme, katmanlar arasında geçiş, cetvel, kılavuz, ızgara görünümünü aktif veya pasif hale getirme işlemleri yapılabilir.



Şekil 10. Arena™ araç çubuğu.

Model oluşturabilmemiz için en önemli bilmemiz gereken yer ise “Project Bar” kısmıdır. Çünkü model oluşturulurken kullanılacak modüller gruplandırılmış şekilde bu alanda yer almaktadır. Bu modüllerden tez konusunu içerenler model anlatılırken detaylandırılacaktır.

### ***Model mantığı***

**Entity:** Gezen birim. Simülasyon zamanı boyunca sistem içerisinde oluşturulan ve hareket eden varlıklardır. Örneğin; Bir fabrikada üretilen parçalar, hastanede gezen hastalar, evraklar, doktorlar vb.. Gezen birimler sistemde buldukları duruma göre davranırlar, işlemeyseler işlem süresince kaynağı meşgul ederler, kuyruktaysalar beklerler. Gezen birimlerin oluşturulması “Create” modülü ile sağlanır.

**Attribute:** Gezen birim özellikleri. Oluşturulan model içerisinde birden fazla gezen birim olması durumunda entitylerin sistemde birbirlerinden ayırt edilebilmeleri için farklı özellikler (geliş zamanı, renk, işlem süresi vb.) atanmaları gerekmektedir. Bu özellikler ya kullanıcı tarafından atanır ya da gerektiğinde kullanıcılar tarafından gerektiğinde kullanılması amacıyla Arena™ tarafından oluşturulmuş özelliklerdir (Entity.Type, Entity.Picture, Entity.SerialNumber).

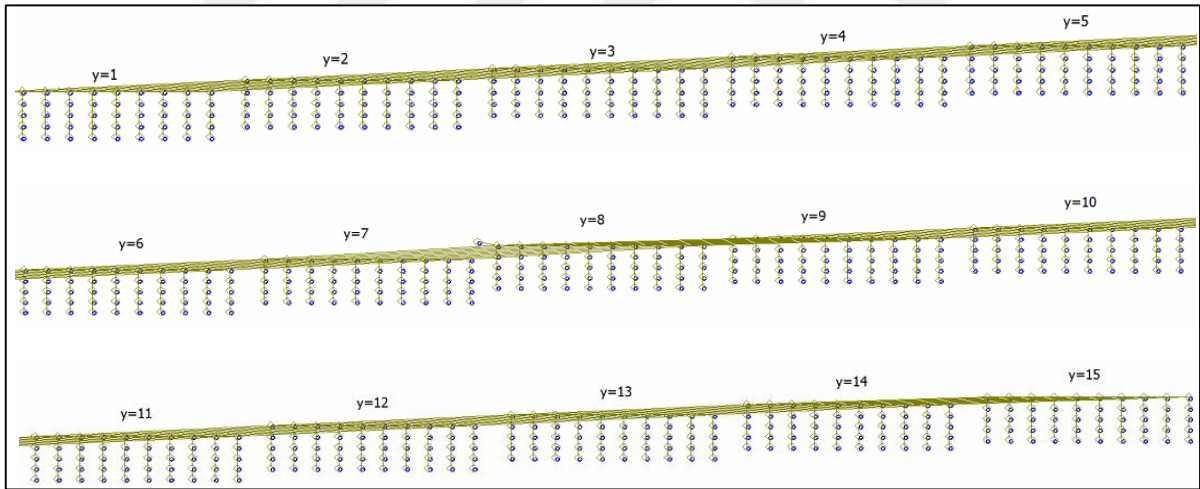
**Variable:** Sistem değişkenleri. Bir simülasyon zamanı boyunca sisteme giren çıkan parça adedi, herhangi bir anda sistemde bulunan parça adedi, kaynağın boş olup olmaması vb. gibi değişkenleri ifade etmektedir. Attribute olduğu gibi variable de kullanıcı tarafından oluşturabilir veya gerektiğinde kullanıcılar tarafından gerektiğinde kullanılması amacıyla Arena™ tarafından oluşturulmuş özel amaçlı değişkenlerdir (NR(Kaynak ID), NQ(Queue ID)).

### ***Simülasyon Modelinin Oluşturulması***

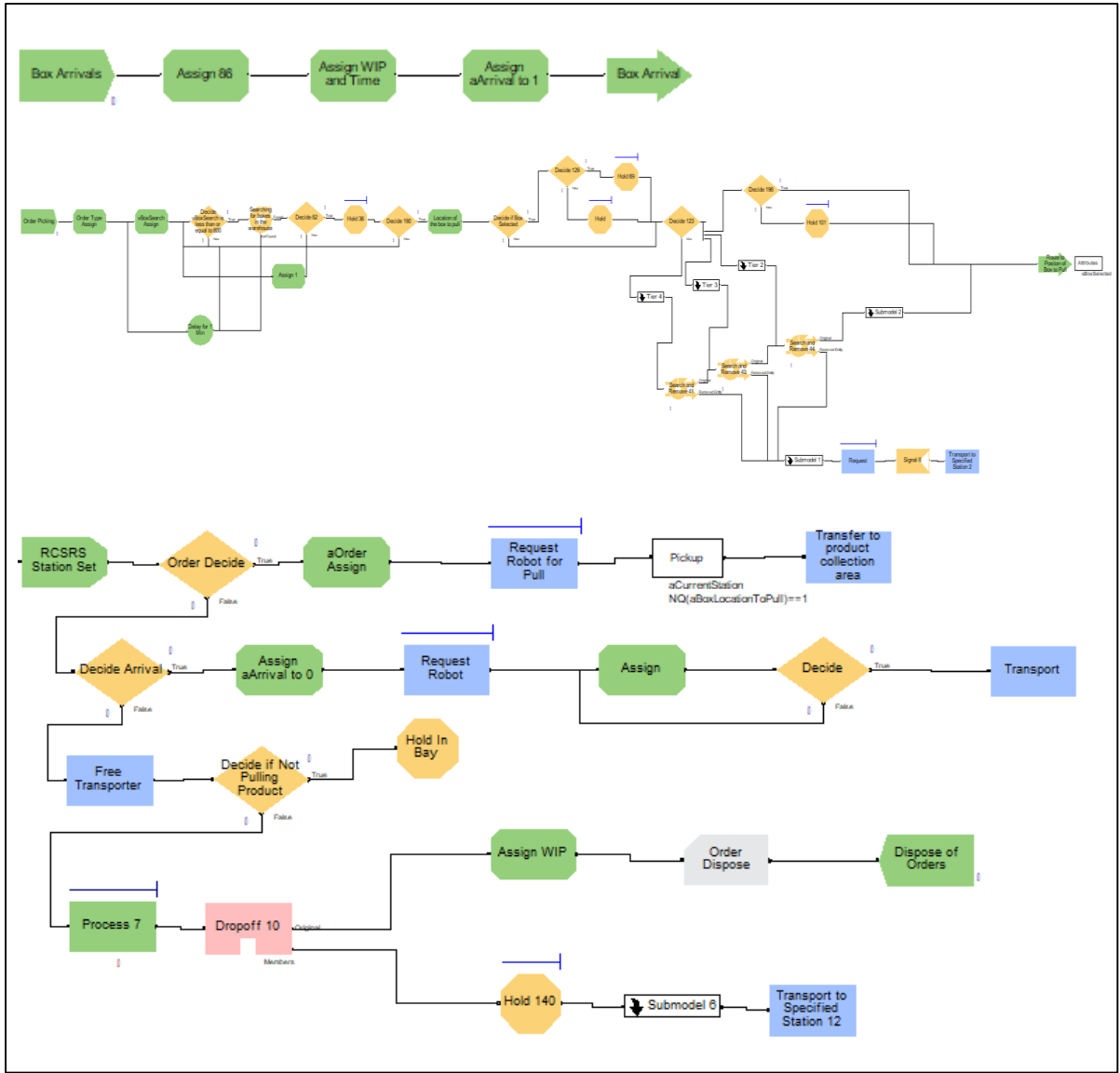
Bu başlık altında simülasyon modeli oluşturulurken kullanılan modüller hakkında kısa bilgilere yer verilmiştir. Ayrıca model çalıştırıldığında elde edilen sonuçlar Arena™ programının sunduğu raporlama penceresinden yorumlanarak teze konu olan simülasyon çalışması açıklanmaya çalışılacaktır.

10\*15\*4, 10\*15\*8 ve 10\*15\*12 boyutlu 3 farklı senaryonun ayrı ayrı Arena™ programında simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Örnek oluşturması açısından 10\*15\*4 boyutlu depoya ait depo genel yapısı ve model genel görünümü Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir. 10\*15\*4 boyutlu depoda boyutlar, x-yönünde 10 br., y-önünde 15 br. ve z-yönünde 4 br. yer kapladığını ifade etmektedir. Depo genel yapısı yan yana görünümde, fakat sayfaya sığdırabilmek amacıyla alt alta gösterilmiştir.

Arena, mesafe ve hız değerleri girildiğinde zamanı arka planda kendisi tutmaktadır. Bu nedenle sistemlerde x, y ve z ekseninde hareket için mesafeler her bir eksen için farklı olan hız ve kutu boyutları dikkate alınarak (x-yönünde kutu boyutu 0,6 m ve hızı 3 m/sn, y-yönünde kutu boyutu 0,8 m ve hızı 3 m/sn, z-yönünde ise boyutu 0,33 m ve hızı 1,6 m/sn) her bir network link için ayrı ayrı hesaplanmıştır.



**Şekil 11.** 10\*15\*4 boyutlu modelin depo genel yapısı.

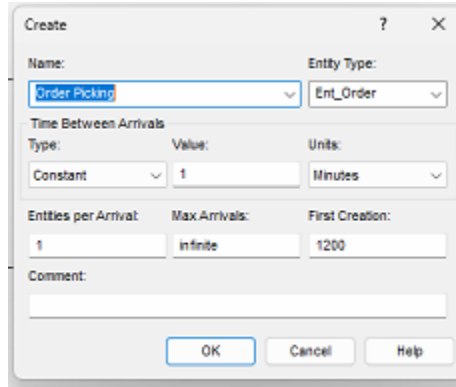


Şekil 12. 10\*15\*4 boyutlu depo modelinin genel görünümü.

Create modülü ile, gezen birim gelişleri sağlanır. Create modülü simülasyon modelinde gezen birimin sıfır noktasıdır. Bu noktadan sonra gezen birimler modellenen akış boyunca geçtikleri modüllerin fonksiyonlarına uygun olarak hareket ederler. Create modülü içerisinde geliş özellikleri belirlenecek gezen birim “Entity Type” seçilir. “Type” kısmında sisteme gelen gezen birimin gelişler arası zamanının dağılımı belirtilir. “Units” ile gelişler arası zamanın birimi ifade edilir (saniye, dakika, saat). “First Creation” yine önemli bir belirleyicidir. Bu kısım sisteme ilk gezen birimin ne zaman geleceğini ifade eder.

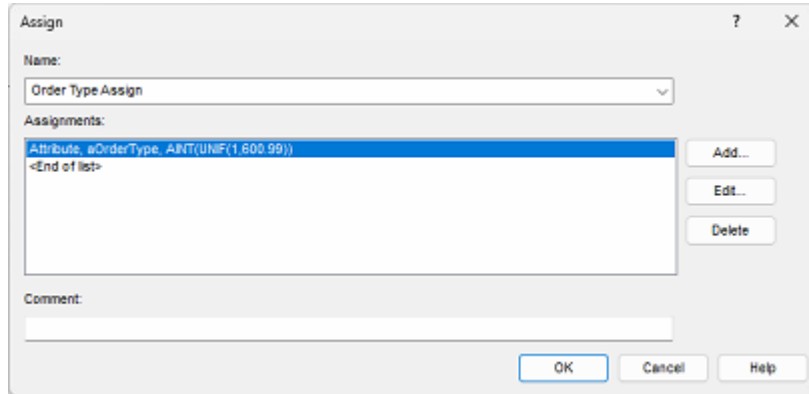
Oluşturulan 3 senaryo içinde sipariş gelişlerinin tanımlandığı “Create” modülü Şekil 13’de gösterilmiştir. Her senaryo için özelleştirilmiş olan modüllerde örnekler 10\*15\*4 boyutundaki depo üzerinde verilecektir. Sipariş gelişleri “Ent\_Order” adıyla oluşturulmuştur.

Siparişler 1200. simülasyon zamanından itibaren, sabit (constant) dakikada 1 sipariş gelecek şekilde ve sonsuz sayıda gelebilmektedir.



Şekil 13. Sipariş gelişinin tanımlanması.

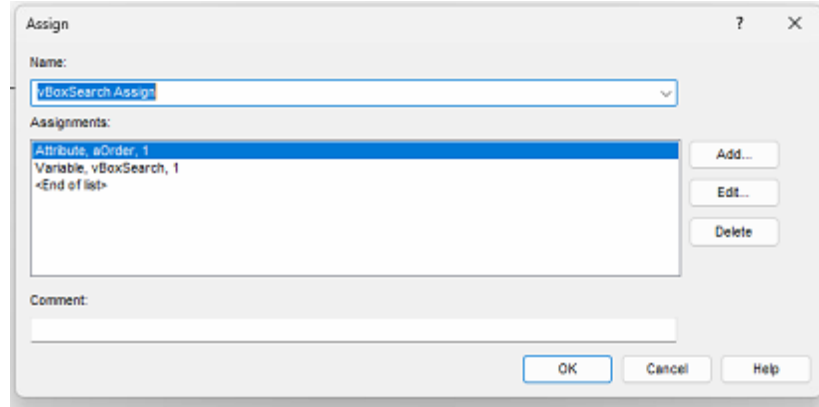
Sonrasında “Assign” modülü ile siparişlerin tanımlanması işlemi yapılmaktadır. Burada 3 senaryo için farklı sipariş tanımlamaları yapılmıştır. Örneğin, Şekil 14’te görüleceği gibi 10\*15\*4 boyutundaki depo için oluşturulan modelde sipariş özelliği 1 ile 600 arasında sınırlandırılmıştır. Bunun sebebi deponun kapasitesinden dolayı kutuların sayısının 600’den fazla olamayacağı için var olmayan bir kutunun sipariş edilmesinin önlenmesidir. Bu kısım diğer 10\*15\*8 ve 10\*15\*12 boyutlu senaryolar için sırasıyla 1200 ve 1800 ile sınırlandırılmıştır.



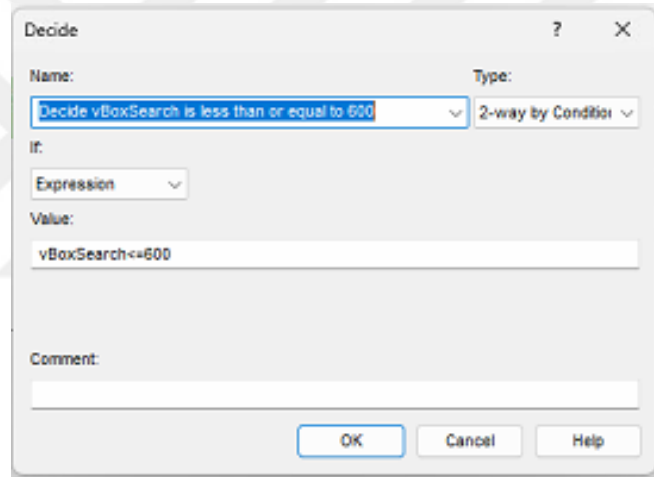
Şekil 14. Sipariş özelliklerinin belirlenmesi.

Sipariş özellikleri belirlendikten sonra gelen siparişin depoda aratılabilmesi için “Assign” modülü ile “aOrder” özelliği ve “vBoxSearch” değişkeni 1’e eşitlenerek tanımlaması yapıldıktan sonra (Şekil 15), aramanın ilk senaryodaki depo boyutu için 600 hücre konumunun dışına çıkmaması için “Decide” modülü ile eğer 600’den küçük veya eşit ise true kolundan akışa devam etmesi değilse false kolundan başa dönmesi sağlanır (Şekil 16). Gelen siparişlerden true kolundan ayrılanlar “Search” modülüne gelir ve depoda arama başlatılır

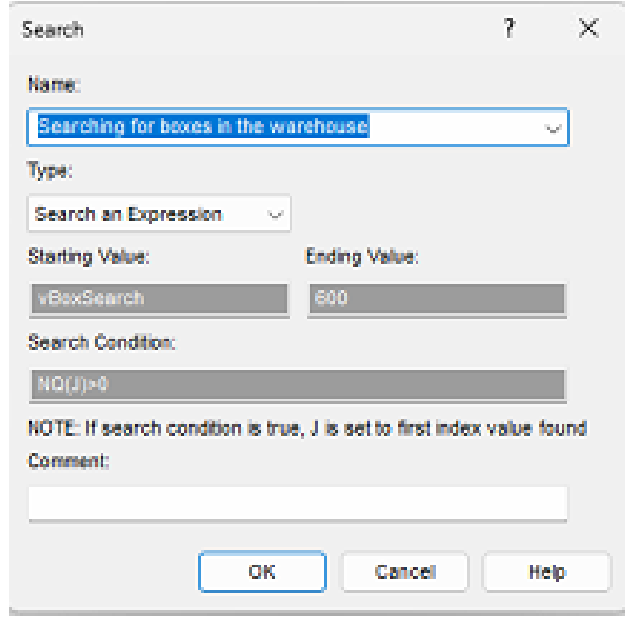
(Şekil 17). Depoya ulaşan sipariş 600 hücrenin tamamında  $NQ(J) > 0$  yani 1 değerini alana kadar (var olana kadar) aratılır. Modelin tamamında var olan bir sipariş 1 değerini alırken yok ise 0 değerini almaktadır.



Şekil 15. aOrder ve vBoxSearch tanımlanması.

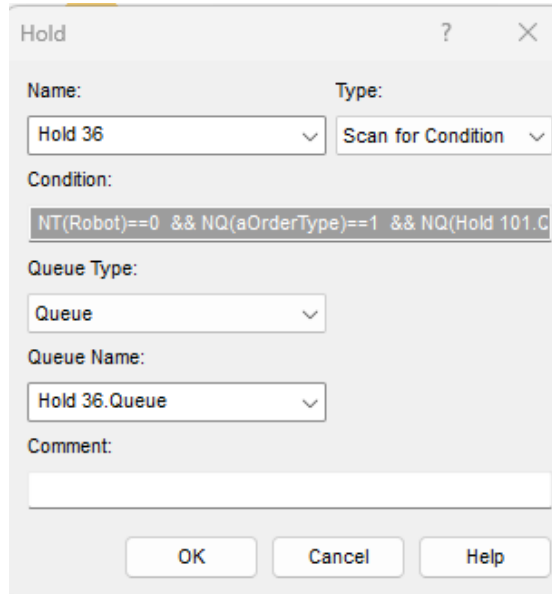


Şekil 16. vBoxSearch değişkeninin sınırlandırılması.



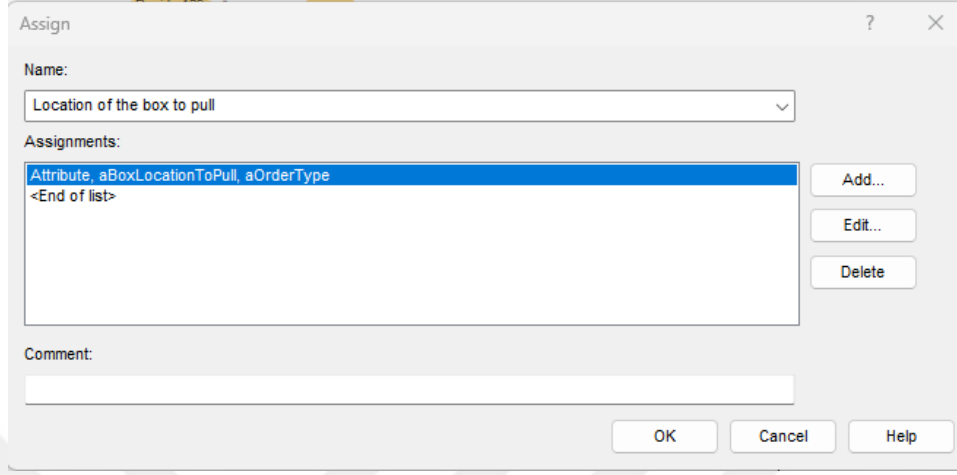
**Şekil 17.** Depoda arama işleminin başlangıç, bitiş ve arama koşulunun belirlenmesi.

“Hold” modülü modelde üzerine gelen varlıkları sinyal gelene kadar, herhangi bir koşul sağlanana kadar ya da sonsuza kadar tutmaya yarar. Sipariş depoda bulunduktan sonra “Hold” modülüne gelir ve burada robot serbest olana kadar, model içerisinde farklı bir kuyrukta olmasından dolayı yerinde olmadığına yerine gelene kadar ( $NQ(J)=1$ ) tutulur (Şekil 18). Robot serbest ise ve konumu dışında herhangi bir kuyrukta değilse sipariş serbest bırakılır ve akışına devam eder.



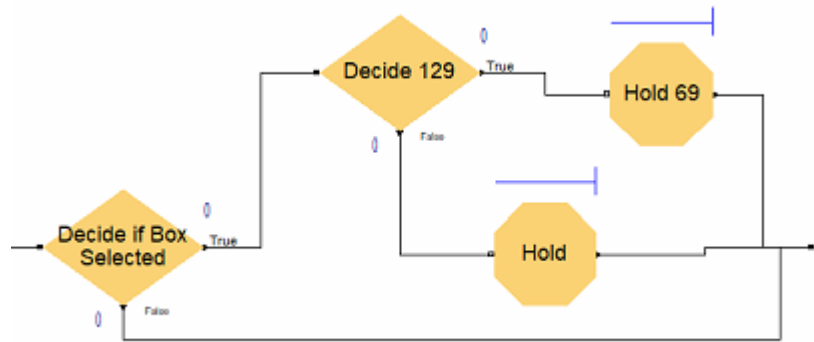
**Şekil 18.** Gelen siparişin koşul sağlanana kadar “Hold” modülü ile tutulması.

Bir sonraki süreçte yine bir “Assign” modülüne gelen sipariş burada kutu konumu ile eşlenir (Şekil 19). Çalışmamız adanmış senaryo üzerine olduğundan gelen sipariş her zaman aynı sayılı konumdadır. Çekilecek kutunun konumu attribute olarak “aBoxLocationToPull” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 19. Sipariş ile kutu konumunun eşlenmesi.

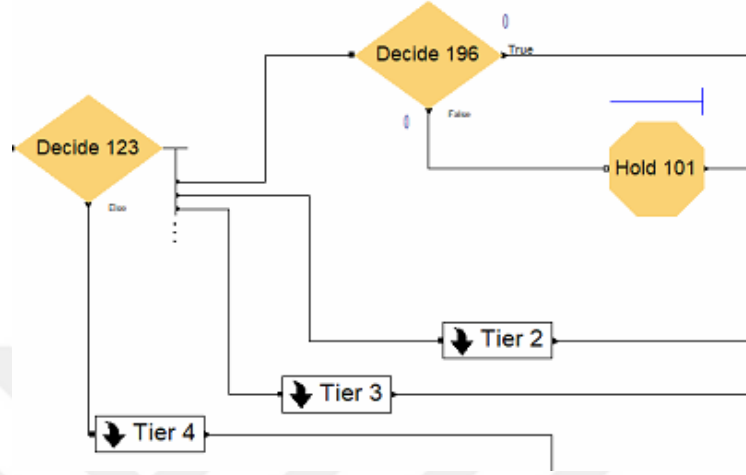
Sonraki süreçte Şekil 20’de görülen model kısmında, “Decide” modülü ile sipariş için kutunun konumu “boş mu?”, “dolmuş mu?” diye kontrol edilir. Kutu yerinde ise, 10\*15\*4 boyutundaki örnek senaryo için “Decide” modülü ile kutu konumunun ilk katmanda mı yoksa diğer katmanlarda mı yer aldığı kontrol edilir. Alt katmanlardaysa bir üst katmanı da dolu olana kadar sipariş “Hold” modülü ile tutulur.



Şekil 20. Sipariş konumunun ve üzerlerinin doluluk kontrolü.

Gerekli şartlar sağlandıktan sonra serbest kalan siparişin bulunduğu kutu hangi katmanda yer alıyorsa oradan modelin akışına devam eder. Eğer mevcut siparişin olduğu konum en üst katmandaysa yalnızca siparişin olduğu kutunun konumunda olduğu ve üst yüzeyindeki ızgarada da herhangi bir kutu olmadığı teyit edilir. Eğer bu koşullardan biri mevcut

değilse mevcut olana kadar “Hold” modülünde tutulur. Alt katmanlarda yer alan kutular için ise hem siparişin mevcut olduğu kutunun konumunda olduğu hem de siparişe ulaşılabilmesi için yan ızgaralara kutular yerleştirileceği için kutunun alınması için üzerindeki kutuların koyulacağı ızgaraların konumlarının boş olup olmadığı teyit edilir. Eğer doluyorsa gerekli şartlar sağlanana kadar sipariş “Hold” ile tutulur (Şekil 21).



**Şekil 21.** Siparişlerin buldukları katmanlara göre şartlandırılmaları.

Şekil 21’de görüldüğü üzere katmanların içeriğinin model ana sayfasında kalabalık bir görüntü oluşturmaması adına katmanların yer aldığı kısımlar “Submodellere” (alt modellere) ayrılmıştır.

“Search and Remove” modülü, bir kuyruğu veya toplu bir varlığı aramak ve onu kuyruktan kaldırmak için kullanılır. Bu modül, agent-based modellemede çok kullanışlıdır ve eşleşen tüm varlıkların bir kuyruktan veya bir gruptan kaldırılmasının uygulanmasını kolaylaştırır. Şartları sağlayan siparişler buldukları katmana göre akışa gelir ve alt katmanlardaysa “Search and Remove” modülü ile bulduklarının konumlarının üzerlerindeki kutular kaldırılır. Bu konumların belirlenmesi matematiksel ifadeler ile sağlanır. Örneğin, Şekil 22’de görüleceği gibi eğer siparişin bulunduğu kutu 2. katmanda ise, üzerindeki kutunun da kaldırılması için “Search and Remove” modülü içerisinde matematiksel olarak “aBoxLocationToPull-150” yazılarak kutunun bulunduğu yerin bir üstündeki kutusunda kaldırılması gerektiği belirtilir. Daha alt katmanlarda yer alan kutular ise üzerindeki kutu sayısı kadar “Search and Remove” modülünden geçirilerek siparişin olduğu kutuya erişebilmek için üzerindeki kutuların kaldırılması sağlanır.

Search and Remove

Name: Search and Remove 44

Type: Search a Queue Queue Type: Specific Set Member

Set Name: Set 3 Set Index: aBoxLocationToPull

Search Condition Type: First True Condition

Search Condition: aBoxLocationToPull-150

Removed Entity Destination:  Direct Connect  Label

Comment:

OK Cancel Help

**Şekil 22.** Siparişi içeren kutunun üzerindeki kutuların kaldırılması.

Sipariş “Route” modülü ile “RCSRS Station Set” adı altında tanımlanan istasyon seti aracılığıyla çekilecek kutunun konumuna yönlendirilir. “Route” modülü varlığı bir istasyondan başka bir istasyona taşıyıcı olmadan transfer eder. Burada eğer özel olarak bir gecikme süresi eklenmezse bu transfer işlemi süre harcanılmadan gerçekleştirilir. Mevcut modelde siparişin bulunduğu konuma transferi “Route” modülü aracılığı ile sağlanır.

“Request” modülü ise, taşınacak bir varlığın bir taşıyıcıya atanmasını sağlar. Varlık “Request” modülüne geldiğinde mevcut taşıyıcı müsait ise bu varlığa özgülenir ve belirtilen konuma yönlendirilmesi sağlanır. Mevcut modelde sipariş edilen kutu için “Request” modülü ile daha önce taşıyıcı olarak tanımlanan robot talep edilir (Şekil 23). Oluşturulan 3 senaryo için de robot sayısı 1 adettir. Robot müsait olduğunda işlem önceliğine göre bir işe atanır.

The image shows a 'Request' dialog box with the following fields and values:

- Name: Request
- Transporter Name: Robot
- Selection Rule: Smallest Distance
- Save Attribute: (empty)
- Priority: Medium(2)
- Entity Location: Entity.Station
- Velocity: 10
- Units: Per Second
- Queue Type: Queue
- Queue Name: Request.Queue
- Comment: (empty)

Buttons: OK, Cancel, Help

**Şekil 23.** “Request” modülü ile Robot talep edilmesi.

“Request” modülü içerisinde yer alan “selection rule” kısmı sistemde birden fazla robot olması durumunda çağrıya hangi robotun öncelikli cevap vereceği kuralını (döngüsel, rastgele, en kısa mesafe en uzak mesafe gibi) içermektedir. Ayrıca yine bu modül içerisinde Robotun hızı da tanımlanabilmektedir. Robotun hızı x, y ve z doğrultularında kutuların boyutlarına göre formülasyon ile ayrı ayrı network link kısmında hesaplanarak girilmiştir.

“Transport” modülü varlığın bir noktadan belirtilen farklı bir noktaya taşınması işlevini yerine getirir. Burada mutlaka taşıyıcı ismi, sayısı ve varış istasyonu belirtilir. Modelde varlığa taşıyıcı olarak “Robot” özgülendikten sonra sipariş “Transport” modülüne gelerek buradan sipariş edilen kutu için varış noktası G/Ç noktası (Şekil 24), üzerindeki kutular için ise varış noktası “aBoxPlacementSurface” olarak tanımlanan yüzey noktalarıdır (Şekil 25).

The screenshot shows a 'Transport' dialog box with the following fields:

- Name: Transfer to product collection area
- Transporter Name: Robot
- Unit Number: (empty)
- Entity Destination Type: Station
- Station Name: Station 08\_0
- Velocity: 1
- Units: Per Second
- Guided Tran Destination Type: Entity Destination
- Comment: (empty)

Buttons: OK, Cancel, Help

Şekil 24. G/Ç noktasına taşıma için “Transport” modülü kullanımı.

The screenshot shows a 'Transport' dialog box with the following fields:

- Name: Transport to Specified Station 2
- Transporter Name: Robot
- Unit Number: (empty)
- Entity Destination Type: Attribute
- Attribute Name: aBoxPlacementSurface
- Velocity: 1
- Units: Per Second
- Guided Tran Destination Type: Entity Destination
- Comment: (empty)

Buttons: OK, Cancel, Help

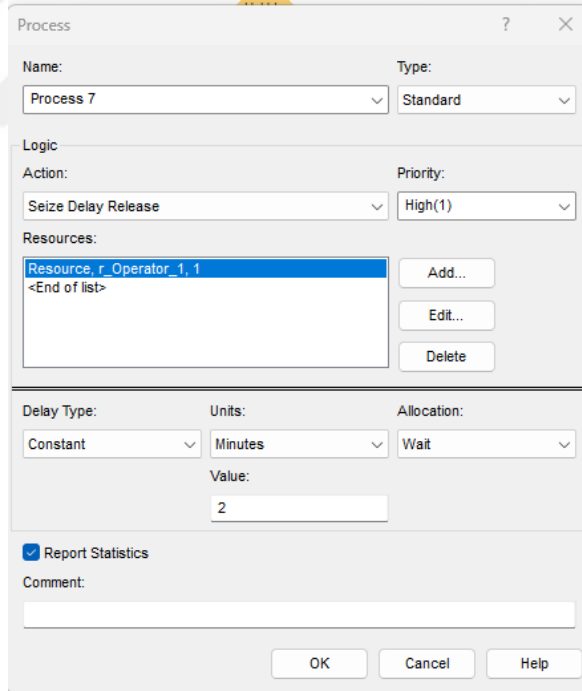
Şekil 25. Izgara üzerindeki noktalara taşıma için “Transport” modülü kullanımı.

“Station” modülü, “Route” veya “Transport” modüllerine gelen varlıkların gideceği konumların belirtilmesini sağlar. Ayrıca simülasyon, tez çalışmasındaki gibi animasyon şeklinde modellendiyse tanımlanan her istasyonun yerinin konumlandırılması ve bu alanlara varlık taşımının görsel olarak da modellenmesi için gereklidir. Şekil 3’te 3\*3\*3 örnek boyutta verilen bir depo animasyonlu simülasyon modelindeki her bir nokta aynı zamanda bir istasyonu

ifade etmektedir. Bu bağlamda teze konu olan 3 farklı boyuttaki depo modellerinde de her bir konum ayrı bir istasyon olarak tanımlanmıştır.

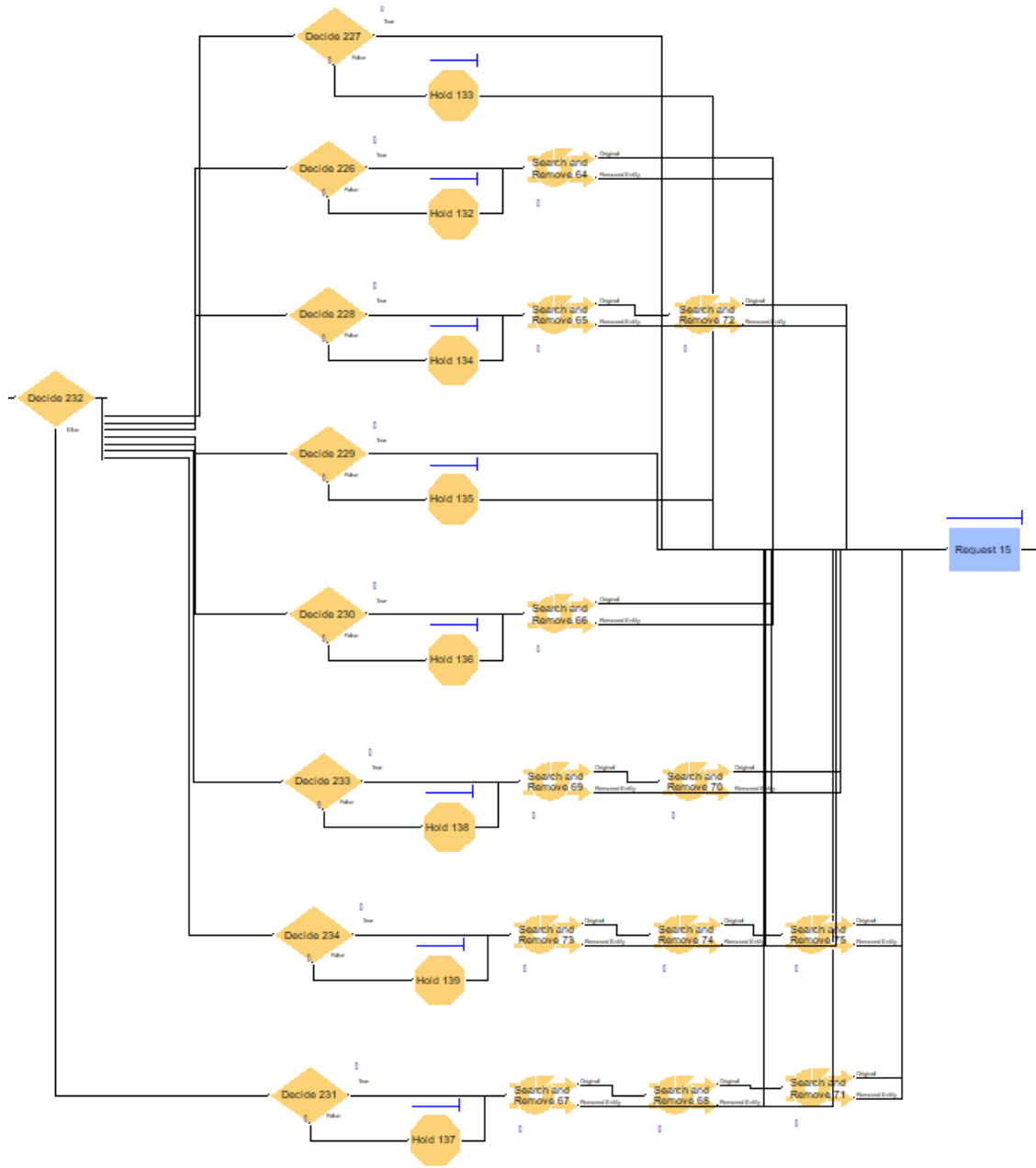
G/Ç noktasına taşınan kutu içerisinde sipariş alınması işlemi “Process” modülü ile gerçekleştirilmektedir. “Process modülü, varlığın simülasyon modelinde bir süre bekletilmesini veya bir kaynakta işlem görmesi halinde kaynağın ve varlığın işlem süresince meşgul edilmesini sağlar. Kaynak meşgul iken modüle başka bir varlığın gelmesi durumunda sonradan gelen varlık veya varlıklar kuyrukta işlem görmek için beklerler. Modelde kaynak olarak 1 adet “r\_Operator\_1” tanımlanmış ve işlem süresi sabit (constant) 2 dakika bekleme olarak tanımlanmıştır (Şekil 26). Yani siparişi içeren kutu G/Ç noktasına geldiğinde kutu içerisinde siparişi alabilmek için burada 2 dakika bekler ve sonrasında işlemi biten kutu “Dropoff” modülüne gelir ve burada sipariş ve kutu birbirinden ayrılır. Sipariş sistemi terk ederken, kutu yerine götürülmek için taşıyıcı olarak tanımlanan “Robot”u bekler.

Adanmış senaryo da Robot’un kutuyu aldığı yere bırakması yine “Submodel 6” alt modelinde oluşturulan koşul ve matematiksel ifadeler sayesinde sağlanır (Şekil 27).



**Şekil 26.** G/Ç noktasında kutunun işlem görmesi için “Process” modülünün tanımlanması.

Bu modül içeriğinde ayrıca kuyruktaki varlıkların işlem önceliği (yüksek, orta, düşük) de “priority” başlığı altında düzenlenebilir.



Şekil 27. Kutunun robot tarafından alındığı yere taşınması.

## TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez, otonom depolama/boşaltma sistemlerine bir bakış açısı sağlayarak, RKD/B sistemlerinin kapsamlı bir incelemesini sunmakta, gelecekteki potansiyel araştırma yönlerini belirlemek için mevcut çalışmaların kapsamlı bir literatür analizini yapmakta, RKD/B sisteminin bir simülasyon çalışması ile modellenmesini içermektedir.

Literatür incelemesi sonucunda RKD/B sistemlerinin henüz yeni bir teknoloji olmasından da kaynaklı olarak sınırlı ilgi gördüğünü ve az sayıda çalışmanın var olduğunu ortaya koymaktadır. RKD/BS'ler için farklı raf boyutları ve yerleşim konfigürasyonlarının yanı sıra G/Ç noktalarının sayısı ve konumlandırılmasını incelemek için ek çalışmalar yapılmasına ihtiyaç olduğu açıktır. Gerekli akademik çalışmaların sayısının artması sonrasında sistemlerin analitik modellerinin yanında simülasyon çalışmalarının da yapılarak karşılaştırmalı çalışmalara yer verilmesi gerekmektedir. İlerleyen zamanlarda araştırmacılar diğer otonom depolama/boşaltma sistemlerinde olduğu gibi RKD/B sistemlerinde de maliyet, enerji ve çevresel etkinin en aza indirilmesi de dahil olmak üzere alternatif performans ölçütlerine yönelik araştırmaların yapılmasına öncülük edeceklerdir.

Simülasyon modellerinde yer verilen üç farklı boyuttaki depolar için belirli varsayımlar altında, sisteme sipariş gelişleri olmakta, robot müsaitlik durumu ve önceliklere bağlı olarak siparişlerin buldukları konumlara ulaşarak siparişleri G/Ç noktalarına teslim ettikten sonra işlemi biten kutuları tekrar aynı konumlarına yerleştirmektedir.

Gelecekte, oluşturulan simülasyon modellemesi üzerinden modelin çalıştırılması planlanmaktadır. Modelin çalıştırılması sonucunda elde edilecek veriler neticesinde sisteme eklenecek robot sayısının ve robot hızının belirlenmesi, optimum üst üste istiflenen kutu sayısının belirlenmesi, G/Ç noktalarının sayısının sayısı ve konumlarının belirlenmesi gibi sistemin vereceği tepkilerin incelenmesi ve rastgele depolama politikası gibi başka senaryolarında çalışılması planlanmaktadır. Tüm bu senaryolar çalışıldığında verim, robotun aldığı mesafeler, 1 saatte toplanan kutu sayısı gibi performans ölçümlerini de modele dahil ederek senaryoları karşılaştırmak hedefler arasındadır.

## KAYNAKLAR

- Akpunar, A., Ekren, B. Y., & Lerher, T. (2017). Energy efficient design of autonomous vehicle based storage and retrieval system. *Istrazivanja i Projektovanja Za Privredu*, 15(1), 25–34.
- Atmaca, E., & Öztürk, A. (2014). Literatür araştırması: sipariş toplama politikaları ve otomatik depolama/boşaltma sistemleri (AS/RS). *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(2), 120–134.
- Battarra, I., Accorsi, R., Manzini, R., & Rubini, S. (2022). Hybrid model for the design of a deep-lane multisatellite AVS/RS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(1–2), 1191–1217.
- Cai, X., Heragu, S. S., & Liu, Y. (2014). Modeling and evaluating the AVS/RS with tier-to-tier vehicles using a semi-open queueing network. *IIE Transactions*, 46(9), 905–927.
- 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(5–8), 1919–1936.
- D’Antonio, G., Maddis, M. De, Bedolla, J. S., Chiabert, P., & Lombardi, F. (2018). Analytical models for the evaluation of deep-lane autonomous vehicle storage and retrieval system performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5–8), 1811–1824.
- Ekren, B. Y. (2011). Performance evaluation of AVS/RS under various design scenarios: a case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(9–12), 1253–1261.
- Ekren, B. Y. (2021). A multi-objective optimisation study for the design of an AVS/RS warehouse. *International Journal of Production Research*, 59(4), 1107–1126.
- Ekren, B. Y., & Heragu, S. S. (2010). Simulation-based regression analysis for the rack configuration of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *International Journal of Production Research*, 48(21), 6257–6274.
- Ekren, B. Y., & Heragu, S. S. (2011). Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(7), 1640–1650.

- Ekren, B. Y., & Heragu, S. S. (2012a). A New Technology For Unit-Load Automated Storage System: Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System. In *Warehousing in the Global Supply Chain* (pp. 285–339). London: Springer London.
- Ekren, B. Y., & Heragu, S. S. (2012b). Performance comparison of two material handling systems: AVS/RS and CBAS/RS. *International Journal of Production Research*, 50(15), 4061–4074.
- Ekren, B. Y., Heragu, S. S., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2010). Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. *Computers & Industrial Engineering*, 58(1), 175–185.
- Ekren, B. Y., Heragu, S. S., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2013). An Approximate Solution for Semi-Open Queueing Network Model of an Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(1), 205–215.
- Ekren, B. Y., Heragu, S. S., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2014). Matrix-geometric solution for semi-open queuing network model of autonomous vehicle storage and retrieval system. *Computers & Industrial Engineering*, 68, 78–86.
- Ekren, B. y., Lerher, T., Küçükyaşar, M., & Jerman, B. (2023). Cost and performance comparison of tier-captive SBS/RS with a novel AVS/RS/ML. *International Journal of Production Research*, 1–15.
- Epp, M., Wiedemann, S., & Furmans, K. (2017). A discrete-time queueing network approach to performance evaluation of autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 55(4), 960–978.
- Fang, Y., & Tang, M. (2014). The AVS/RS Scheduling Optimization Based on Improved AFSA. *International Journal of Control and Automation*, 7(10), 53–64.
- Fukunari, M., & Malmborg, C. J. (2008). An efficient cycle time model for autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 46(12), 3167–3184.
- Fukunari, M., & Malmborg, C. J. (2009). A network queuing approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 193(1), 152–167.

- Guerrazzi, E., Mininno, V., Aloini, D., Dulmin, R., Scarpelli, C., & Sabatini, M. (2019). Energy Evaluation of Deep-Lane Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System. *Sustainability*, *11*(14), 3817.
- Heragu, S. S., Cai, X., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2011). Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems. *International Journal of Production Research*, *49*(22), 6833–6861.
- Jerman, B., Ekren, B. Y., Küçükyaşar, M., & Lerher, T. (2021). Simulation-Based Performance Analysis for a Novel AVS/RS Technology with Movable Lifts. *Applied Sciences*, *11*(5), 2283.
- Kumar, A., Roy, D., & Tiwari, M. K. (2014). Optimal partitioning of vertical zones in vehicle-based warehouse systems. *International Journal of Production Research*, *52*(5), 1285–1305.
- Kuo, P.-H., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2007). Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies. *Applied Mathematical Modelling*, *31*(10), 2332–2346.
- Kuo, P. H., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2008). Performance modelling of autonomous vehicle storage and retrieval systems using class-based storage policies. *International Journal of Computer Applications in Technology*, *31*(3–4), 238–248.
- 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.
- Malmborg, C. J. (2002). Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, *40*(8), 1807–1822.
- Malmborg, C. J. (2003a). Design optimization models for storage and retrieval systems using rail guided vehicles. *Applied Mathematical Modelling*, *27*(12), 929–941.
- Malmborg, C. J. (2003b). Interleaving dynamics in autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, *41*(5), 1057–1069.
- Manzini, R., Accorsi, R., Baruffaldi, G., Cennerazzo, T., & Gamberi, M. (2016). Travel time models for deep-lane unit-load autonomous vehicle storage and retrieval system (AVS/RS). *International Journal of Production Research*, *54*(14), 4286–4304.

- 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.
- Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S., & Tappia, E. (2013). Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 51(14), 4365–4387.
- Marolt, J., Kosanić, N., & Lerher, T. (2022). Relocation and storage assignment strategy evaluation in a multiple-deep tier captive automated vehicle storage and retrieval system with undetermined retrieval sequence. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(9–10), 3403–3420.
- Ozaki, M., Higashi, T., Ogata, T., Hara, T., Rubrico, J. I. U., & Ota, J. (2016). Design of AVS/RS under group constraint. *Advanced Robotics*, 30(22), 1446–1457.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343–362.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S., & Malmborg, C. J. (2015a). Queuing models to analyze dwell-point and cross-aisle location in autonomous vehicle-based warehouse systems. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 72–87.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S., & Malmborg, C. J. (2015b). Stochastic models for unit-load operations in warehouse systems with autonomous vehicles. *Annals of Operations Research*, 231(1), 129–155.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S. S., & Malmborg, C. J. (2012). Performance analysis and design trade-offs in warehouses with autonomous vehicle technology. *IIE Transactions*, 44(12), 1045–1060.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S. S., & Malmborg, C. J. (2014). Blocking Effects in Warehouse Systems With Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(2), 439–451.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S. S., & Malmborg, C. J. (2017). A multi-tier linking approach to analyze performance of autonomous vehicle-based storage and retrieval systems. *Computers & Operations Research*, 83, 173–188.
- Tappia, E., Marchet, G., Melacini, M., & Perotti, S. (2015). Incorporating the environmental dimension in the assessment of automated warehouses. *Production Planning & Control*, 26(10), 824–838.

- Tutam, M., Liu, J., & White, J. A. (2023). Performance Analysis of a Class-based Robotic Compact Storage and Retrieval System. *Proceedings of the IISE Annual Conference & Expo 2023*. Proceedings (pp. 1-6).
- Yugang Yu, J. Y., & Guo, X. (2023). Retrieval sequencing in autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–20.
- Zhang, L, Krishnamurthy, A., Malmborg, C. J., & Heragu, S. S. (2009). Variance-based approximations of transaction waiting times in autonomous vehicle storage and retrieval systems. *European Journal of Industrial Engineering*, 3(2), 146–169.
- Zhang, Li, Krishnamurthy, A., Malmborg, C. J., & Heragu, S. S. (2011). Performance modelling of autonomous vehicle storage and retrieval systems with generally distributed service times. *European J. of Industrial Engineering*, 5(4), 448.
- Zou, B., Xu, X., (Yale) Gong, Y., & De Koster, R. (2016). Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 51–67.

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
<b>Adı Soyadı:</b>	Elif Burcu KIZILIRMAK
<b>Doğum tarihi:</b>	
<b>Doğum Yeri:</b>	
<b>Uyruğu:</b>	
<b>Adres:</b>	
Eğitim	
<b>Lise:</b>	Gölcük Çakabey Anadolu Lisesi (2010)
<b>Lisans:</b>	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü (2015) Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü (2016)
Son Çalıştığı Kurum	
<b>Mühendis:</b>	Elimsan Şalt Cihazları ve Elektromekanik A.Ş. (Kocaeli)
Yabancı Dil Bilgisi	
<b>İngilizce:</b>	B1