

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



DEPO YERLEŞİM OPTİMİZASYONU VE BİR VAKA ÇALIŞMASI

HASAN AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. İbrahim KÜÇÜKKOÇ** (Tez Danışmanı)
 Dr. Öğr. Üyesi Kadir BÜYÜKÖZKAN
 Dr. Öğr. Üyesi M.A. Beyazıt OCAKTAN

BALIKESİR, ŞUBAT - 2026

KABUL VE ONAY SAYFASI

Hasan AYDIN tarafından hazırlanan “**DEPO YERLEŞİM OPTİMİZASYONU VE BİR VAKA ÇALIŞMASI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 5 Şubat 2026 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. İbrahim KÜÇÜKKOÇ
Balıkesir Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Kadir BÜYÜKÖZKAN
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi M.A. Beyazıt OCAKTAN
Balıkesir Üniversitesi

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Dilek TÜRKER

.....

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Depo Yerleşim Optimizasyonu ve Bir Vaka Çalışması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hasan AYDIN

ÖZET

DEPO YERLEŞİM OPTİMİZASYONU VE BİR VAKA ÇALIŞMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HASAN AYDIN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. İBRAHİM KÜÇÜKKOÇ)
(İKİNCİ DANIŞMAN: DOÇ. DR. AHMET SARUCAN)
BALIKESİR, ŞUBAT - 2026

Bu tez çalışması, kâğıt sektöründe faaliyet gösteren bir üretim işletmesine ait mamul depo yerleşim problemini ele almaktadır. Mevcut durumda, rulo şeklindeki malzemelerin mamul deposundaki yerleşim planlaması manuel olarak yapılmaktadır. Bu tezin amacı, depo alanının verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Depo alanının verimli kullanılmasını hedefleyerek bir Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, malzemelerin fiziksel özelliklerini, güvenli istifleme yüksekliklerini, malzeme gruplarını ve geliş sıralarını dikkate alarak depodaki dikey alan kullanımını verimli hale getirmeyi hedeflemektedir. Model, Python programlama dili ve Gurobi Optimizer aracılığıyla çözülmüştür. Model 50 adet rulo şeklindeki malzemeden oluşan gerçek bir veri seti üzerinde test edilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin sınırlarını ve performansını ölçmek için ise 78 adet problem incelenerek analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen matematiksel model ile birlikte yerleşim planının depolama verimliliğini artırması ve fiziksel-operasyonel kısıtları sağlaması açısından yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Bu tez, özellikle rulo şeklindeki malzemelerin kullanıldığı sektörler açısından uygulanabilir ve özelleştirilebilir bir depo tasarımı yaklaşımı sunarak literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Depo yerleşimi, karışık tamsayılı doğrusal programlama, rulo malzeme.

ABSTRACT

WAREHOUSE LAYOUT OPTIMIZATION: A CASE STUDY
MSC THESIS
HASAN AYDIN
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
INDUSTRIAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. İBRAHİM KÜÇÜKKOÇ)
(CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. AHMET SARUCAN)
BALIKESİR, FEBRUARY - 2026

This thesis study addresses the finished goods warehouse layout problem of a manufacturing company operating in the paper industry. In the current situation, the layout planning of roll-shaped materials in the finished goods warehouse is carried out manually. The aim of this thesis is to ensure the efficient utilization of warehouse space. With the objective of improving space utilization, a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model has been developed. The proposed model aims to enhance the efficient use of vertical warehouse space by considering the physical properties of materials, safe stacking heights, material groups, and arrival sequences. The model is solved using the Python programming language and the Gurobi Optimizer. It is tested on a real-world dataset consisting of 50 roll-shaped materials. To evaluate the limits and performance of the developed mathematical model, 78 problem instances are examined and analyzed. The results demonstrate that the proposed mathematical model offers a new perspective by improving storage efficiency while satisfying physical and operational constraints. This thesis aims to contribute to the literature by presenting an applicable and customizable warehouse design approach, particularly for industries that handle roll-shaped materials.

KEYWORDS:Mixed-integer linear programming, warehouse layout, roll materials

Science Code / Codes: 90628, 90622

Page Number: 71

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1 Depo ve Depolama.....	1
1.2 Özgün Değer	4
1.3 Çalışma Kapsamı	5
2. LİTERATÜR TARAMASI	8
2.1 Depo İçi Taşıma Maliyeti Üzerine Çalışmalar	8
2.2 Depoda Alan ve Bölme Sayısı Üzerine Çalışmalar	13
2.3 Kullanılan Kutu ve Palet Sayısı Üzerine Çalışmalar	15
3. PROBLEMİN TANIMI VE GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL	19
3.1 Problem ve Amaç.....	19
3.2 Matematiksel Model	20
3.2.1 Veri seti	21
3.2.2 Veri seti	23
3.3 Sayısal Örnek	25
3.3.1 Veri seti	25
3.3.2 Veri seti analizi.....	29
3.3.3 Çözüm sonuçları.....	32
4. DENEYSEL SONUÇLAR	38
4.1 Küçük ve Orta Boyutlu Problemler	38
4.1.1 Lokasyonların yükseklik dağılımları.....	40
4.1.2 Lokasyonların ağırlık dağılımları.....	41
4.2 Büyük Boyutlu Problemler	43
4.3 Performans	48
4.3.1 Küçük ve orta boyuttaki problemlerin performansı	49
4.3.2 Büyük boyutlu problemlerin performansı	51
5. SONUÇLAR	54
6. KAYNAKÇA	56
EKLER	59
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1: Malzemelerin üst üste yerleştirilmesi teknik resmi.	20
Şekil 3.2: Malzemelerin yükseklik dağılımları..	29
Şekil 3.3: Malzemelerin ağırlık dağılımları..	30
Şekil 3.4: Malzemelerin yerleşimi..	35
Şekil 3.5: Depo yerleşimi teknik resmi..	36
Şekil 4.1: Problem 1 ve problem 3'ün yükseklik dağılımları.....	40
Şekil 4.2: Problem 5 ve problem 7'nin yükseklik dağılımları	41
Şekil 4.3: Problem 9'un yükseklik dağılımı.....	41
Şekil 4.4: Problem 1 ve problem 3'ün ağırlık dağılımları	42
Şekil 4.5: Problem 5 ve problem 7'nin ağırlık dağılımları	42
Şekil 4.6: Problem 9'un ağırlık dağılımı.....	42
Şekil 4.7: 20 malzeme ve 30 malzeme için lokasyona göre çözüm süresi	49
Şekil 4.8: 40 malzeme ve 50 malzeme için lokasyona göre çözüm süresi	50
Şekil 4.9: Malzeme sayısı, lokasyon sayısı ve çözüm süresinin grafiği.	50
Şekil 4.10: Malzeme sayısı, grup sayısı ve GAP değerinin grafiği	52
Şekil 4.11: Malzeme sayısı, grup sayısı ve amaç fonksiyonu değerinin grafiği	53

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Depo içi taşıma maliyeti üzerine yapılan çalışmalar.....	9
Tablo 2.2: Depoda alan ve bölme sayısı ile ilgili çalışmalar.....	13
Tablo 2.3: Kullanılan kutu ve palet sayısı ile ilgili çalışmalar.....	15
Tablo 3.1: Malzemeler kümesi.....	27
Tablo 3.2: Lokasyonlar kümesi.....	28
Tablo 3.3: Malzemelerin yerleşim bilgileri.....	32
Tablo 3.4: Lokasyonların yerleşim sonrası bilgileri.....	34
Tablo 4.1: Küçük ve orta boyutlu problemlerin özellikleri.....	38
Tablo 4.2: Küçük ve orta boyutlu problemlerin çözüm sonrası verileri.....	39
Tablo 4.3: Büyük boyutlu problemlerin özellikleri.....	44
Tablo 4.4: Büyük boyutlu problemlerin çözüm sonrası verileri.....	46
Tablo 4.5: Küçük, orta ve büyük boyuttaki problemlerin karşılaştırması.....	48
Tablo 4.6: Çözüm süresi korelasyon ve belirleme katsayısı tablosu.....	51

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

ABO:	Afrika Bufalosu Optimizasyonu
AFD:	Amaç Fonksiyonu Değeri
AHP:	Analitik Hiyerarşı Süreci
ALS:	Açılan Lokasyon Sayısı
BPP:	Kutulama Problemi
CSA:	Karga Arama Algoritması
ÇS:	Çözüm Süresi
LIFO:	Son Giren İlk Çıkar
LNSA:	Komşu Arama Algoritması
LS:	Lokasyon Sayısı
MDS:	Çok Boyutlu Ölçekleme
MGS:	Malzeme Grubu Sayısı
MILP:	Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama
MINLP:	Karışık Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama
MS:	Malzeme Sayısı
MSBBPP:	Çok Boyutlu Kutulama Problemi
MTA:	Malzeme Toplam Ağırlığı
MTY:	Malzeme Toplam Yüksekliği
PR:	Problem
PSO:	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
SN:	Saniye
SPLU:	İstiflenmiş Palet Yük Birimi
SPU:	İstiflenmiş Palet Ünitesi
SSA:	Sincap Arama Algoritmasının
TLS:	Teorik Lokasyon Sayısı
TSP:	Gezgin Satıcı Problemi
VRP:	Araç Rotalama Problemi
VSPPC:	Çatışmalı Değişken Kapasiteli Kutu Yerleştirme Problemi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi birikimleri, akademik tecrübeleri ve yol gösterici katkılarıyla her aşamada bana rehberlik eden; sabır, anlayış ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanlarım Prof. Dr. İbrahim Küçükkoç ve Doç. Dr. Ahmet Sarucan'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca sevgilerini, emeklerini ve fedakârlıklarını benden esirgemeyen; bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, her daim yanımda olduklarını hissettiren aileme, özellikle kıymetli annem Sevda Aydın ve babam İrfan Aydın'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca sabrı, anlayışı ve desteğiyle bana güç veren, motivasyonumu her zaman yüksek tutan sevgili eşim Esma Nur Aydoğan Aydın'a sevgilerimi sunarım.

Balıkesir, 2026

Hasan Aydın

1. GİRİŞ

Depolar, malzemelerin güvenli şekilde saklandığı, talebe uygun biçimde hazırlandığı ve dağıtıldığı lojistik sistemler olarak tanımlanmaktadır (Rushton et al., 2022). Tedarik zincirinin temel halkalarından biri olan depolar, özellikle küresel rekabetin arttığı günümüz şartlarında üretici ve dağıtıcı firmalar için stratejik bir öneme sahiptir (Kordos et al., 2020). Malzemelerin toplanması, depolanması ve sevkiyatı gibi kritik operasyonlar bu merkezlerde gerçekleştirilmesi nedeniyle depo yönetiminin etkinliği doğrudan işletme performansını etkilemektedir. Depo yerleşimi, lojistik sistemlerin hem teknik hem de operasyonel başarısında belirleyici rol oynamaktadır. Depo verimliliğini artırmak için optimize edilmesi gereken unsurlar arasında malzeme taşıma mesafeleri, raf tipi seçimi, malzeme yerleşim düzeni ve koridor genişliği yer almaktadır (Fernández-Pachas and Huang, 2025).

Literatürde, depo yerleşimi tasarımında genellikle iki ana hedef arasında denge kurulması gerektiği ifade edilmektedir. Bunlar; alan verimliliği (daha fazla malzeme kapasitesi) ve operasyonel verimlilik (daha kısa yürüyüş mesafeleri) olarak tanımlanmıştır (Looms and Xie, 2025).

Depo yönetim sistemleri, sadece malzeme yerleştirme ve sipariş sıralama gibi süreçleri değil aynı zamanda depo alanının etkin kullanımını da kapsayan geniş bir uygulama alanına sahiptir. Depolama alanının optimize edilmesi daha büyük hacimli depo ihtiyacını azaltarak maliyetleri düşürmekte ve kullanılmayan alanları minimize etmektedir (Shahroudejad et al., 2024). Özellikle mamul depolar, nihai malzemelerin geçici olarak tutulduğu, yüksek birim maliyete sahip malzemelerin yönetildiği kritik lojistik alanlardır (Aktan vd., 2020). Bu depolarda hem güvenliğin sağlanması hem de doğru malzeme miktarı ve çeşitliliğinin bulundurulması büyük önem taşımaktadır. Rastgele malzeme yerleşimi, alan kullanımında verimsizliğe, malzeme takibinde zorluğa ve operasyonel gecikmelere yol açabilmektedir.

1.1 Depo ve Depolama

Depolar; malzemelerin sadece depolanma amaçlı kullanıldığı yerler değildir aksine üretim ve lojistik faaliyetleri açısından önemli bir yere sahiptir. Depoların sektörlere göre toplam lojistik operasyonları maliyetleri incelendiğinde; önemli bir kısmının depolama ve stoklama kaynaklı olduğu görülmektedir. ABD’de depoların sermaye ve işletme maliyetleri toplam

lojistik maliyetlerinin %22'sini oluşturmaktadır. Avrupa'da ise bu oran %25'tir (Kostas, 2022).

Depolar; üretim, envanter, konum, ulaştırma ve bilgi ile birlikte birincil tedarik zincirinin beş kritik bileşeninden bir tanesidir (Luu et al., 2023).

Depoların iki temel işlevi bulunmaktadır. Bunlar;

1. Malların geçici olarak depolanması ve korunması,
2. Katma değerli hizmetlerin (örneğin bireysel müşteri siparişlerinin karşılanması, malzemelerin paketlenmesi, satış sonrası hizmetler, onarım, test, muayene ve montaj) sunulmasıdır (Heragu et al., 2005).

Birçok çalışmaya göre depo işletim maliyetlerinin yaklaşık %60'ı siparişlerin tamamlanması sırasında malların toplanmasına ayrılmaktadır. Bu operasyonun hızı, müşteri siparişlerine verilen yanıt süresinde belirleyici bir faktör olduğundan ve müşterilerin bir sonraki alışverişlerinde aynı firmayı tercih edip etmeme kararlarını etkileyen unsurlardan biri olduğundan sipariş tamamlama hızının rolü daha da kritik görünmektedir (Kordos et al., 2020).

Depolama, malzemelerin güvenli bir biçimde ihtiyaç duyulacağı ana kadar muhafaza edildiği faaliyetler bütünü olarak tanımlanmaktadır. Depo ise bu süreçlerin gerçekleştiği fiziksel ortam olarak tanımlanmaktadır. Depolama, hareket hızının durduğu durum yani hızı sıfır olan bir nakliye olarak tanımlanmaktadır (Acar ve Ateş, 2011).

Depolama; hammadde, yarı mamul, nihai ürün ve yardımcı diğer tüketim malzemelerinin depolardaki ve dağıtım merkezlerindeki tüm işlevlerini içeren bir kavram olarak tanımlanmaktadır. Depolama etkinliği, fiziksel dağıtımın kritik hareket merkezlerinden birisidir. Depolama, hammadde tedarikinden nihai ürünün son kullanıcıya ulaştırılmasına kadarki akışta yer alan, bu süreçteki değişen ihtiyaçlar doğrultusunda tanımına farklı içerikleri katan, dolayısıyla kapsamı geniş olan bir konudur. Bu nedenle depolama, tek bir etkinlik olarak değil, tedarik zinciri boyunca ve diğer lojistik etkinliklerin bütünleştirilmesi ile işletmelere sağladığı yarar daha görünür ve rolünün daha anlamlı olduğu görünmektedir (Kostas, 2022).

Depolama kapasitesi, belirli bir hizmet seviyesini karşılayacak şekilde depolanacak malzemeleri barındırmak için gereken alan miktarı olarak tanımlanmaktadır. Depolama ve adresleme yöntemleri, malzemelerin nerede ve nasıl depolanacağını planlamaktadır. Depolama yöntemleri arasında raflar, çekmeceler ve paletler bulunurken; adresleme yöntemleri, malzemelerin yerlerini belirlemek için kullanılan etiketleme ve kodlama sistemlerini içermektedir. Bu yöntemler, depolama alanı verimliliğini en üst düzeye çıkarmaya ve malzemelerin hızlıca bulunmasına yardımcı olmaktadır (Öztürk ve Saraç, 2023).

Depo tasarımı ve yerleşimi, depo yönetiminin önemli etkenlerinden biri olup, etkin bir depo yerleşimi operasyon maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Toktaş-palut ve Okçuoğlu, 2019). Depo tasarımı karmaşık bir problemdir ve bu süreç, depo operasyonları kaynakları ve organizasyonu arasındaki çok sayıda birbirine bağlı kararları içermektedir. Toplama sürecinin optimize edilmesi depo yerleşimine bağlıdır (Heragu et al., 2005).

Uygun bir depo tasarımı, malzeme akışının sorunsuz olmasını sağlamalı, kat edilen mesafeyi en aza indirmeli, yüksek depolama ihtiyaçları için yüksek tavanlı alanlar ayırmalı ve emeğin yoğun süreçler için düşük tavanlı alanları yeterli koridor alanıyla donatmalıdır (Sawicki and Sawicka, 2023). Uygun şekilde planlanmamış bir yerleşim düzeni, daha yüksek işletme maliyetlerine, iş gücü verimsizliğine ve sipariş karşılamada gecikmelere neden olabilmektedir. Bu yüzden depo tasarımı süreci hem teknik hem de stratejik bir yaklaşımla ele alınmalıdır (Fernández-Pachas and Huang, 2025). Depo yerleşimi, lojistik sistemlerin etkinliğini ve verimliliğini doğrudan etkileyen temel bir konudur. Malzeme taşıma mesafelerinin azaltılması, uygun rafların seçilmesi, malzemelerin mantıklı şekilde yerleştirilmesi ve uygun koridor genişliklerinin belirlenmesi gibi faktörler, depo operasyonlarının başarısı açısından oldukça önemlidir (Looms and Xie, 2025).

Stok alanını maksimize ederek ve boşa harcanan veya yetersiz kullanılan bölgeleri en aza indirerek daha büyük kapasiteli bir depoya duyulan ihtiyacı azaltır. Verimli depo konfigürasyonları, gereksiz hareketleri ve buna bağlı hataları ortadan kaldırarak sipariş karşılama sürecini iyileştirebilmekte ve böylece zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır (Shahroudnejad et al., 2024).

Depo yönetiminin temel amacı, tedarik zinciri boyunca malzeme ve malzeme akışının etkin bir şekilde sağlanmasıdır. Bu kapsamda envanter seviyelerinin yönetilmesi, malzeme takibi ve izlenebilirliğin sağlanması, maliyetlerin minimize edilmesi ve müşteri memnuniyetinin artırılması hedeflenmektedir (Mohamud et al., 2023). Depo Yönetim Sistemlerinin temel amacı ise, operasyonların mümkün olduğunca verimli şekilde yürütülmesi ve bu sayede verimliliği artırarak, işçilik maliyetlerini azaltarak ve nihayetinde müşteri memnuniyetini yükselterek kârlılığı artırmaktır (Shahroudnejad et al., 2024). Depo yönetimi; malzeme yerleştirme, stok takibi, depolama, malzeme akışı ve personel yönetimi gibi yöntemleri kapsamaktadır ve bunun önemli bir kısmı lokasyon optimizasyonudur. Bu yaklaşım, envanterin en iyi şekilde tahsis edilmesine yardımcı olmaktadır. Yüksek devirli malzemelerin kolay erişim için öncelikli yerlere konulması, seyahat sürelerinin azaltılması ve taşıma maliyetlerinin düşürülmesi de bu kapsamdadır. Uygun lokasyon optimizasyonu, malzemelerin doğru yerde, kolayca bulunabilir ve operasyonel ihtiyaçlarla uyumlu olmasını sağlamaktadır ve bu doğrultuda genel depo verimliliğini artırmaktadır (Öztürk ve Saraç, 2023).

Depo yönetimi, rekabetçi bir ortamda sürdürülebilir kalkınma için tedarik zinciri verimliliğini korumada kritik bir unsurdur. Lojistik maliyetlerinin yaklaşık %25'i depo faaliyetlerinden kaynaklanmakta, bunun da yaklaşık %55'ini sipariş toplama oluşturmakta ve sipariş toplama faaliyetlerinde geçen toplam sürenin yaklaşık %60'ı seyahat süresine karşılık gelmektedir. Depo yönetimi, malları ihtiyaç duyulana kadar tutma temel amacının ötesinde, tedarik zinciri performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Modern depolar, yalnızca depolama işlevi görmekten ötesinde, dağıtım merkezi olarak faaliyet göstererek değer yaratan faaliyetleri yerine getirmekte ve şirketlerin sürdürülebilir rekabetçiliğine katkıda bulunmaktadır (Luu et al., 2023).

1.2 Özgün Değer

Bu çalışmanın özgün değeri, kâğıt sektöründe kullanılan ruloların depo yerleşimine yönelik, literatürde sınırlı olarak ele alınan fiziksel ve operasyonel kısıtları doğrudan dikkate alan ve amacı depo verimliliği olduğu için kullanılan alanı minimize etmeyi amaçlayan MILP modelinin geliştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Literatürde çoğunlukla prizmatik veya palet bazlı malzemeler üzerine odaklanılırken, bu çalışmada rulo malzemelerin istiflenebilirliği, güvenli istifleme yüksekliği, ağırlık kısıtları, malzeme grupları ve geliş sıraları gibi sektöre özgü değişkenler modele entegre edilmiştir. Ayrıca model, yalnızca

depolama alanını minimize etmeye odaklanmakla kalmayıp, dikey alan kullanımını maksimize etmeyi hedefleyen bir yerleşim yaklaşımı sunmaktadır. Geliştirilen model, 50 birimlik gerçek bir veri seti üzerinde test edilmiş ve 78 farklı problem ile çözüm performansı ve sınırları analiz edilerek ölçeklenebilirliği ortaya konulmuştur. Bu yönüyle çalışma, sadece teorik bir model geliştirmekle kalmayıp, rulo malzemelerin yoğun olarak kullanıldığı sektörler için uygulanabilir, özelleştirilebilir ve karar destek sistemi olarak kullanılabilen bir depo tasarımı yaklaşımını sunarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

1.3 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması, kâğıt sektöründe faaliyet gösteren bir üretim işletmesinin mamul deposunda karşılaşılan yerleşim problemini ele almakta ve bu probleme çözüm önerisi olarak MILP temelli bir matematiksel model geliştirmektedir. Günümüzde üretim ve lojistik faaliyetlerinin artan karmaşıklığı, depolama alanlarının etkin ve verimli kullanılmasını stratejik bir zorunluluk hâline getirmiştir. Özellikle kâğıt gibi hacimli, ağır ve istifleme özellikleri bakımından belirli fiziksel sınırlamalara sahip malzemelerin depolanmasında uygun yerleşim kararlarının alınması hem operasyonel verimliliğin hem de maliyet etkinliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda geliştirilen model, söz konusu işletmenin mamul deposunda malzemelerin fiziksel özelliklerini ve operasyonel gereksinimlerini dikkate alarak en uygun yerleşim desenlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Model, malzemelerin yükseklik, ağırlık, geliş sırası, malzeme grubu ve güvenli istifleme yüksekliği gibi karakteristik özelliklerini göz önünde bulundurarak, her bir lokasyonun kullanılabilir maksimum yükseklik ve taşıma kapasitesi gibi fiziksel kısıtlarını dikkate almakta ve bu parametreler altında en uygun atama kararlarını vermektedir. Çalışmanın temel amacı, kullanılan lokasyon sayısını minimize ederek depo alan verimliliğini en üst düzeye çıkarmaktır. Bu sayede hem alan kullanımından tasarruf sağlanmakta hem de malzemelerin istifleme düzeni sistematik hâle getirilerek operasyonel süreçlerde süreklilik ve güvenlik sağlanmaktadır.

Geliştirilen matematiksel modelde çeşitli gerçekçi operasyonel kısıtlar tanımlanmıştır. Örneğin, lokasyonların yükseklik ve ağırlık kapasitelerinin aşılmaması kısıtı, fiziksel güvenlik ve altyapı bütünlüğü açısından kritik rol oynamaktadır. Bununla birlikte güvenli istifleme kısıtı, malzemelerin istifleme sırasının ve yük dağılımının uygun şekilde gerçekleşmesini sağlayarak hem malzeme bütünlüğünü hem de iş güvenliğini garanti altına almaktadır. Bir diğer kısıtımız malzemeleri gruplara ayırma ve bu gruplara göre malzemeleri

yerleştirme kısıtı ise operasyonel faaliyetler açısından katkı sağlamaktadır. Ayrıca modelde yer alan geliş sırası kısıtı sayesinde malzemelerin depo içerisinde en fazla bir zaman dilimi bekletebilmesi sağlanmış, böylece sistemin operasyonel verimliliği artırılarak malzeme akışının daha düzenli ve planlı gerçekleşmesi mümkün hâle getirilmiştir. Bu bütünleşik yapı sayesinde model yalnızca statik bir yerleşim çözümü sunmakla kalmamakta, aynı zamanda depo içi operasyonel süreçlere de doğrudan katkı sağlamaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, depo tasarımı ve yerleşimi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Bu inceleme sırasında özellikle geliştirilen modelle doğrudan ilişkili olan ve malzeme özelliklerine bağlı yerleşim kararlarını ele alan araştırmalar ön plana çıkarılmıştır. Böylece mevcut literatürdeki yaklaşımların güçlü ve zayıf yönleri ortaya konulmuş ve geliştirilen modelin literatüre olan katkısı detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

Üçüncü bölümde, ele alınan problemin tanımı ayrıntılı olarak tanımlanmış, ardından önerilen matematiksel modelin yapısı, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtları detaylı biçimde sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca, gerçek bir üretim işletmesinden elde edilen veriler ile yürütülen vaka çalışması kapsamındaki parametreler açıklanmış ve söz konusu veri seti kullanılarak modelin Python programlama dili kullanılarak Gurobi Optimizer aracılığıyla çözümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen çözüm sonuçları, modelin doğruluğunu, uygulanabilirliğini ve performansını göstermek amacıyla ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde ise modelin farklı koşullar altında nasıl davrandığını test etmek amacıyla küçük ve orta boyutlu problemler için 12 farklı problem oluşturulmuş olup her bir probleme ait veri setleri ve çözüm sonuçları analiz edilmiştir. Bu problemler, farklı malzeme sayısı, lokasyon kapasitesi, istifleme özellikleri gibi parametrelerin değiştirilmesi ile çeşitlendirilmiş ve modelin esnekliği değerlendirilmiştir. Problem sonuçları grafiksel yöntemlerle sunulmuş, çözüm süreleri ve alan kullanım oranları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca çözüm performansını etkileyen faktörleri ortaya koymak amacıyla korelasyon katsayısı hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar detaylı bir biçimde yorumlanmıştır. Bu analiz sayesinde modelin performansını en çok etkileyen parametrelerin hangileri olduğu tespit edilmiş ve gelecekte yapılacak optimizasyon çalışmalarına yol gösterici bilgiler elde edilmiştir. Büyük boyutlu problemler için ise 66 farklı problem oluşturulmuştur. Problemlerde seçilen veri setleri farklı lokasyon, malzeme ve grup

sayılarından oluşturulmuştur. Malzemelerin fiziksel özellikleri, geliş sıraları ve malzeme grupları veri setlerinde değişiklik göstermektedir. Bu değişiklikler sayesinde problemde çeşitlilik sağlanmıştır. Oluşturulan problemlerin çözüm sonuçlarından elde edilen bilgiler detaylı bir şekilde tablo halinde verilmiştir. Problemlerin çözüm sonuçlarında; GAP değerleri, amaç fonksiyonu değerleri, çözüm süreleri bakımından grafikler ve tablolar yardımıyla detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma hem akademik hem de uygulamalı açıdan literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Akademik olarak, depo yerleşim probleminin gerçekçi parametreler ve operasyonel kısıtlar altında ele alındığı bütünlük bir MILP modeli önerilmiş ve bu çalışmada rulo malzemelerin istiflenebilirliği, güvenli istifleme yüksekliği, ağırlık kısıtları, malzeme grupları ve geliş sıraları gibi sektöre özgü değişkenler modele entegre edilerek literatüre katkı sağlanmıştır. Uygulama açısından ise, önerilen modelin gerçek bir işletme verisi ile test edilmesi sayesinde, depo alanının daha verimli kullanılmasına, operasyonel süreçlerin hızlanmasına ve toplam maliyetlerin azalmasına yönelik fikirler ortaya konulmuştur. Bu yönüyle çalışma, yalnızca teorik bir model değil, aynı zamanda sanayi uygulamaları açısından da yüksek katma değer üretebilecek bir karar destek aracı olarak değerlendirilebilir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir kısmı, depo tasarımı ve yerleşim problemleri üzerine yoğunlaşmakta ve bu kapsamda alan kullanımının optimize edilmesine yönelik çeşitli yaklaşımlar sunmaktadır. Söz konusu araştırmalar, özellikle depo içi süreçlerin verimliliğini artırma, malzeme akışını iyileştirme, sipariş toplama sürelerini azaltma ve yerleşim düzenini operasyonel hedeflerle uyumlu hâle getirme konularında yoğunlaşmaktadır. Bununla birlikte, mevcut literatürde önerilen modellerin çoğu belirli varsayımlar altında geliştirilmiş olup, gerçek endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan çok boyutlu kısıtların ve pratik koşulların bütüncül bir şekilde ele alınmasında çeşitli sınırlılıklar bulunmaktadır. Ayrıca, çoğu çalışmada depo tasarımı yalnızca maliyet veya mesafe gibi tek boyutlu performans ölçütleri üzerinden değerlendirilmiş; alan verimliliği, stok yönetimi stratejileri, malzeme özellikleri ve operasyonel sürdürülebilirlik gibi çok yönlü faktörlerin bir arada ele alındığı kapsamlı modelleme yaklaşımlarına daha az yer verilmiştir. Bu bağlamda, yürütülen bu tez, depo tasarımına yönelik literatürdeki mevcut bilgi birikimini temel almakta; ancak bunu bir adım öteye taşıyarak gerçekçi parametreler, operasyonel gereklilikler ve uygulama sahasındaki koşulları dikkate alan bütünlük bir modelleme yaklaşımı sunmaktadır. Aşağıda sunulan tablolar, önerilen modelin geliştirilmesinde kullanılan temel verilerin, parametrelerin ve karar değişkenlerinin sistematik bir biçimde özetlenmesi amacıyla hazırlanmış olup, ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilecek analizlerin ve optimizasyon sonuçlarının daha anlaşılır bir zemine oturtulmasına hedeflemektedir. Bu bölümün alt başlıklarında sırası ile depo tasarımında en çok kullanılan yöntemler ve amaçlar sıralanmıştır. Problemlerdeki amaca yönelik alt başlıklar gruplandırılmıştır.

2.1 Depo İçi Taşıma Maliyeti Üzerine Çalışmalar

Yapılan literatür taraması sonucunda, depo tasarımı konusundaki araştırmaların çoğunlukla depo içi taşıma maliyetlerinin minimize edilmesi ya da taşıma mesafelerinin kısaltılması gibi maliyet odaklı hedeflere yöneldiği tespit edilmiştir. Bu çalışmalar bizim çalışmamız ile amaç konusunda farklılık göstermesine rağmen çalışmamızda yol gösterici olmuştur. Bu kapsamda, depo içi taşıma maliyetlerini konu alan başlıca çalışmalar Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1: Depo içi taşıma maliyeti üzerine yapılan çalışmalar

Çalışma Başlığı	Yazarlar	Yıl	Amaç Fonksiyonu	Yöntem
Optimizing logistics warehouse space utilization with minimum total transportation	Öztürka ve Saraç	2025	Toplam taşıma maliyetini en aza indirmek	Tam Sayılı Doğrusal Programlama
Depo tasarımı ve yerleşimi	Evinsel vd.	2010	Depo içi taşıma maliyetini en aza indirmek	Tamsayılı Doğrusal Programlama, Excel Solver
Depo tasarımı ve yerleşimi: Bir gerçek hayat uygulaması	Palut vd.	2019	Depo içi taşıma maliyetini en aza indirmek	AHP, TOPSIS, MILP
An optimization approach for an order-picking warehouse: An empirical case	Luu and diğ.	2023	Depo içi taşıma maliyetini en aza indirmek	Sınıf tabanlı özel atama ile simetrik bir gezgin satıcı problemi modelini birleştiren hibrit bir model.
Sipariş toplama sistemlerinde üretim planlama ve sınıf temelli depo ürün atama problemi için bütünlük model önerisi	Yerlikaya ve Arıkan	2022	Maliyet minimizasyonu	MILP
Layout design modelling for a real world just-in-time warehouse	Horta et al.	2016	Depo içi taşıma mesafesini en aza indirmek.	Doğrusal Programlama Modeli, GAMS
Slotting optimization model for a warehouse with divisible first-level accommodation locations	Viveros et al.	2021	Toplam seyahat mesafesini en aza indirmek ve arka planda depolama kapasitesinin kullanımını en üst düzeye çıkarmak	Doğrusal Programlama Modeli, Genetik Algoritma
A mathematical model for the multi-levels product allocation problem in a warehouse with compatibility constraints	Guerriero et al.	2013	Maliyet minimizasyonu	Doğrusal Programlama Modeli, İteratif Yerel Arama Temelli bir sezgisel yöntem
Optimal warehouse design: Literature review and case study application	Yener ve Yazgan	2019	Sipariş toplama süresini en aza indirmek	Tamsayılı Doğrusal Programlama, Çok boyutlu ölçekleme algoritması
Mathematical model for warehouse design and product allocation	Heragu et al.	2005	Depolama maliyetini minimize etmek	MILP, Sezgisel Algoritma
A class-based storage warehouse design using a particle swarm optimisation algorithm	Sooksaksun and Kachitvichyanukul	2012	Toplam seyahat mesafesini en aza indirmek	Doğrusal Olmayan Karışık Tamsayılı Programlama, Parçacık Sürü Optimizasyonu
Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: A simulated annealing approach	Muppani and Adil	2008	Depolama alanı maliyeti ve sipariş toplama maliyeti toplamını en aza indirmek	Doğrusal Programlama, Benzetilmiş Tavlama Algoritması
A soft optimization model to solve space allocation problems in breakbulk terminals	Kang et al.	2021	Elleçleme maliyetlerinin en aza indirilmesi	Tamsayılı Doğrusal Programlama

Öztürk ve Saraç (2023), giyim kutularını yöneten üçüncü taraf bir lojistik deposuna odaklanmıştır. Kutuların benzersizliği, alan optimizasyonunda özel zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunları azaltmak için iki farklı tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Birinci model, öncesinde belirlenmiş düşük kapasiteli raf hücrelerindeki malzemeleri boşaltmak ve yerleştirmek amacıyla kullanılmaktadır. İkinci model ise aynı anda hem boşaltılacak raf hücrelerini hem de malzemelerin taşınacağı en uygun yeni lokasyonları belirlemektedir. Geliştirilen iki model içinde amaç fonksiyonu, toplam taşıma maliyetlerini minimize etmektir. Birinci model hızlı yeniden tahsis ve kısa vadeli çözümler için uygundur. İkinci model ise uzun vadeli alan optimizasyonu için uygundur. Bu modeller, depo alanı yönetimini geliştirmek için sistematik, veri odaklı bir çözüm sağlamaktadır. Problem ayrıca boş raf hücrelerinin sayısını minimize etmek ve toplam taşıma maliyetini minimize etmek amaçlarıyla çift amaçlı olarak da ele alınmıştır. Evinsel (2010) yaptığı çalışmada, deponun mevcut durumu Sistem Analizi yaklaşımı ile incelenmiş ve problem tanımlanmıştır. Daha sonra bu probleme yönelik çözüm önerileri geliştirilmiş ve bu öneriler bir matematiksel modele dönüştürülmüştür. Modeller küçük örnek bir depoda uygulanmış ve performanslarına göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu problemin çözümü için bir doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model de amaç depo içi taşımaları minimize etmektir. Geliştirilen model de her alana yalnızca bir malzeme yerleştirilmesi, aynı tip malzemelerin yan yana atanması kısıtları bulunmaktadır. Geliştirilen model LINGO ve Microsoft Excel programları yardımıyla çözülmüştür. Palut vd. (2019), bir beyaz eşya firmasında maliyetleri düşürmek amacıyla depo tasarımı ve yerleşimi konusunda bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın ilk aşamasında forklift seçiminde kriter ağırlıkları AHP yardımıyla belirlenip TOPSIS yöntemi ile uygun forklift seçilmiştir. Sonrasında depo kısıtları dikkate alınarak amaç fonksiyonu taşıma mesafesini en aza indirmek olan bir matematiksel model geliştirilmiştir ve bu model GAMS yazılımı yardımıyla çözülmüştür. Bu çalışmadaki kısıtlamalardan bizim çalışmamız ile ortak olan kısıt; bir depolama alanına en fazla bir malzeme atanması kısıtıdır. Luu et al. (2023) yaptıkları çalışmada, ATP şirketi için Gezgin Satıcı Problemi (TSP) ve sınıfa dayalı özel depolama modelleri aracılığıyla sipariş toplama operasyonlarını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen modelin amacı beklenen ortalama seyahat mesafesini minimize etmektir. Geliştirilen modelde her lokasyona yalnızca bir malzeme atanabilir, her malzeme ihtiyacı kadar lokasyona atanmalı ve atama kararları kısıtları mevcuttur. Geliştirilen matematiksel model LINGO optimizasyon yazılımı ile çözülmüştür. Yerlikaya ve Arıkan (2022), depo yönetimi içerisinde sipariş toplama sistemlerinin işleyişinde etkili olan

malzemelerin depo alanlarına atanması ve üretim planlamayı içeren bütünleşik problem için sınıf temelli depolama politikasını dikkate alan karışık tam sayılı doğrusal olmayan (MINLP) bir matematiksel model önerilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin içerisinde 4 farklı maliyet kalemi bulunmaktadır. Bu maliyet kalemleri; malzeme sınıfları için yer ayırma maliyeti, üretim alanından depolara ortalama taşıma maliyeti, depolardan çıkış noktasına taşıma maliyeti ve son olarak üretim, hazırlık, stok tutma maliyetidir. Geliştirilen matematiksel model GAMS/BARON optimizasyon yazılımı ile çözülmüştür. Çözüm sonucunda, çalışmada önerilen modelin sabit politikalı modele göre alan maliyetinden tasarruf ettiği görülmüştür. Horta et al. (2016) bu makalede, tam zamanında dağıtım operasyonunu besleyen bir çapraz sevkiyat deposunun optimize edilmiş yerleşimini döndüren, min-maks formülasyonuna dayalı bir matematiksel programlama yaklaşımı önerilmektedir. Geliştirilen model bir doğrusal programlama modelidir. Geliştirilen modelin amacı depo içi taşıma mesafesini en aza indirmektir. Geliştirilen model GAMS optimizasyon yazılımı yardımıyla çözülmüştür. Viveros et al. (2021) bu çalışma, SKU paletleri için çok katmanlı depolama yeri atama problemini ele almakta ve vinçlerin rotalarıyla ilgili seyahat sürelerini azaltmak ve toplama operasyonunu iyileştirmek amacıyla ilk seviyede bölünebilir lokasyonları dikkate almaktadır. Toplam seyahat mesafesini en aza indirmeyi ve arka planda depolama kapasitesinin kullanımını en üst düzeye çıkarmayı hedefleyen bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir. Bu karmaşık problemi çözmek için model, sırasıyla çözülen dört alt probleme ayrılmıştır. Bu alt problemler; bölünecek konum sayısı, malzeme ailelerinin atanması, koridor içindeki önceliklerin sağlanması, alt ailelere göre Perchas sıralamasına gidecek her aile için konum sayısının tanımlanmasıdır. Modelin performansını değerlendirmek amacıyla, farklı depolama stratejilerine dayalı iki analiz senaryosu önerilmiş ve bu senaryolar paletlerin giriş-çıkış mesafeleri ile hareketlerle ilişkili maliyetlerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Guerriero et al. (2013) çalışmasının amacı birden fazla katmana sahip bir depoda, sınıflar arasındaki uyumluluk kısıtları göz önünde bulundurularak malzeme tahsis problemini ele almaktır. Amacı teslimat sürelerini, envanter seviyelerini ve toplam lojistik maliyetlerini mümkün olduğunca azaltmak ve aynı zamanda yüksek hizmet seviyelerinin garanti edilmesidir. Bu çalışmada, söz konusu problemi matematiksel olarak temsil eden doğrusal bir model geliştirilmiş ve modelin performansı, gerçekçi durumları yansıtan bir dizi örnek üzerinde değerlendirilmiştir. Ayrıca modelin en önemli parametreleri dikkate alınarak bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, büyük ölçekli senaryoları makul sürelerde çözebilmek amacıyla, İteratif Yerel Arama temelli bir sezgisel yöntem tanımlanmıştır. Sayısal sonuçlar, önerilen sezgisel yöntemin, önerilen matematiksel

modele kıyasla çok daha düşük hesaplama süresi ile yüksek kaliteli çözümler elde edebildiğini göstermektedir. Yener ve Yazgan (2019) çalışmalarında, veri madenciliği tekniklerini kullanarak ortalama sipariş toplama süresini ve kat edilen mesafeyi belirlemek amacıyla depo tasarımının etkinliğini incelemiştir. Sipariş toplama işlemi, her sipariş için tekrarlanan bir operasyon olduğundan sistem verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Çalışmada; depo tasarımının performansı, yeni bir matematiksel model ve Çok Boyutlu Ölçekleme (MDS) algoritmasıyla çözülen atama problemi ile sipariş toplama süreci ele alınmaktadır. Önerilen karışık tamsayılı karesel model; müşteri tüketim desenleri, malzeme kapasitesi, malzemeler arası mesafe ve ara depolama alanı gibi unsurları içermektedir. Rastgele seçilen çok sayıda toplama talebi ise araç rotalama problemi tabanlı bir tamsayılı doğrusal model ile sıralanmaktadır. Alternatif atamalar ve farklı sipariş toplama politikaları, gerçek bir uygulama üzerinde simülasyon yöntemiyle değerlendirilmiştir. Sonuçlar; forklift ve çalışan sayısında, fazla mesai maliyetlerinde ve operasyonel yoğunlukta azalma sağlanabileceğini; ayrıca sistem çıktı oranının ve müşteri memnuniyetinin artırılabilirliğini göstermektedir. Genel olarak bulgular, önerilen modelin depo yönetiminde daha verimli sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Heragu et al. (2005) yaptıkları çalışmada, bir deponun tasarımında malzeme tahsisi ve fonksiyonel alanların boyutlandırılması problemlerini eş zamanlı olarak ele almıştır. Çalışma, yıllık elleçleme ve depolama maliyetlerinin minimize edilebilmesi amacıyla bu iki problemi birlikte çözebilen bir matematiksel model ve sezgisel bir algoritma sunmaktadır. Modelin ihtiyaç duyduğu girdi verileri çoğu depoda kolaylıkla elde edilebilir niteliktedir ve model gerçekçi kısıtları dikkate almaktadır. Geliştirilen matematiksel model LINGO programı ile çözülmüştür. Sooksaksun and Kachitvichyanukul (2012) yaptıkları çalışmada, bir depoda koridor yerleşimini ve malzeme sınıflarına dayalı depolama lokasyonu atamasını belirlemek amacıyla bir matematiksel model geliştirilmiştir. Amaç, doğrusal olmayan ve optimal çözümünün bulunması zor olan ortalama seyahat mesafesini minimize etmektir. Tek adımda depo tasarımı için bir Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) çerçevesi önerilmiş ve buna ait özel kod çözme yöntemi gösterilmiştir. Yaklaşımın avantajlarını ortaya koymak amacıyla sayısal örnekler sunulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, tek adımlı depo tasarımı için önerilen PSO çerçevesinin, depo tasarımında değerlendirilmek üzere çok sayıda iyi alternatif çözüm üretebildiğini göstermektedir. Muppani and Adil (2008) bu çalışmalarında, tüm olası malzeme kombinasyonlarını, depolama alanı maliyetini ve sipariş toplama maliyetini birlikte dikkate alan sınıf oluşturma ve depo atama problemine ait bir tamsayılı programlama modelini çözmek üzere bir Benzetilmiş Tavlama Algoritması geliştirmişlerdir. Rastgele

üretilmiş veri setleri ve endüstriyel bir vaka üzerinde gerçekleştirilen hesaplamalı çalışmalar sonucunda, geliştirilen Benzetilmiş Tavlama Algoritması'nın, sipariş başına hacim indeksi esas alınarak sıralama kısıtı altında çalışan karşılaştırmalı dinamik programlama algoritmasına göre üstün sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Kang et al. (2021) çalışmasında, ofis Alanı Tahsisi Probleminden esinlenilerek elleçleme maliyetlerini minimize eden ve gelecekteki yükler için boş alanı maksimize eden yeni bir alan tahsisi modeli geliştirilmiştir. Model, çeşitli operasyonel kısıtlar altında formüle edilmiş ve çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Etkinliği ise Beaumont Limanı verileriyle oluşturulan sayısal bir örnek üzerinden gösterilmiştir.

2.2 Depoda Alan ve Bölme Sayısı Üzerine Çalışmalar

Depo tasarımında sık görülen çalışmalar içerisinde alan, bölme sayısını maksimize etmek ve ihlal edilen malzemelerin sayısını minimize etmekte bulunmaktadır. Depoda alan ve bölme sayısı üzerine çalışmalar Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2: Depoda alan ve bölme sayısı ile ilgili çalışmalar

Çalışma Başlığı	Yazarlar	Yıl	Amaç Fonksiyonu	Yöntem
A multi-step mixed integer programming heuristic for warehouse layout optimization	Mayadunne et al.	2024	Depolama için kullanılan bölme sayısını maksimize etmek	MILP
Tam sayılı programlama ve simülasyon ile raf alanı optimizasyonu: Bir ambalaj firmasında uygulama	Yalçiner ve Can	2019	Kullanılan alanı maksimum hale getirmek	Tam Sayılı Doğrusal Programlama ve Sırt Çantası Modeli
Solving the problem of stacking goods: Mathematical model, heuristics and a case study in container stacking in ports	Namnguyen et al.	2021	Amaç, öncelikle ihlal eden öğelerin sayısını, ardından engelleyici (blocking) öğelerin sayısını minimize etmektir.	Doğrusal Programlama Modeli, 2 Aşamalı Sezgisel
Layout optimization of irregular storage areas under class storage strategy based on clustering and multi-bin size packing problem	Zhang et al.	2024	Depo alanı kullanımının maksimize edilmesi	MILP
Warehouse space optimization using linear programming model and goal programming model	Perera et al.	2022	Depo alanının en etkin şekilde kullanılması	Doğrusal Programlama, Hedef Programlama

Mayadunne et al. (2024) bu çalışmalarında, alan kullanımını iyileştirmek ve sipariş alma ile yerine getirme verimliliğini artırmak için MILP kullanılarak çok adımlı bir çözüm sunmuşlardır. Sınıf tabanlı özel atama ile simetrik bir TSP modelini birleştiren hibrit bir model sunulmaktadır. Ayrıca, büyük bir dağıtım merkezinde önerilen MILP sezgisellerinin

uygulanabilirliğini ve etkinliğini göstermek amacıyla gerçek bir vaka çalışması da sunulmaktadır. Çalışmada 2 farklı model bulunmaktadır; bu modellerden ilkinin amacı depolama için kullanılan bölme sayısını maksimize etmek ikinci modelin amacı ise depolama için kullanılan toplam alanı en üst düzeye çıkarmaktır. Bu çalışmalar dışında ihlal edilen ve engellenen malzeme adedi üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Yalçiner ve Can (2019) bu çalışmalarında, malzemelerin stok alanında raflara, en çok alanı kullanabilir hale getirme prensibi dikkate alınarak atanması yoluyla nasıl yerleştirilebileceği araştırılmıştır. Uygulama çalışmasının yapıldığı yer gıda ambalajı üreten bir firmadır. Çalışmanın ilk aşamasında en verimli raf tipi tespiti amacıyla sırt çantası modeli kullanılmıştır. Sonraki adımda, tespit edilen raf türlerinin sayısının belirlenmesi amacıyla raf alanı optimizasyonu yapılmış ve bu süreçte tamsayı doğrusal programlama tekniğinden yararlanılmıştır. Namnguyem et al. (2021) bu çalışmalarında, bir dizi malzemenin kapasite sınırlı istiflere belirli kısıtlar altında yerleştirilmesi problemini ele almıştır. Her istifte malzemelere son giren ilk çıkar (LIFO) prensibine göre erişilir. Bu nedenle, bir malzemeye ulaşmak için onun üstünde yer alan engelleyici tüm malzemelerin yeniden düzenlenmesi gerekir. Bu yeniden düzenlemeler gereksiz ve maliyetlidir. Bu çalışmada, problemin yapılabirliğine ve alt sınırlarına ilişkin bazı matematiksel analizler sunulmuştur. Ayrıca, bir matematiksel model ve iki aşamalı bir sezgisel çerçeve geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model doğrusal programlama modelidir. Geliştirilen model ve sezgisel yaklaşımın uygulamaları, Asya'daki bir limanda gerçekleştirilen gerçek yük elleçleme sürecinde gösterilmiştir. Zhang et al. (2024), düzensiz depo alanlarının düzeni için sınıf tabanlı depolama stratejisine dayalı bir optimizasyon şeması önermektedir. İlk olarak, düzensiz depo alanını birkaç düzenli dikdörtgen alana dönüştürülür. Ardından, sınıf tabanlı depolama stratejisi aracılığıyla, homojen rafların doğrusal olmayan kümeleme problemini, farklı boyutlardaki düzenli raf alanlarından oluşan doğrusal bir seçim problemine dönüştüren bir algoritma geliştirilmiştir. Son olarak, kapsamlı bir raf kümeleme algoritması ve farklı kutu boyutları seçimine sahip bir paketleme problemi oluşturulmuş ve gerçek verilere dayanarak deneysel analiz yapılmıştır. Bu çalışmada MILP modeli geliştirilmiş ve bu model Gurobi Optimizer ile çözülmüştür. Perera (2022) bu çalışmada, yalnızca zemin seviyesinde depolama yapılan bir depo için paletleme esaslı Doğrusal Programlama ve Hedef Programlama tabanlı depo alanı optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Günlük talebe bağlı olarak gerekli palet sayısı önceden hesaplanmış ve çok malzemeyi bir üretim ortamında depo alanının en verimli şekilde kullandığı gösterilmiştir. Uygulama çimento sektöründen alınan gerçek bir örnek üzerinde test edilmiştir.

2.3 Kullanılan Kutu ve Palet Sayısı Üzerine Çalışmalar

Depo tasarımında yapılan uygulamaların çeşitlerinden biri de kullanılan kutu ve palet sayısını en aza indirmektir. Son birkaç yılda dünya genelinde gönderilen paket sayısı önemli ölçüde artmıştır ve bu sayı 2019 yılında 100 milyarı aşmış olup 2025 yılında 200 milyara ulaşması beklenmektedir (Sawicki and Sawicka, 2023). Bu eğilimi takip eden taşımacılık şirketleri, lojistik süreçlerini yönetme konusundaki zorluklara her geçen gün daha fazla dikkat etmektedir. Bu bağlamda, taşıma araçlarının verimli kullanımı operasyonel verimlilik, müşteri memnuniyeti ve lojistik maliyetlerinin azaltılması üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Bunun sonucu olarak bilim camiası paketleme problemlerini yoğun bir şekilde incelemiş ve bu konuda çok sayıda literatür yayınlanmıştır (Ali et al., 2022). Palet yükleme probleminin amacı, malzemelerin taşınması ve depolanmasında kullanılan bir paletle yüklenebilecek malzeme sayısını en üst düzeye çıkarmaktır. Palet kullanımını artırarak malzemelerin dağıtım ve depolama maliyetlerini azaltmayı amaçlamaktadır (Young-Gun and Kang, 2001). Kullanılan kutu ve palet sayısı üzerine yapılan çalışmalar Tablo 2.3'te sunulmuştur.

Tablo 2.3: Kullanılan kutu ve palet sayısı ile ilgili çalışmalar

Çalışma Başlığı	Yazarlar	Yıl	Amaç Fonksiyonu	Yöntem
Ambar depolama maksimizasyonu	Gül vd.	2016	Mevcut raflara malzeme dolu kasalardan yerleştirilemeyen kasa sayısını minimize etmektir.	Sezgisel Algoritma
A modified squirrel search algorithm based on improved best fit heuristic and operator strategy for bin packing problem	El-Ashmawi and Elminaam	2019	Kullanılan kutu sayısını minimize etmek.	Sincap Arama Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Afrika Mandası Optimizasyonu, Karga Arama Algoritması
Automating bin packing: A layer building matheuristics for cost effective logistics	Tresca et al.	2022	Kullanılan palet sayısını en aza indirmek	Sezgisel / Metasezgisel
Identify patterns in online bin packing problem: An adaptive pattern-based algorithm	Lin et al.	2022	Kullanılan kutu sayısını en aza indirmek	Sezgisel / Metasezgisel
The distributor's pallet loading problem: A case study	Akkaya vd.	2019	Kullanılan palet sayısını en aza indirmek	Doğrusal Programlama Modeli, CPLEX
Design optimization of stacked pallet load units	Sawicki et al.	2023	Kullanılan SPLU sayısını en aza indirmek	MILP, Excel Solver
A large neighborhood search algorithm and lower bounds for the variable-sized bin packing problem with conflicts	Ekici	2023	Kullanılan kutuların toplam maliyetini en aza indirmek	MILP, Komşu Arama Algoritması

Gül vd. (2016) bu çalışmada, değişiklik gösteren müşteri talepleri karşısında mamul deposunda maksimum depolama alanı ve hacmi sağlayacak biçimde, kasa tipleri ve hacimlerine göre depo içerisinde ayrılacak alanların hesaplanması amaçlanmıştır. Bu

amaçlar ışığında, problemin farklı problemlerini çözecek şekilde, üç adet tamsayı matematiksel model geliştirilmiştir. Bu modeller ihtiyaç halinde tek model olarak kullanılabilir fakat bu çalışmada birlikte kullanılmıştır. Bir modelde bulunan çözüm diğer modele girdi olarak kullanılmıştır. Problemi temsil eden bir uygulama, geliştirilen modeller ile çözülmüş ve problemin NP-Zor sınıfında olması nedeniyle çözüm süresinin kabul edilebilir zamanda ulaşılamamıştır ve bu nedenle sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel algoritma günlük olarak kullanılacak şekilde oluşturulmuş ve firmada uygulanmıştır. El-Ashmawi and Elminaam (2019) bu makalede, çok boyutlu kutu paketleme problemini (MSBBPP) çözmek için Sincap Arama Algoritmasının (SSA) en son optimizasyon algoritmasına dayalı geliştirilmiş bir versiyonu önerilmektedir. Önerilen algoritma, malzemelerin kutulara uygulanabilir ilk yerleşimini gerçekleştirmek için sezgisel bir yapıya dayanmaktadır. Bu süreçte operatörün stratejik seçimleri, kutu paketleme problemi için optimize edilmiş bir çözüm elde etmeye katkı sağlamaktadır. Bildiğimiz kadarıyla, bu çalışma, sincap arama algoritmasının bin packing probleminde optimizasyon örneği olarak ilk kez uygulandığı çalışmadır. Önerilen algoritma hem kolay hem de zor veri kümeleri üzerinde test edilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca algoritmanın etkinliği ve doğruluğunu göstermek amacıyla PSO, Afrika Bufalosu Optimizasyonu (ABO) ve Karga Arama Algoritması (CSA) gibi popüler algoritmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Başka bir çalışma alanı ise kullanılan palet sayılarını minimize etmektir. Bu alan da yapılan çalışmalar şu şekildedir. Tresca et al. (2022) bu çalışmada, malzemelerin lojistik kurallara uygun şekilde palet üzerine otomatik olarak nasıl yerleştirileceğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu amaca yönelik MILP modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu kullanılan toplam palet sayısını minimize etmektir. Her katmana 1 paletin yerleştirilmesi, paletin yüksekliğini aşmayacak şekilde katmanlara yerleştirilmesi, paletin taşıyabileceği en yüksek yük sınırı gibi kısıtlamalar modele dahil edilmiştir. Çalışmada katman oluşturma sezgiseli kullanılmıştır. Lin et al. (2022) bu çalışmada, çevrimiçi kutu yerleşim problemi üzerine odaklanmaktadır. Bu problemde malzemeler sırayla ve önceden bilinmeden gelmekte ve her biri hemen bir kutuya atanmak zorundadır. Bu durum, belirsizlik altında karar verme sürecini zorlaştırmaktadır. Geliştirilen matematiksel modelde amaç kullanılan kutu sayısını minimize etmektir. Bu modelde kutu kapasitesini aşmamak üzerine kısıtlar vardır. Problem Np-Zor bir problem olduğu için sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bu aşamada desen tabanlı sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Akkaya vd. (2019) bu çalışmada, bir içecek firmasının gerçek hayattaki palet yerleştirme problemi incelenmiştir. Bu problemde amaç, kutuların birbirini örtmeyecek şekilde ve kırılganlık ilişkisi gözetilerek

üç boyutlu bir yaklaşımla paletlere yerleştirilerek toplam yüklenen kutu hacmini maksimize etmektir. Bu problem için doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen doğrusal programlama modelinin amacı kullanılan palet sayısını minimize etmektir. Geliştirilen modelde iki kutu üst üste yerleştirilemez, bir kutu sadece kullanılan palete yerleştirilebilir ve tüm malzemelerin yerleştirilme zorunluluğu kısıtları vardır. Geliştirilen model 15 farklı problemde IBM ILOG CPLEX ile çözülmüştür. Sawicki et al. (2023) yaptıkları çalışmada bir istifleme optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen matematiksel modelin temel amacı, palet yük birimlerini istiflenmiş yapılar içinde minimum sayıda kullanarak yerleştirmektir. Bu da depolama alanını minimize etmektir. Bu çalışma için bir MILP modeli önerilmiştir. Geliştirilen matematiksel model de amaç kullanılan SPU sayısını minimize etmektir. Modelde her malzeme tam olarak bir tek palet yükleme probleminin bir katına yerleştirilmelidir, her tek palet yükleme probleminde her katta en fazla bir malzeme bulunabilir, tek paket yükleme problemlerinin toplam ağırlık sınırı aşılamaz, tek palet yükleme problemlerinin toplam yükseklik sınırı aşılamaz, dayanıksız malzemeler dayanıklı olanların altına gelemez ve üst statüdeki malzemeler alt kata yerleşemez şeklinde kısıtlamalar mevcuttur. Geliştirilen model 10 farklı örnek problem Excel Frontline Solvers ile çözülmüştür. Ekici (2023) çalışmasında, Çatışmalı Değişken Kapasiteli Kutu Yerleştirme Problemi (VSBPPC) ele alınmıştır. Problemde, farklı kapasite ve maliyetlere sahip sınırsız sayıda kutuya, aralarında çatışmalar bulunan malzemelerin minimum toplam maliyetle yerleştirilmesi amaçlanmaktadır. Problem için MILP modeli geliştirilmiştir. Ayrıca problem için bir Komşu Arama Algoritması (LNSA) önerilmiş; bu algoritma, ardışık yerleştirme, çözümün parçalanması ve yerel arama adımlarından oluşan bir yapı ile geliştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, önerilen yaklaşımın literatürdeki karşılaştırmalı algoritmalara göre ortalama %4,39 daha iyi sonuçlar verdiği ve elde edilen çözümlerin ortalama %2,77 optimalite boşluğuna sahip olduğu belirlenmiştir.

Yapılan literatür taraması sonucunda, bu tez kapsamında geliştirilen matematiksel modelin mevcut çalışmalarla belirli noktalarda benzerlikler taşımaktadır. Ancak geliştirilen modelin amacı ve seçilen sektör açısından literatürde doğrudan örtüşen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Özellikle rulo şeklindeki malzemelerin sektöre özgü fiziksel ve güvenli istifleme kısıtları altında ele alınması ve modelin temel amacının alan kullanım verimliliği yönünde olması, çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. Örneğin, Luu et al. (2023) çalışmasında yer alan her lokasyona en fazla bir ürün atanması kısıtı, bu tezde kullanılan atama kısıtı ile benzerlik göstermektedir. Ancak söz konusu çalışma literatürdeki depo tasarımı ile ilgili diğer

alışmalar gibi taşıma mesafesinin minimize edilmesine ve lokasyon atama problemine odaklanmıştır. Bu tez çalışmasında depo içi mesafeler yerine alan verimliliği ve güvenli istifleme ön planda tutulmuştur. Matematiksel model yapısı bakımından en yakın benzerlik Tresca et al. (2022) alışmasıdır. Bu çalışmada palet sayısının minimize edilmesi amacı, tezde kullanılan lokasyon sayısının minimize edilmesi yaklaşımı ile paralellik göstermektedir. Ayrıca kat odaklı yerleştirme, maksimum yükseklik ve taşıma kapasitesi gibi kısıtlar da çalışmamız ile benzerlik göstermektedir. Fakat bu tez çalışmasında kullanılan malzeme grubu, palet bağımsız istifleme, malzemelerin geliş sırası ve ağırlığa bağlı güvenli olarak yerleştirilebileceği maksimum yükseklik kısıtları bu tez çalışmasını ayırđırmaktadır.

3. PROBLEMİN TANIMI VE GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Çalışmanın bu bölümünde problemin tanımı ve problemin amacı açıklanmaktadır. Devamında geliştirilen matematiksel model detaylı bir şekilde anlatıldıktan sonra gerçek hayattan alınan bir veri seti tanıtılmış ve bu veri seti geliştirilen matematiksel model yardımı ile çözülmüştür.

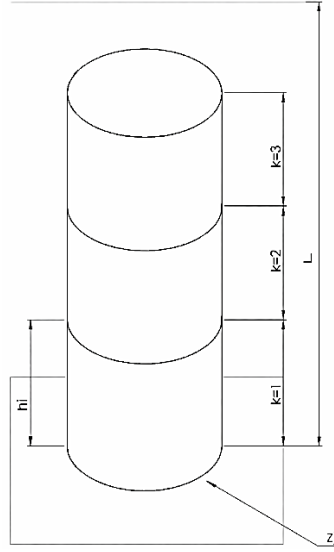
3.1 Problem ve Amaç

Bu çalışma, kâğıt endüstrisinde hizmet veren bir firmanın mamul deposunu ele almaktadır. Mamul depoya gelen malzemeler (i) rulo şeklindedir ve üst üste koyularak katlar (katmanlar) (k) halinde istiflenmektedir. Mevcut durumda malzemeler, lokasyonlara (j) aynı boyuttaki malzemeler aynı lokasyonlara atanacak şekilde ve manuel olarak yapılmaktadır. Fakat malzemelerin yerleştirilmesi sırasında aynı ölçüdeki malzemelerin üst üste yerleştirilmesi yüksekliğin verimli kullanılabilmesi için optimum yerleşimi sağlayacak kombinasyonu oluşturmasını engellemektedir. Depoda malzemelerin taşınması forklift yardımıyla ve her turda bir malzeme taşınarak yapılmaktadır. Bu problemde örnek alınan alanda bir engel olmaması ve alan yüksekliği çok fazla olması nedeniyle yükseklik olarak forkliftin ulaşabileceği yükseklik bir sınır olarak kabul edilmektedir. Başka problemlerde bu model kullanılmak istenirse yükseklik sınırı olarak depo alanının yüksekliği alınabilir. Aynı zamanda malzemelerin ağırlıkları (w_i) arttıkça güvenli olarak depolanabilecekleri yükseklik (V_i) azalmaktadır. Mevcut durumda bu durum dikkate alınmadığı için bir güvenlik zafiyeti oluşturma ihtimali bulunmaktadır. Mevcut durumda depoda her bir lokasyon için üzerindeki ağırlığın fazla olması nedeniyle oluşabilecek çökmeler dikkate alınmamıştır. Mevcut durumda hem alan kullanımında verimsizlik yaratmakta hem de malzeme takibini zorlaştırarak operasyonel süreçlerde zaman kayıplarına yol açmaktadır. Önerilen modelde kullanım alanının verimli bir şekilde kullanılması ile birlikte alan verimliliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda model içerisinde bulunan güvenli istifleme kısıtı, lokasyon bazlı ağırlık kısıtı, ağır malzemelerin hafif malzemelerin üzerine koyulmama kısıtı ile malzemelerin zarar görmesini engellemek ve oluşabilecek iş kazalarının önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Modelde bulunan kısıtlardan lokasyonların yükseklik kısıtı ise modeli gerçek hayatta uygulanabilirliğini arttırmaktadır. Model içerisinde bulunan malzemelerin yerleştirilmesinde geliş sıralarının (t_i) dikkate alınması ve malzemelerin gideceği müşteriye

göre gruplandırılarak (g) aynı lokasyonlara yerleştirilmesi kısıtları problemin amacı dışında belli operasyonel kısıtlamalar olmasını sağlamaktadır.

3.2 Matematiksel Model

Bu bölümde depoya gelen rulo şeklindeki malzemelerin lokasyonlara yerleştirilmesine ilişkin notasyonlar ve model yapısı sunulmaktadır. Malzemelerin bir lokasyonda üst üste yerleştirilme düzeni Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Malzemelerin üst üste yerleştirilmesinin teknik resmi

Şekil 3.1’den yola çıkarak, i malzemesinin j lokasyonunda k . kata (sıraya) atanmasını, her bir malzemenin bireysel yüksekliğini h_i , toplam istif yüksekliğinin lokasyon yüksekliği L tarafından sınırlandırıldığını göstermektedir. Ayrıca şekil, modelde kullanılan k indeksinin fiziksel karşılığını ve malzemelerin üst üste yerleştirildiğinde oluşan toplam yüksekliğin hesaplanma mantığını görsel olarak açıklamaktadır. Şekil 3.1’de gösterilen Z_j lokasyonun kullanılıp kullanılmadığını ifade etmektedir. Eğer lokasyon içerisinde malzeme varsa Z_j değeri 1, malzeme yok ise 0 değerini almaktadır.

Tanımlar ve Notasyonlar

İndisler

i : Malzeme indisi, $i \in I = \{1, 2, \dots, i_{max}\}$

j : Lokasyon indisi, $j \in J = \{1, 2, \dots, j_{max}\}$

k, k' : Sıra/Kat indisi $k, k' \in K = \{1, 2, \dots, k_{max}\}$

r : Geliş sırası indisi $r \in R = \{1, 2, \dots, r_{max}\}$

g : Malzeme grubu indisi $g \in G$

Parametreler

h_i : i malzemesinin yüksekliği (cm)

w_i : i malzemesinin ağırlığı (kg)

t_i : i malzemesinin geliş sırası

L : Lokasyon maksimum yükseklik sınırı (cm)

Ψ : Lokasyon maksimum ağırlık sınırı (kg)

M : Yeterince büyük pozitif bir sayı

δ : Yeterince büyük pozitif bir sayı

Ω : Ağırlık kısıtı toleransı

λ : Sıra toleransı

V_i : i malzemesinin güvenli olarak yerleştirilebileceği maksimum yükseklik

Karar Değişkenleri

X_{ijk} : Eğer i malzemesi j lokasyonunun k katına atanmışsa 1, aksi takdirde 0

Z_j : Eğer j lokasyonu kullanılmışsa 1, aksi takdirde 0

H_{jk} : j lokasyonuna ait k katının yüksekliği

Y_{gj} : g grubu j lokasyonunda bulunuyorsa 1, aksi takdirde 0

3.2.1 Amaç fonksiyonu

Bu çalışmada geliştirilen matematiksel modelin amacı, depo içerisinde kullanılan lokasyon sayısını en aza indirerek alan verimliliğini maksimize etmektir. Depo alanlarının etkin kullanımında temel hedef, malzemelerin yerleşiminde mümkün olan en az lokasyonun kullanılmasıdır. Kullanılan lokasyon sayısının azaltılması, özellikle depo alanının sınırlı olduğu veya operasyon maliyetlerinin yüksek olduğu durumlarda kritik önem taşımaktadır. Amaç fonksiyonunun ilk bölümünde P^w değeri, yani ağırlık bakımından teorik minimum lokasyon sayısı hesaplanmaktadır. Denklem (3.1)'de yapılan hesaplamada yerleştirilecek

malzemelerin ağırlıkları toplanarak her lokasyon için sabit olan maksimum ağırlık sınırına bölünür. Lokasyon için maksimum ağırlık sınırı Ψ parametresi ile gösterilir. Sonuç tamsayı ise sabit kalır eğer tamsayı değilse en yakın üstteki tamsayıya yuvarlanarak P^w değeri hesaplanmış olur. P^w değeri ağırlık bakımından teorik minimum lokasyon sayısını ifade etmektedir.

$$P^w = \left\lceil \frac{\sum_{ik} w_i}{\Psi} \right\rceil^+ \quad (3.1)$$

Denklem (3.2)'de yerleştirilecek malzemelerin yükseklik değerleri toplanarak bu çalışmada sabit olarak alınan lokasyon yükseklik sınırına bölünür. Geliştirilen matematiksel modelde yükseklik sınırı L ile ifade edilmektedir. Denklem sonucunda çıkan değer tamsayı ise sabit kalır eğer tamsayı değilse en yakın üstteki tamsayıya yuvarlanır. Denklem (3.2)'de verilen denklem sonucunda P^h değeri hesaplanır ve bu değer yükseklik bakımından teorik minimum lokasyon sayısını ifade etmektedir.

$$P^h = \left\lceil \frac{\sum_{ik} h_i}{L} \right\rceil^+ \quad (3.2)$$

Denklem (3.3)'de ise Denklem (3.2) denklemi ile hesaplanan yükseklik bazlı teorik lokasyon sayısı P^h ve Denklem (3.1) ile hesaplanan ağırlık bazlı teorik lokasyon sayısı P^w değerlerinden daha büyük olan değer P olarak belirlenir. P teorik lokasyon sayısını ifade eder.

$$P = \max (P^w, P^h) \quad (3.3)$$

Denklem (3.4)'de, Z_j değişkeni, j lokasyonunun kullanılıp kullanılmadığını gösteren ikili (binary) bir karar değişkenidir. Eğer ilgili lokasyon kullanılmışsa $Z_j = 1$, kullanılmamışsa $Z_j=0$ değerini alır. Yani $\sum_j Z_j$ ifadesi toplam açılan lokasyon sayısını ifade eder. Denklem (3.4)'de P değerinin $\sum_j Z_j$ değerine bölünmesi ile alan verimliliği hesaplanır. Bu hesaplama sonucunda alan verimliliği değeri maksimize edilmiş olur. Hesaplanan değer bir ise teorik lokasyon sayısının tamamen kullanıldığı anlaşılır ve değer bire yaklaştıkça verimlilik aynı oranda artış gösterir.

$$\max Z = \frac{P}{\sum_j Z_j} \quad \forall j \in J \quad (3.4)$$

3.2.2 Kısıtlar

Kısıt 1: Her lokasyon için o lokasyona atanan malzemelerin yükseklik toplamları, lokasyonun sahip olduğu maksimum yükseklik değerini aşamaz. Denklem (3.5)'de ki kısıt hem fiziksel güvenlik hem de kullanılabilirlik açısından önemlidir. Örneğin depo içerisinde tavan yüksekliği veya raf kısıtları dikkate alınarak, malzemelerin istiflenebileceği yükseklik belirlenmektedir.

$$\sum_i \sum_k h_i X_{ijk} \leq L \quad \forall j \in J \quad (3.5)$$

Kısıt 2: j lokasyonuna atanan malzemelerin geliş sırasına göre düşük olanın yüksek olanın alt katına atanmasını sağlamaktır. Denklem (3.6)'da $t_i + \lambda$ ifadesi malzemelerin λ birim yerleştirilmeden bekletilmesine izin verir. Bu da denkleme esneklik sağlamaktadır.

$$X_{ijk} + X_{i'j(k-1)} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \mid t_i + \lambda \leq t_{i'} \quad (3.6)$$

Kısıt 3: Denklem (3.7)'de verilen kısıt ile j lokasyonuna atanan malzemelerden ağır olanın hafif olanın üzerine atanması engellenmektedir. Denklem 3.7'de esnekliği sağlamak için Ω parametresi kullanılmıştır. Ω parametresi esnekliğin ne kadar olacağını belirlemek için kullanılmaktadır.

$$w_i \cdot X_{ij(k-1)} \leq w_{i'} \cdot X_{ijk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, w_i + \Omega \leq w_{i'} \quad (3.7)$$

Kısıt 4: Denklem (3.8)'de verilen kısıtın amacı j lokasyonuna atanan malzemelerin ağırlıklarının toplamının lokasyon ağırlık sınırını aşmamasını sağlamaktır. Her lokasyon için belirlenen lokasyon ağırlık sınırı Ψ parametresi ile gösterilmektedir.

$$\sum_i \sum_k w_i \cdot X_{ijk} \leq \Psi \quad \forall j \in J \quad (3.8)$$

Kısıt 5: Denklem (3.9)'da verilen kısıt ile eğer bir malzeme bir lokasyona atanmışsa, bu lokasyon kullanılmak zorundadır. Büyük bir sayı olarak tanımlanan M parametresi en az eşitliğin sol tarafına eşit ya da daha büyük olacak şekilde belirlenmelidir. Bu sebeple bir lokasyona atanabilecek maksimum malzeme sayısından daha büyük olması yeterlidir.

$$\sum_i \sum_k X_{ijk} \leq Z_j \cdot M \quad \forall j \in J \quad (3.9)$$

Kısıt 6: Denklem (3.10)'da verilen kısıtın amacı atamaların 1 numaralı atama noktasından başlamasını sağlamak ve sıralı olmasını sağlamaktır. Bu kısıtın olmaması durumunda lokasyon atamaları rastgele bir şekilde başlamaktadır.

$$Z_{j-1} \geq Z_j \quad \forall j \in J, \forall j > 1 \quad (3.10)$$

Kısıt 7: Denklem (3.11) her malzemenin bir noktaya atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_j \sum_k X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.11)$$

Kısıt 8: Denklem (3.12)'de verilen kısıtın amacı alt katlar dolmadan üst katlara geçilememesini sağlamaktır. Bu kısıtlama olmaması durumunda ilk katlar dolmadan en üst katlardan atama yapılmaya başlanabilir ancak depolama sistemi üst üste koyularak yapıldığı için bu gerçekçi olmaz.

$$\sum_i X_{ij(k+1)} \leq \sum_i X_{ijk} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.12)$$

Kısıt 9: Denklem (3.13)'te verilen kısıtın amacı her lokasyonun her katına en fazla bir malzeme yerleştirilmesini sağlamaktır.

$$\sum_i X_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.13)$$

Kısıt 10: Denklem (3.14)'te verilen kısıtı ile her katın yüksekliği, o kata kadar yerleştirilen malzemelerin toplam yüksekliği ile güncellenmektedir.

$$H_{jk} = \sum_i \sum_{k'} h_i X_{ijk'} \quad \forall j \in J, \forall k \in K, k' \leq k \quad (3.14)$$

Kısıt 11: Denklem (3.15)'te verilen kısıt ile malzemelerin yalnızca güvenli kabul edilen yükseklik aralığında yerleştirilmesi sağlanır. Bu kısıt, özellikle ağır malzemelerin yüksek noktalara istiflenmesinden kaynaklı güvenlik risklerini azaltır.

$$V_i \geq H_{jk} - \delta(1 - X_{ijk}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.15)$$

Kısıt 12: Denklem (3.16)'da verilen kısıt ile malzeme atandıysa o malzeme grubu da o lokasyona atanması sağlanmaktadır.

$$\sum_k X_{ijk} \leq Y_{gj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall g \in G \quad (3.16)$$

Kısıt 13: Denklem (3.17) ile her lokasyona en fazla bir grup atanmaktadır.

$$\sum_g Y_{gj} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (3.17)$$

3.3 Sayısal Örnek

Çalışmanın bu bölümünde bu problem için geliştirilen matematiksel modelin bir sayısal örnek üzerinde çözümü test edilmiştir. Çözüm öncesinde veri setleri ve çözüm sonrasında oluşan veriler bu bölümde grafikler ve sayısal veriler yardımıyla açıklanmaktadır.

3.3.1 Veri seti

Bu çalışmada kullanılan veri seti, gerçek hayat verilerinden esinlenerek hazırlanmıştır. Veri setinde toplam 50 farklı malzeme bulunmaktadır. Her malzeme için yükseklik, ağırlık, geliş sırası, malzeme grubu ve güvenli maksimum yükseklik gibi özellikler tanımlanmıştır. Bu parametreler hem malzemelerin fiziksel özelliklerini hem de depo operasyonları açısından kritik olan kısıtları yansıtmaktadır. Tablo 3.1'de sunulan 50 malzemenin geliş sırası, ağırlık, malzeme grubu ve yükseklik gibi özellikleri gerçek hayat verilerine dayanmaktadır. Maksimum yükseklik ve güvenli yükseklik varsayım yoluyla elde edilmiştir. Büyük bir sayıyı ifade eden M parametresi bu problemde 15 olarak belirlenmiştir. Lokasyonların

ağırlık kısıtına karşılık gelen Ψ parametresi bu problemde 10000 olarak alınmıştır. Denklem (3.7)'de verilen kısıta esneklik sağlamak için kullanılan Ω parametresi ise bu problemde 100 kg olarak belirlenmiştir. Denklem (3.6)'da verilen sıra kısıtına esneklik sağlamak için kullanılan λ parametresi bu problemde 1 olarak belirlenmiştir. Ω ve λ parametreleri çözüm uzayının büyümesini sağlamıştır.

- Yükseklik (h_i): Malzemelerin fiziksel boyutunu temsil etmektedir. Depolama sırasında malzemelerin üst üste istiflenebilmesi için yükseklik parametresi kritik öneme sahiptir.
- Ağırlık (w_i): Alt katta kalan malzemelerin üzerindeki, mevcut lokasyonun üzerindeki toplam yükün hesaplanması için önemlidir ve güvenli istifleme için dikkate alınması gereken bir özelliktir. Ağırlık verileri hem ağırlık limiti kısıtında hem de ağır malzemelerin hafif malzemelerin üzerine gelmemesi gerektiği kısıtlarda kullanılmaktadır.
- Geliş Sırası (t_i): Malzemelerin depoya hangi sırayla geldiğini belirler. Bu parametre, malzemelerin yerleştirilmesinde “önce gelen malzeme alta, sonra gelen malzeme üste” mantığını sağlayan kısıtlar için temel veri kaynağıdır. Bu sıra malzemelerin üretim bölümünden depoya geliş sıralarından elde edilmektedir. Ölçüleri farklı birden fazla malzemenin geliş sırası aynı olabilir. Bunun sebebi büyük rulonun kesim desenine bağlı olarak aynı büyük rulodan farklı ölçülerde kesimler gerçekleştirilmektedir.
- Maksimum Yükseklik (V_i): Her malzeme için güvenli istiflenebileceği maksimum yükseklik değeri belirlenmiştir. Bu değer, ağır malzemelerin yüksek noktalara konulmasının güvenlik riskleri yaratmasını engellemektedir. Malzemelerin ağırlıkları arttıkça maksimum yükseklikleri aynı oranda düşmektedir. Bu çalışmada maksimum yükseklik değerleri firmanın fiziki olanakları dahilinde, gerçek hayattaki uygulamalarla uyumlu olacak biçimde en ağır malzeme için 350 cm, en hafif malzeme için 1100 cm arasında ağırlıkla ters orantılı olarak belirlenmiştir.
- Grup Kimliği (g): Malzemelerin hangi gruba ait olduğunu gösterir. Grup bazlı atama sayesinde aynı malzeme grubunun aynı lokasyonda tutulması sağlanmaktadır. Böylece

lojistik operasyonlarda kolaylık sağlama imkânı vermektedir. Bu örnekte gruplar malzemelerin sevk edileceği müşterilere göre ayrılmıştır.

Tablo 3.1: Malzemeler kümesi

Nu.	Yükseklik (h_i)	Ağırlık (w_i)	Geliş Sırası (r)	Güvenli Yükseklik (V_i)	Grup (g)
1	250	3000	1	350	A
2	243	2916	1	350	A
3	152	1824	1	750	A
4	182	2184	1	520	A
5	152	1824	1	550	A
6	142	1704	1	600	A
7	112	1344	1	850	A
8	55	660	1	1100	A
9	182	2184	2	520	B
10	162	1944	2	750	B
11	152	1824	2	740	A
12	77	924	2	1000	A
13	77	924	2	1000	A
14	182	2184	2	520	A
15	152	1824	2	740	B
16	112	1344	2	940	B
17	101	1212	2	995	A
18	101	1212	2	995	A
19	182	2184	3	590	A
20	142	1704	3	790	A
21	142	1704	3	790	A
22	89	1068	3	1055	B
23	89	1068	3	1055	B
24	162	1944	3	690	A
25	142	1704	3	790	A
26	132	1584	3	840	A
27	122	1464	3	890	A
28	89	1068	3	1055	B
29	142	1704	4	550	A
30	112	1344	4	940	A
31	102	1224	4	990	A
32	102	1224	4	990	A
33	93	1116	4	1035	B
34	93	1116	4	1035	B
35	142	1704	4	600	A
36	142	1704	4	600	A
37	89	1068	4	1055	B
38	89	1068	4	1055	B
39	89	1068	4	1055	B
40	89	1068	4	1055	B
41	112	1344	5	940	A
42	112	1344	5	940	A
43	112	1344	5	940	A
44	112	1344	5	940	A
45	102	1224	5	990	A
46	93	1116	5	1035	B
47	182	2184	5	520	A
48	162	1944	5	690	A
49	152	1824	5	740	A
50	152	1824	5	740	A

Bu veriler, çalışmanın matematiksel modelinde kullanılan parametrelerin doğrudan karşılıklarını oluşturmaktadır. Dolayısıyla veri setinin doğru ve detaylı şekilde hazırlanması,

modelin gerçek hayata uygunluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Tablo 3.2’de sunulan lokasyon kümesi ise depodaki mevcut yerleşim alanlarını temsil etmektedir. Bu çalışmada 15 farklı lokasyon tanımlanmıştır. Her lokasyon için maksimum yükseklik kapasitesi yani L parametresi 800 cm olarak belirlenmiştir. Buradaki varsayım, depo alanında herhangi bir fiziksel engelin bulunmadığı ve tüm lokasyonların aynı yüksekliğe sahip olduğudur. Lokasyonların yükseklikleri depo alanında herhangi bir engel olmaması nedeniyle forkliftin ulaşabileceği en yüksek sınır olarak kabul edilmiştir ve kullanılan forkliftler 800 cm yüksekliğe kadar malzeme yerleştirebilmektedir. Ψ parametresi ile tanımlanan lokasyonların ağırlık sınırı ise her lokasyonda sabit olacak şekilde 10000 kg olarak belirlenmiştir. Lokasyon numaraları, lokasyonların yükseklik sınırları ve lokasyonların ağırlık sınırları Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Lokasyonlar kümesi

Nu.	Yükseklik Sınırı(L)	Ağırlık Sınırı (Ψ)
1	800	10000
2	800	10000
3	800	10000
4	800	10000
5	800	10000
6	800	10000
7	800	10000
8	800	10000
9	800	10000
10	800	10000
11	800	10000
12	800	10000
13	800	10000
14	800	10000
15	800	10000

- Lokasyon Kimliği (i): Depo içerisindeki farklı yerleşim alanlarını tanımlar.
- Yükseklik Sınırı (L): Yerleşim yapılacak lokasyonlarda herhangi bir engel ya da depo yüksekliği kısıtı bulunmaması nedeniyle forkliftlerin erişebileceği maksimum yüksekliği ifade eder. Bu çalışmada tüm lokasyonlar için lokasyonların yükseklik sınırları sabit olarak alınmıştır.

Veri setinin bu şekilde oluşturulması, modelin gerçek hayata uygulanabilirliğini artırmaktadır. Örneğin:

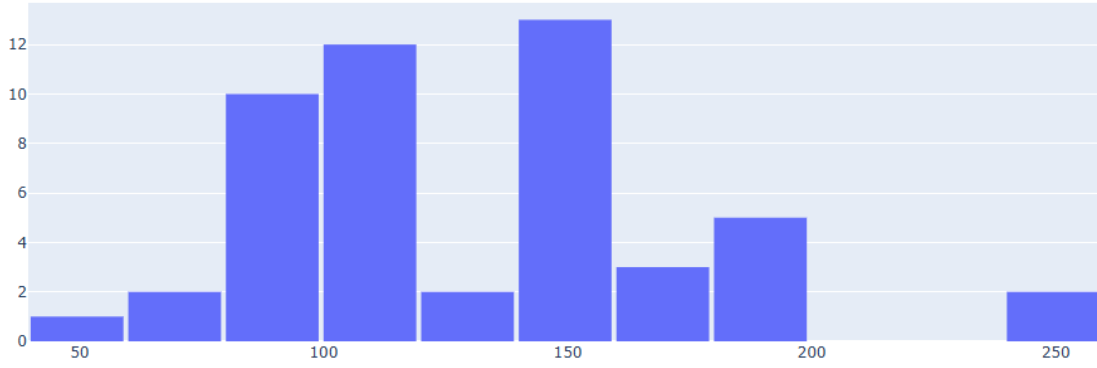
- Malzeme yüksekliği malzeme ağırlığı ve güvenli yükseklik istifleme güvenliği açısından,

- Geliş sırası depo içi operasyon sırası açısından,
- Grup kimliği sipariş toplama ve envanter yönetimi açısından kritik öneme sahiptir.

Bu nedenle, kullanılan veri seti yalnızca sayısal değerlerden oluşan bir tablo değil, aynı zamanda modelin doğruluğunu, geçerliliğini ve güvenilirliğini belirleyen temel yapı taşıdır.

3.3.2 Veri seti analizi

Çözüm aşamasına geçilmeden önce veri seti analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz doğrultusunda malzemelerin ağırlıklarının ve yüksekliklerinin dağılımları daha net bir şekilde gözlemlenmiştir. Veri setinde yer alan malzemelerin yükseklik dağılımları Şekil 3.2’de histogram grafiği ile sunulmuştur. Grafik incelendiğinde malzeme yüksekliklerinin farklı aralıklarda kümelendiği ve belirli yoğunluk bölgeleri oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 3.2: Malzemelerin yükseklik dağılımlarının grafiği

Dağılım şu şekildedir:

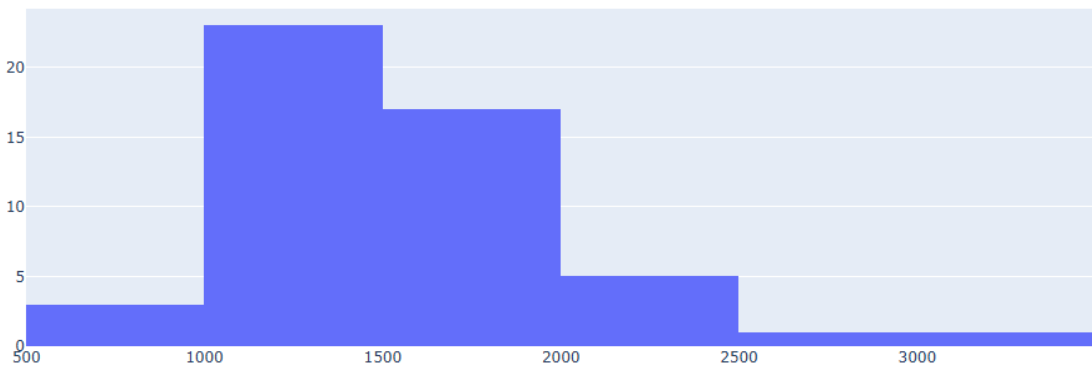
- 40–60 cm aralığında 1 malzeme,
- 60–80 cm aralığında 2 malzeme,
- 80–100 cm aralığında 10 malzeme,
- 100–120 cm aralığında 12 malzeme,
- 120–140 cm aralığında 13 malzeme,
- 140–160 cm aralığında 2 malzeme,
- 160–180 cm aralığında 3 malzeme,
- 180–200 cm aralığında 5 malzeme,
- 240–260 cm aralığında 2 malzeme bulunmaktadır.

Bu dağılım, malzemelerin 28 tanesinin 100-175 cm aralığında yer aldığını göstermektedir. Özellikle 100-125 cm aralığında 13 malzeme bulunması, bu bandın en yoğun bölge olduğunu ortaya koymaktadır. İstatistiksel ölçütler incelendiğinde:

- Minimum yükseklik: 55 cm
- Maksimum yükseklik: 250 cm
- Ortalama yükseklik: 129,04 cm
- Medyan yükseklik: 117 cm
- Standart sapma: 40,27 cm

Sonuç olarak malzeme yükseklikleri 55 cm ile 250 cm arasında değişmekte olup, ortalama yükseklik değerinin medyana oldukça yakın çıkması dağılımın dengeli olduğunu göstermektedir. Standart sapma değerinin 40,27 cm olması ise malzeme yüksekliklerinin birbirine nispeten yakın olduğunu, ancak farklı yükseklik gruplarının da çeşitlilik sağladığını ortaya koymaktadır.

Bu özellikler, modelin yükseklik kısıtlarını test etmesi için hem orta seviyede kümelenmiş hem de uç değerler içeren dengeli bir veri yapısı sunduğunu göstermektedir. Veri setinde yer alan 50 malzemenin ağırlık dağılımları Şekil 3.3'te histogram grafiği ile sunulmuştur. Grafik, malzemelerin ağırlıklarının hangi aralıklarda yoğunlaştığını görsel olarak göstermektedir.



Şekil 3.3: Malzemelerin ağırlık dağılımlarının grafiği

Dağılım incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmaktadır:

- 500-1000 kg aralığında yalnızca 3 malzeme bulunmaktadır. Bu durum, düşük ağırlıklı malzemelerin veri setinde sınırlı sayıda olduğunu göstermektedir.
- 1000-1490 kg aralığında ise 23 malzeme yer almakta olup, bu aralık veri setinde en yoğun grubu oluşturmaktadır. Malzemelerin yaklaşık yarısı bu ağırlık aralığında toplanmıştır.
- 1500-2000 kg aralığında 17 malzeme bulunmaktadır. Bu da veri setinde ikinci en yoğun grubu temsil etmektedir.
- 2000-2500 kg aralığında 5 malzeme,
- 2500-3000 kg aralığında 1 malzeme,
- 3000-3500 kg aralığında ise 1 malzeme yer almaktadır.

Bu dağılım, 40 malzemenin 1000-2000 kg arasında kümелendiğini, daha düşük ve daha yüksek ağırlıklardaki malzemelerin ise görece az sayıda olduğunu göstermektedir.

Veri setinde yer alan malzemelerin ağırlıkları ayrıntılı olarak incelendiğinde, değerlerin 660 kg ile 3000 kg arasında değiştiği görülmektedir. Hesaplanan istatistiksel ölçütlere göre, malzemelerin ortalama ağırlığı 1548,48 kg olarak bulunmuştur. Bu ortalama değer üzerinde ve altında farklı sayıda malzeme bulunmakta olup, medyan ağırlık değeri 1404 g'dır. Medyanın ortalamadan daha düşük çıkması, dağılımın sağa çarpık olduğunu ve yüksek ağırlıklı birkaç malzemenin ortalamayı yukarı çektiğini göstermektedir.

Buna ek olarak, malzemelerin ağırlıklarındaki farklılığı gösteren standart sapma 483,33 g olarak hesaplanmıştır. Bu değer, veri setindeki malzemelerin büyük çoğunluğunun ortalama etrafında toplandığını, ancak belirli sayıda daha yüksek ağırlıklı malzemenin dağılımda çeşitlilik yarattığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, malzeme ağırlıkları bakımından veri setinin orta segmentte yoğunlaştığı, ancak aynı zamanda daha düşük ve daha yüksek ağırlıklarda da malzemeler içerdiği söylenebilir. Bu durum, modelin ağırlık kısıtlarını test etmesi açısından uygun bir çeşitlilik sunmaktadır.

3.3.3 Çözüm sonuçları

Geliştirilen MILP modeli, Intel Core i5-12450H işlemciye, 32 GB RAM'e sahip ve Windows 11 işletim sistemiyle çalışan bir bilgisayarda Gurobi Optimizer 12.0.1 optimizasyon çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Modelin çözüm süresi 57,17 saniye (sn) olarak hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonu değeri ise 1 olarak bulunmuştur. Amaç fonksiyonuna geçilmeden önce ağırlık bazlı teorik lokasyon sayısı Denklem (3.1) yardımıyla 8 ve yükseklik bazlı teorik lokasyon sayısı Denklem (3.2) yardımıyla 9 olarak bulunmuştur. Denklem (3.3)'e verilen denklem yardımıyla P değeri 9 olarak hesaplanmıştır. $\sum_j Z_j$ değeri 9 olarak hesaplanmış ve Denklem (3.4)'te tanımlan amaç fonksiyonu değeri bu durumda 1 olarak hesaplanmıştır. 50 malzemenin lokasyonlara atanması sonucunda yerleşim bilgileri Tablo 3.3'te sunulmuştur.

Tablo 3.3: Malzemelerin yerleşim bilgileri

Lokasyon (j)	Malzeme (i)	Kat (k)	Geliş Sırası (r)	Yükseklik (h _i)	Ağırlık (w _i)	Malzeme Grubu(g)
1	47	1	5	182	2184	A
	49	2	5	152	1824	A
	43	3	5	112	1344	A
	32	4	4	102	1224	A
	31	5	4	102	1224	A
2	1	1	1	250	3000	A
	6	2	1	142	1704	A
	7	3	1	112	1344	A
	12	4	2	77	924	A
3	3	1	1	152	1824	A
	21	2	3	142	1704	A
	41	3	5	112	1344	A
	44	4	5	112	1344	A
	30	5	4	112	1344	A
4	9	1	2	182	2184	B
	10	2	2	162	1944	B
	15	3	2	152	1824	B
	16	4	2	112	1344	B
	33	5	4	93	1116	B
	28	6	3	89	1068	B
5	46	1	5	93	1116	B
	37	2	4	89	1068	B
	23	3	3	89	1068	B
	40	4	4	89	1068	B
	38	5	4	89	1068	B
	34	6	4	93	1116	B
	22	7	3	89	1068	B
	39	8	4	89	1068	B
6	24	1	3	162	1944	A
	48	2	5	162	1944	A
	29	3	4	142	1704	A
	20	4	3	142	1704	A
	17	5	2	101	1212	A
	8	6	1	55	660	A
7	5	1	1	152	1824	A
	50	2	5	152	1824	A
	36	3	4	142	1704	A
	26	4	3	132	1584	A
	27	5	3	122	1464	A
	13	6	2	77	924	A

Tablo 3.3:(devam)

8	4	1	1	182	2184	A
	14	2	2	182	2184	A
	19	3	3	182	2184	A
	18	4	2	101	1212	A
	45	5	5	102	1224	A
9	2	1	1	243	2916	A
	11	2	2	152	1824	A
	35	3	4	142	1704	A
	25	4	3	142	1704	A
	42	5	5	112	1344	A

Tablo 3.3'te görüldüğü üzere, toplam 50 malzeme başarıyla lokasyonlara atanmıştır. Atama işlemleri sonucunda:

- Denklem (3.8)'de tanımlanan kısıt ile toplam ağırlık 10.000 kilogramlık kapasite sınırını aşmamıştır.
- Denklem (3.5)'te tanımlanan kısıt ile toplam yükseklikler 800 cm'lik güvenlik limitleri içerisinde kalmıştır.
- Denklem (3.6)'da tanımlanan kısıt ile malzemelerin geliş sıraları dikkate alınmış ve erken gelen malzemelerin alta, geç gelenlerin üste yerleştirilmesi sağlanmıştır. Bu kısıtta kullanılan λ parametresi 1 olarak belirlenmiştir. Bu parametre ile geliş sırasında 1 sıra esneklik malzemelerin yerleşiminde kombinasyon sayısı artırılmıştır ve çözüm uzayını genişletmiştir. Örneğin 1 numaralı lokasyona yapılan atamalarda dördüncü ve beşinci katlara atanan malzemelerin geliş sırası; birinci, ikinci ve üçüncü katlara atanan malzemelerin geliş sıralarından daha küçüktür. λ parametresi olmadığı durumda (veya $\lambda = 0$ olması durumunda) bu atama yapılamazdı. Fakat λ parametresinin 1 olarak belirlenmiş olması geliş sıraları arasında 1 sıra farka kadar müsaade edilmesini sağlar.
- Denklem (3.7)'de verilen malzemelerin ağırlıklarına göre katlara yerleştirilmesi kısıtı başarıyla uygulanmış, daha ağır malzemelerin hafif olanların üzerine gelmesi engellenmiştir. Ayrıca, modele tanımlanan 100 birimlik esneklik parametresi doğru çalışmış ve modelin daha rahat çalışmasını sağlamıştır.
- Denklem (3.15)'te tanımlanan kısıt sayesinde malzemeler yalnızca güvenli kabul edilen yüksekliklere yerleştirilmiştir. Malzemenin yerleştirilmesi sırasındaki lokasyon ve katın güncel yüksekliği Denklem (3.14) kısıtı ile hesaplanmıştır.

- Denklem (3.16) ve Denklem (3.17)'de tanımlanan kısıtlar sayesinde malzemeler sadece kendi malzeme grubunda bulunan malzemeler ile aynı lokasyona atanması sağlanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, modelin tüm operasyonel, fiziksel ve güvenlik kısıtlarını yerine getirdiğini göstermektedir. Lokasyonların yerleşim sonrası bilgileri Tablo 3.4'te sunulmuştur.

Tablo 3.4: Lokasyonların yerleşim sonrası bilgileri

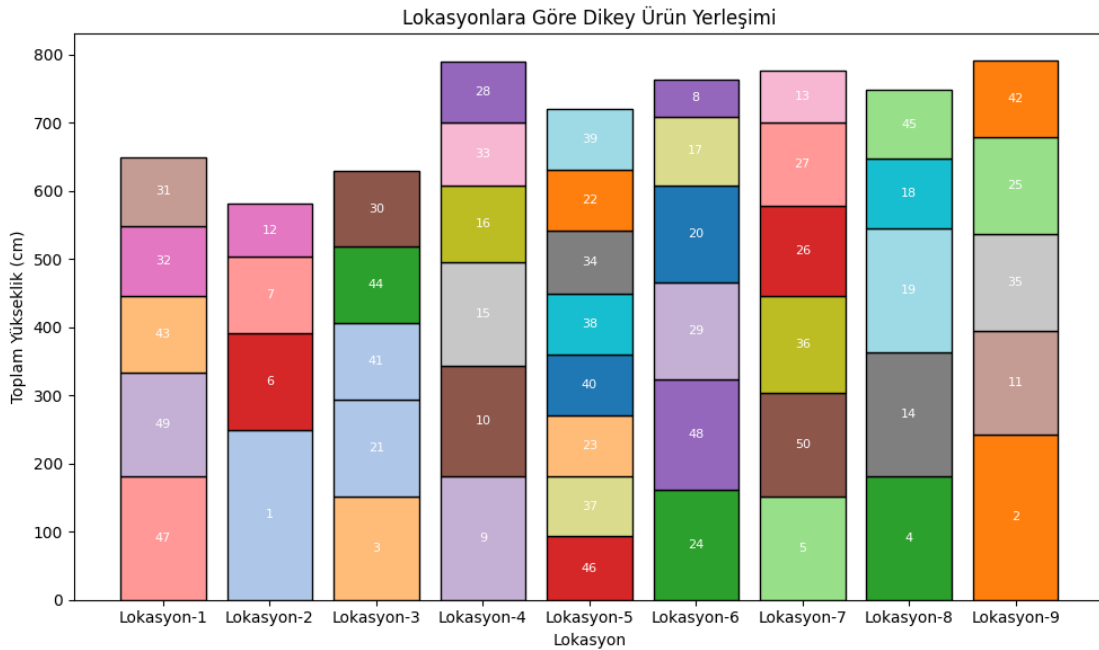
Lokasyon(<i>i</i>)	Atanan Malzeme Sayısı	Toplam Yükseklik	Toplam Ağırlık
1	5	650	7800
2	4	581	6972
3	5	630	7560
4	6	790	9480
5	8	720	8640
6	6	764	9168
7	6	777	9324
8	5	749	8988
9	5	791	9492
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Lokasyon bazlı inceleme Tablo 3.4'ten yola çıkarak yapıldığında:

- 15 lokasyondan yalnızca 9 tanesi kullanılmış ve geri kalan 6 lokasyon boş kalmıştır.
- Kullanılan lokasyonlarda malzeme sayıları 4 ile 8 arasında değişmektedir.
- En fazla malzeme ataması 8 malzeme ile Lokasyon 5'te gerçekleştirilmiştir.
- Ağırlık açısından en yoğun lokasyon 9492 kg ağırlık ile 9. lokasyon olmuştur ve sınır değer olan 10000 kg ağırlığa çok yakın bir atama gerçekleştirilmiştir.
- Yükseklik açısından en yüksek istifleme ise 791 cm ile Lokasyon 9 olmuştur ve sınır değer olan 800 cm' ye oldukça yakın şekilde gerçekleşmiştir.
- Yükseklik ve ağırlık açısından en düşük kullanım Lokasyon 2'de gerçekleştirilmiştir. Lokasyon 2 de atanan toplam yükseklik 581 cm'dir ve yükseklik sınırına 219 cm uzaktır. Ağırlık açısından bakıldığında 6972 kg ağırlık kullanılmıştır ve ağırlık sınırına 3028 birim ağırlık uzak kalmıştır.

- Bu sonuçlar, modelin depo kapasitesini maksimum seviyede kullanılıp aynı zamanda güvenli sınırlar içinde kullandığını kanıtlamaktadır.

Malzemelerin lokasyonlara atanması sonucunda oluşan yerleşim aşağıda görsel olarak verilmiştir. Şekil 3.4 modelin ürettiği çözümü daha anlaşılır kılmak amacıyla hazırlanmıştır. Grafikte her lokasyon için malzemelerin hangi katlara yerleştirildiği ve toplam yüksekliklerin nasıl oluştuğu açıkça görülmektedir.



Şekil 3.4: Malzemelerin yerleşimi

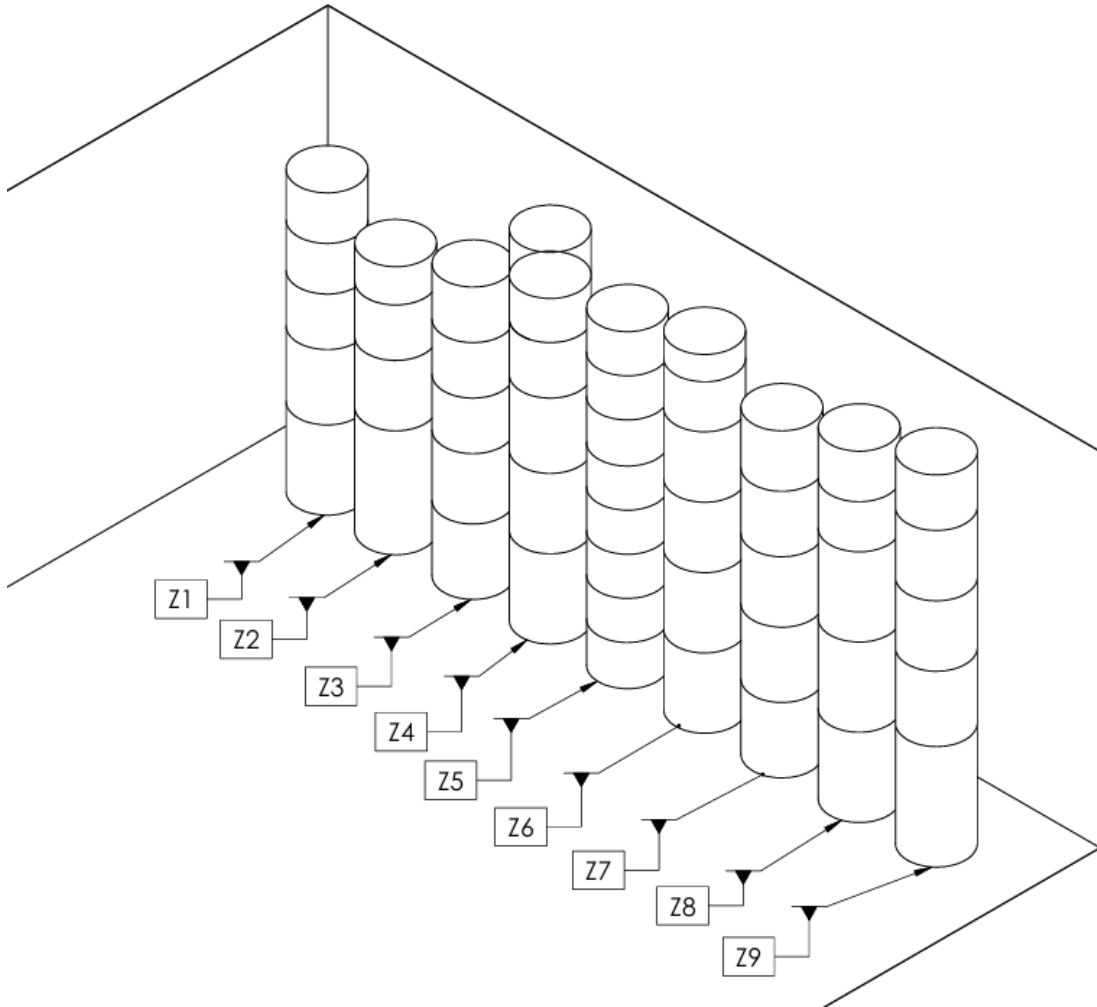
Şekil 3.4, problemin gerçek hayatta uygulanabilirliğinde yardımcı bir eleman olarak kullanılabilir.

- Katmanlar, malzemelerin üst üste istiflenme sırasını göstermektedir.
- Görsel incelendiğinde, tüm lokasyonlarda istifleme düzeninin kurallara uygun şekilde yapıldığı görülmektedir.

Bu grafik, teorik modelin çıktılarının uygulamada nasıl bir yerleşime dönüştüğünü göstermesi açısından büyük önem taşır. Hem depo yöneticileri hem de karar vericiler için somut bir görsel sonuç sunmaktadır.

Şekil 3.5'te malzemelerin lokasyonlara atanması sonrasında deponun bir görseli teknik resim yardımıyla gösterilmiştir. Malzemelerin atandığı lokasyonlar Z1, Z2, Z3 biçiminde gösterilmiştir. Atama yapılmayan lokasyonlar çizimde gösterilmemiştir. Şekil 3.5'te görülen

alan deponun temsili olarak bir bölümüdür. Bu görsel sayesinde, model sonucunda elde edilen yerleşim planının üç boyutlu bir bakış açısıyla nasıl bir dağılım oluşturduğu daha net bir şekilde görülebilmektedir. Gerçek hayatta uygulanabilirliği açısından yol gösterici olması beklenmektedir. Ayrıca, her bir lokasyonda istiflenen rulo malzemelerin özelliklerine göre oluşturulan düzen açık bir biçimde ortaya konmaktadır. Bu teknik resim, hem geliştirilen matematiksel modelin pratikte nasıl bir yerleşim yapısı öngördüğünü göstermesi hem de depo alanının kullanım verimliliğine ilişkin iyileştirmelerin görsel olarak değerlendirilmesini sağlaması açısından önemlidir. Böylece karar vericiler, istif yoğunluğu, lokasyon bazlı doluluk oranları ve yerleşim düzeninin operasyonel faaliyetler üzerindeki etkisini daha kapsamlı şekilde analiz edebilmektedir.



Şekil 3.5: Depo yerleşimi teknik resmi

Sonuçlar, geliştirilen modelin depo yerleşim problemini gerçek hayat verilerine dayalı kısıtlar altında başarılı bir şekilde çözebildiğini göstermektedir. Model yalnızca lokasyon kullanım verimliliğini maksimize etmekle kalmamış, aynı zamanda:

- Depolama güvenliğini sağlamış,
- Ağırlık ve yükseklik sınırlarına uymuş,
- Malzemelerin geliş sıralarını gözetmiş,
- Grup bazlı homojenliği korumuştur.

Dolayısıyla elde edilen çözüm hem akademik açıdan modelin geçerliliğini hem de uygulama açısından pratik kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde matematiksel model bölümünde tanıtılan MILP modeli farklı malzeme sayısı, lokasyon sayısı ve malzeme grubu olan veri setleri kullanılarak farklı problemlerde, Intel Core i5-12450H işlemciye, 32 GB RAM'e sahip ve Windows 11 işletim sistemiyle çalışan bir bilgisayarda Gurobi Optimizer 12.0.1 optimizasyon çözücüsü kullanılarak çözülmüştür.

4.1. Küçük ve Orta Boyutlu Problemler

Amaç, küçük ve orta boyuttaki veri setleri için modelin farklı büyüklüklerdeki problem örneklerinde nasıl davrandığını görmek ve çözüm performansını değerlendirmektir. Tablo 4.1'de görüldüğü üzere problemlerde malzeme sayısı 20, 30, 40, 50, 55 ve 60 olarak; lokasyon sayısı ise 5, 10, 15 ve 20 olarak değiştirilmiştir. Tüm problemlerde malzeme grubu sayısı 2 olarak sabit tutulmuştur. Ω parametresi bu problemlerde 100 kg olarak belirlenmiştir. Sıra kısıtına esneklik sağlamak için kullanılan λ parametresi ise bu problemlerde 1 olarak belirlenmiştir. Aynı malzeme sayısına ait ve lokasyon sayısı farklı olan problemlerde malzemeler değiştirilmemiştir, bu şekilde lokasyon sayısının çalışma hızına etkisi de incelenebilmiştir. Problemlerin veri setleri Ek 1'de verilmiştir. Farklı problemler denenmesi ile farklı problem boyutlarının hem amaç fonksiyonu değeri hem de hesaplama süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tablo 4.1: Küçük ve orta boyutlu problemlerin özellikleri

Problem	Özellik	Malzemelerin Toplam Ağırlığı	Malzemelerin Toplam Yüksekliği	Malzeme Grubu Sayısı
1	20 Malzeme, 5 Lokasyon	34920	2910	2
2	20 Malzeme, 10 Lokasyon	34920	2910	2
3	30 Malzeme, 10 Lokasyon	49572	4131	2
4	30 Malzeme, 15 Lokasyon	49572	4131	2
5	40 Malzeme, 10 Lokasyon	61932	5161	2
6	40 Malzeme, 15 Lokasyon	61932	5161	2
7	50 Malzeme, 10 Lokasyon	77424	6452	2
8	50 Malzeme, 15 Lokasyon	77424	6452	2
9	55 Malzeme, 15 Lokasyon	83556	6963	2
10	55 Malzeme, 20 Lokasyon	83556	6963	2
11	60 Malzeme, 17 Lokasyon	89292	7441	2
12	60 Malzeme, 20 Lokasyon	89292	7441	2

12 farklı problemin çözüm sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir. Her problemin detaylı çözüm sonuçları Ek 2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Küçük ve orta boyutlu problemlerin çözüm sonrası verileri

Problem	Açıklama	Ortalama Yükseklik	Ortalama Ağırlık	Teorik Lokasyon Sayısı (P)	Açılan Lokasyon Sayısı ($\sum_j Z_j$)	Z	Çözüm Süresi (sn)
1	20 Malzeme, 5 Lokasyon	727,5	8730	4	4	1	1,09
2	20 Malzeme, 10 Lokasyon	727,5	8730	4	4	1	2,76
3	30 Malzeme, 10 Lokasyon	590,14	7081	6	7	0,857	7,81
4	30 Malzeme, 15 Lokasyon	590,14	7081	6	7	0,857	11,81
5	40 Malzeme, 10 Lokasyon	737,28	8847	7	7	1	10,96
6	40 Malzeme, 15 Lokasyon	737,28	8847	7	7	1	24,44
7	50 Malzeme, 10 Lokasyon	716,88	8602.66	9	9	1	17,87
8	50 Malzeme, 15 Lokasyon	716,88	8602.66	9	9	1	42,77
9	55 Malzeme, 15 Lokasyon	696,3	8355.6	9	10	0,9	91,32
10	55 Malzeme, 20 Lokasyon	696,3	8355.6	9	10	0,9	136,98
11	60 Malzeme, 17 Lokasyon	676,45	8117,45	10	11	0,9	104,94
12	60 Malzeme, 20 Lokasyon	676,45	8117,45	10	11	0,9	155,47

Tablo 4.2’de görüldüğü üzere:

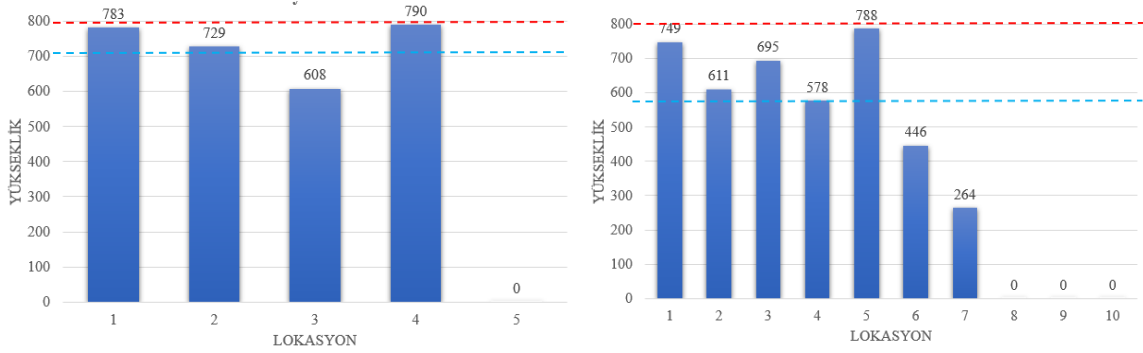
- Malzeme sayısı ve lokasyon sayısı arttıkça, açılan lokasyon sayısının arttığı gözlemlenmiştir.
- Özellikle 55 malzeme ve 20 lokasyon içeren problemde açılan lokasyon sayısı 10, amaç fonksiyonu 0,9, çözüm süresi ise 136,98 sn olmuştur. Bu sonuç, problem boyutu büyüdükçe hesaplama yükünün de arttığını göstermektedir.
- Ortalama yükseklik değerleri incelendiğinde, daha az lokasyon kullanıldığında malzemelerin daha yüksek istiflendiği, lokasyon sayısı arttıkça ise yüksekliklerin daha dengeli dağıldığı görülmektedir.
- Ortalama ağırlık değerleri problemler arasında benzer kalmış, ancak lokasyon kullanım yoğunluğuna bağlı olarak bazı lokasyonlarda kapasite sınırına yaklaşmıştır.

- Malzemelerin gruplarına ve çeşitlerine göre verimliliği değişkenlik göstermektedir.

4.1.1 Lokasyonların yükseklik dağılımı

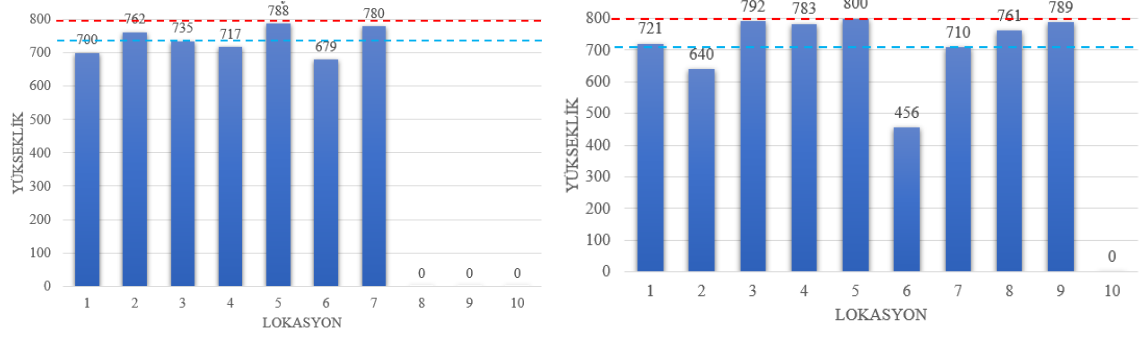
Problemlerin çözümleri sonucunda lokasyonlara atanan malzemelerin lokasyondaki yükseklik grafikleri oluşturulmuştur. Kırmızı çizgi yükseklik sınırını, mavi çizgi ise ortalama yüksekliği ifade etmektedir.

Şekil 4.1’de sunulan grafikler Problem 1 ve Problem 3 için yapılan atamalar sonucunda her bir lokasyonun kullanılan yüksekliği verilmiştir. Problem 1’de toplam 4 lokasyona atama yapılmıştır. 1 ve 4 numaralı lokasyonlar yükseklik sınırına çok yakındır. Problem 1 yükseklik bakımından dengeli bir dağılıma sahiptir. Problem 3’te toplamda 7 lokasyon açılmıştır. 1 ve 5 numaralı lokasyonlarda yükseklik sınırına yakın atamalar yapılmıştır. Özellikle 6 ve 7 numaralı lokasyonlar yükseklik sınırına uzak kalmıştır.



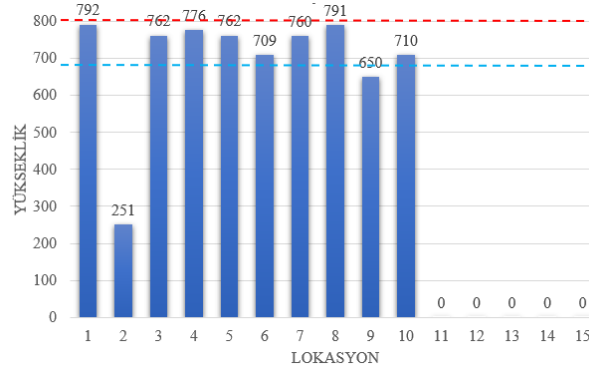
Şekil 4.1: Problem 1 ve Problem 3’ün yükseklik dağılımları

Şekil 4.2’de Problem 5 ve Problem 7’nin yükseklik dağılımları verilmiştir. Problem 5’te toplam 7 lokasyona atama yapılmıştır. Yapılan atamalardan özellikle 5 ve 7 numaralı lokasyonlar yükseklik sınırına çok yakındır. Problem 5 yükseklik bakımından dengeli bir şekilde atama yapılmıştır. Problem 7’de toplam 9 lokasyona atama yapılmıştır. 6 numaralı lokasyon yükseklik sınırına çok uzakken 3, 4, 5, 8 ve 9 numaralı lokasyonlar yükseklik sınırına çok yakındır. Özellikle 5 numaralı lokasyonda yükseklik sınırı tamamen kullanılmıştır. Problem 7 yükseklik bakımından 6 numaralı lokasyon dışında dengeli bir atama yapılmıştır.



Şekil 4.2: Problem 5 ve Problem 7'nin yükseklik dağılımları

Şekil 4.3'te toplamda 10 lokasyon kullanılmıştır. Kullanılan lokasyonlardan 2 numaralı lokasyon yükseklik sınırına uzakken 1, 3, 4, 5, 7 ve 8 numaralı lokasyonlarda yükseklik sınırına çok yakın atama yapılmıştır. Problem 9 yükseklik bakımında dengeli sayılabilecek bir şekilde atama yapılmıştır.

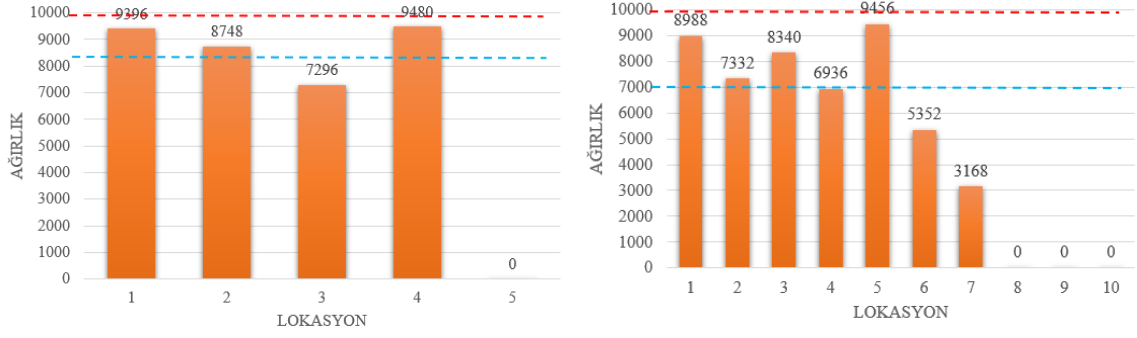


Şekil 4.3: Problem 9'un yükseklik dağılımı

4.1.2 Lokasyonların ağırlık dağılımı

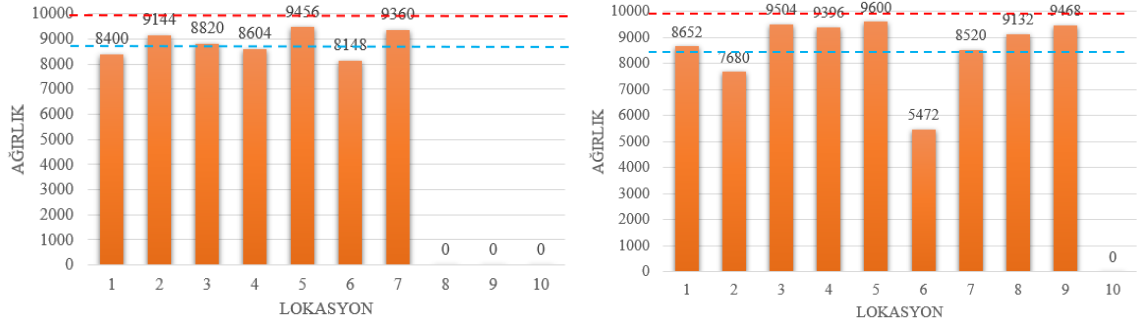
Problemlerin çözümleri sonucunda lokasyonlara atanan malzemelerin ağırlık toplamalarının dağılımları grafikler yardımıyla gösterilmiştir. Kırmızı çizgi ağırlık sınırını mavi çizgi ise lokasyonlardaki ortalama ağırlığı ifade etmektedir.

Şekil 4.4'te Problem 1 ve Problem 3 için ağırlık dağılımları verilmiştir. Problem 1'de 4 lokasyona atama yapılmıştır. 1 ve 4 numaralı lokasyonlar ağırlık sınırına çok yakındır. 2 numaralı lokasyon ortalamanın üzerinde kalırken 3 numaralı lokasyon ağırlık sınırına biraz uzak kalmıştır. Problem 1 için ağırlık dağılımı açısından atamalar dengeli bir şekilde yapılmıştır. Problem 3'te toplam 7 lokasyona atama yapılmıştır. Yapılan atamalardan 1,3 ve 5 numaralı lokasyonlar ağırlık sınırına yakınken 6 ve 7 numaralı lokasyonlar ağırlık sınırına uzak kalmıştır. Problem 3' de ağırlık bakımından dengeli bir atama yapılmamıştır.



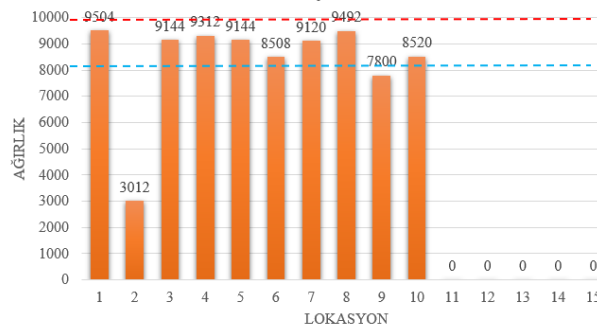
Şekil 4.4: Problem 1 ve Problem 3'ün ağırlık dağılımları

Şekil 4.5'te Problem 5 ve Problem 7 için ağırlık dağılımları grafiği sunulmuştur. Problem 5 için toplam 7 lokasyona atama yapılmıştır. Yapılan atamalarda özellikle 2, 5 ve 7 numaralı lokasyonlar ağırlık sınırına çok yakındır. Ağırlık dağılımı olarak Problem 5 dengeli bir atama yapmıştır. Problem 7 için 9 lokasyona atama yapılmıştır. Yapılan atamalarda 6 numaralı lokasyon ağırlık sınırının çok uzağında kalmıştır. 6 numaralı lokasyon dışında Problem 7 ağırlık bakımından dengeli bir atama yapılmıştır.



Şekil 4.5: Problem 5 ve Problem 7'nin ağırlık dağılımları

Şekil 4.6'da Problem 9 için toplam 10 lokasyon kullanılmıştır. Yapılan atamalarda 2 numaralı lokasyon ağırlık sınırına uzak kalmıştır. Bunun dışında ağırlık bakımından atamalar dengeli bir şekilde yapılmıştır.



Şekil 4.6: Problem 9'un ağırlık dağılımı

4.2. Büyük Boyutlu Problemler

Önceki bölümde gerçekleştirilen testler daha kısa sürede ve daha küçük veri setlerinden oluşmaktadır. Bu bölümde amaç, büyük boyuttaki veri setleri için modelin farklı büyüklüklerdeki problem örneklerinde nasıl davrandığını görmek, modelin sınırlarını çizebilmek ve çözüm performansını değerlendirmektir. Büyük veri setleri ile ilgili toplamda 66 adet Problem uygulanmıştır. Uygulanan problemler Gurobi Optimizer uygulamasında toplam 70 saat çalışmıştır. Çözümler sırasında Gurobi Optimizer programının çalışma süresi 6000 sn olarak sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırmanın sebebi problemin çözümü 6000 sn sınırına kadar çözülmez ise ulaştığı en iyi çözümü bize sunmasını sağlamaktır. Bazı problemlerde bu sınırı teknik nedenlerden aşmalar olmuştur.

Tablo 4.3'te görüldüğü üzere problemlerde malzeme sayısı 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 ve 100 olarak, lokasyon sayısı 15, 17 ve 20 olarak, malzeme grubu ise iki, üç ve dört olarak değiştirilmiştir. Denklem (3.7)'de tanımlanan malzemelerin kendinden hafif olan malzemelerin üst katına atanmasını engelleyen kısıta esneklik sağlamak için kullanılan Ω parametresi 66 problemde de 100 kg olarak belirlenmiştir. Denklem (3.6)'da verilen sıra kısıtına esneklik sağlamak için kullanılan λ parametresi ise bu problemlerde 1 olarak belirlenmiştir. Aynı malzeme sayısı ve malzeme grubuna sahip problemlerde lokasyon sayısının etkisini anlayabilmek amacıyla malzeme özellikleri sabit tutulmuştur. Bu durumlar dışında malzeme özellikleri her problemde farklı alınmıştır. Küçük ve orta boyuttaki problemlerden farklı olarak büyük boyutlu problemlerde malzeme gruplarının sayıları artırılarak probleme etkileri inceleme fırsatı sunmaktadır. Problemlerin veri setleri EK C'de verilmiştir.

Tablo 4.3: Büyük boyutlu problemlerin özellikleri

Problem	Malzeme S.	Lokasyon S.	Malzeme Grubu Sayısı	M. Toplam Ağırlığı	M. Toplam Yüksekliği
1	65	15	2	97884	8157
2	65	17	2	97884	8157
3	65	20	2	97884	8157
4	65	15	3	99612	8301
5	65	17	3	99612	8301
6	65	20	3	99612	8301
7	65	15	4	86088	7124
8	65	17	4	86088	7124
9	65	20	4	86088	7124
10	70	15	2	107004	8917
11	70	17	2	107004	8917
12	70	20	2	107004	8917
13	70	15	3	105228	8769
14	70	17	3	105228	8769
15	70	20	3	105228	8769
16	70	15	4	96900	8075
17	70	17	4	96900	8075
18	70	20	4	96900	8075
19	75	15	2	112236	9353
20	75	17	2	112236	9353
21	75	20	2	112236	9353
22	75	15	3	114180	9515
23	75	17	3	114180	9515
24	75	20	3	114180	9515
25	75	15	4	105084	8757
26	75	17	4	105084	8757
27	75	20	4	105084	8757
28	80	15	2	119196	9933
29	80	17	2	119196	9933
30	80	20	2	119196	9933
31	80	15	3	118296	9858
32	80	17	3	118296	9858
33	80	20	3	118296	9858
34	80	15	4	109836	9153
35	80	17	4	109836	9153
36	80	20	4	109836	9153
37	85	15	2	122760	10230
38	85	17	2	122760	10230
39	85	20	2	122760	10230
40	85	15	3	124572	10381
41	85	17	3	124572	10381
42	85	20	3	124572	10381
43	85	15	4	119268	9939
44	85	17	4	119268	9939
45	85	20	4	119268	9939
46	90	15	2	135804	11317
47	90	17	2	135804	11317
48	90	20	2	135804	11317
49	90	15	3	127968	10664
50	90	17	3	127968	10664
51	90	20	3	127968	10664
52	90	17	4	119424	9952
53	90	20	4	119424	9952
54	95	17	2	143352	11946
55	95	20	2	143352	11946
56	95	15	3	134292	11191
57	95	17	3	134292	11191
58	95	20	3	134292	11191

Tablo 4.3: (devam)

Problem	Malzeme S.	Lokasyon S.	Malzeme Grubu Sayısı	M. Toplam Ağırlığı	M. Toplam Yüksekliği
59	95	17	4	133812	11151
60	95	20	4	133812	11151
61	100	17	2	141828	11819
62	100	20	2	141828	11819
63	100	17	3	144300	12025
64	100	20	3	144300	12025
65	100	17	4	141828	11819
66	100	20	4	141828	11819

Tablo 4.4’te problemlere ait temel performans göstergelerini tanımlamak amacıyla çeşitli kısaltmalar kullanılmıştır. *PR* ilgili problemi ifade ederken, *MS* her bir problemde yer alan toplam malzeme sayısını göstermektedir. Depo düzeni ve kapasite gereksinimlerinin belirlenmesinde kritik olan *LS*, değerlendirmeye alınan lokasyon sayısını tanımlamaktadır. Malzeme çeşitliliğini yansıtan *MGS*, her bir problemde dikkate alınan malzeme grubu sayısını ifade etmektedir. Depolanacak malzemelerin fiziksel özelliklerini temsil eden *MTA* ve *MTY* ise sırasıyla malzemelerin toplam ağırlığı ve toplam yüksekliğini göstermektedir. Modelin teorik açıdan ihtiyaç duyduğu lokasyon gereksinimini belirleyen *TLS*, hesaplanan teorik lokasyon sayısını ifade ederken; uygulamada açılan ve modele tahsis edilen lokasyon miktarı *ALS* ile gösterilmiştir. Modelin performansını değerlendirmede kullanılan *AFD*, çözülen problemde elde edilen amaç fonksiyonu değerini temsil etmektedir. Çözümün hesaplanması için gerekli süreyi ifade eden *ÇS* ise ilgili problemin çözüm süresini göstermektedir. Tablo 4.4 içerisinde “*” işareti ise ilgili problemde geçerli bir çözümün bulunmadığını belirtmektedir. Büyük boyutlu veri setleri çözüm sonuçlarında toplam 66 farklı problem ele alınmıştır. Bu veri setlerinde 38 problemde optimum sonuç bulunmuştur. 26 problemde çözüm bulundu fakat optimal olup olmadığı doğrulanmadı. 2 problemde ise 6000 sn çözüm sınırı içerisinde herhangi bir sonuca ulaşılamamıştır.

Tablo 4.4: Büyük boyutlu problemlerin çözüm sonrası verileri

PR	MS	LS	MGS	MTA	MTY	TLS (P)	ALS ($\sum_j Z_j$)	AFD(Z)	GAP	ÇS
1	65	15	2	97884	8157	11	11	1	0	237,47
2	65	17	2	97884	8157	11	11	1	0	192,85
3	65	20	2	97884	8157	11	11	1	0	192,88
4	65	15	3	99612	8301	11	12	0,917	8,33	6000,4
5	65	17	3	99612	8301	11	12	0,917	0	793,46
6	65	20	3	99612	8301	11	12	0,917	0	2468,87
7	65	15	4	86088	7124	9	11	0,818	0	1151,35
8	65	17	4	86088	7124	9	11	0,818	0	1034,92
9	65	20	4	86088	7124	9	11	0,818	0	1401,05
10	70	15	2	107004	8917	12	12	1	0	482,77
11	70	17	2	107004	8917	12	12	1	0	435,66
12	70	20	2	107004	8917	12	12	1	0	477,23
13	70	15	3	105228	8769	11	12	0,917	0	1282,53
14	70	17	3	105228	8769	11	12	0,917	0	511,29
15	70	20	3	105228	8769	11	12	0,917	0	319,68
16	70	15	4	96900	8075	11	12	0,917	0	542,66
17	70	17	4	96900	8075	11	12	0,917	0	400,07
18	70	20	4	96900	8075	11	12	0,917	0	368,59
19	75	15	2	112236	9353	12	13	0,923	0	1191,68
20	75	17	2	112236	9353	12	13	0,923	0	735,86
21	75	20	2	112236	9353	12	13	0,923	0	1179,68
22	75	15	3	114180	9515	12	12	1	0	1937,09
23	75	17	3	114180	9515	12	12	1	0	10369,5
24	75	20	3	114180	9515	12	12	1	0	4653,52
25	75	15	4	105084	8757	11	13	0,846	0	6000,11
26	75	17	4	105084	8757	11	13	0,846	0	11566,9
27	75	20	4	105084	8757	11	13	0,846	0	6000,33
28	80	15	2	119196	9933	13	13	1	0	1241,27
29	80	17	2	119196	9933	13	13	1	0	1116
30	80	20	2	119196	9933	13	13	1	0	746,2
31	80	15	3	118296	9858	13	14	0,929	0	5668,82
32	80	17	3	118296	9858	13	14	0,929	7,14	3881,69
33	80	20	3	118296	9858	13	14	0,929	7,14	2078,49
34	80	15	4	109836	9153	12	14	0,857	14,28	6000,29
35	80	17	4	109836	9153	12	14	0,857	14,28	6000,3
36	80	20	4	109836	9153	12	14	0,857	14,28	6000,22
37	85	15	2	122760	10230	13	14	0,929	0	2183,41
38	85	17	2	122760	10230	13	14	0,929	0	2112,58
39	85	20	2	122760	10230	13	14	0,929	0	2353,19
40	85	15	3	124572	10381	13	15	0,867	13,3	6000,29
41	85	17	3	124572	10381	13	15	0,867	13,3	6001,01
42	85	20	3	124572	10381	13	15	0,867	13,3	6000,3
43	85	15	4	119268	9939	13	14	0,929	7,14	6000,39
44	85	17	4	119268	9939	13	14	0,929	7,14	6354,13
45	85	20	4	119268	9939	13	14	0,929	0	3349,82
46	90	15	2	135804	11317	15	15	1	0	476,89
47	90	17	2	135804	11317	15	15	1	0	2534,78
48	90	20	2	135804	11317	15	15	1	0	458,82
49	90	15	3	127968	10664	14	15	0,933	0	4489,55
50	90	17	3	127968	10664	14	15	0,933	6,66	6000,4

Tablo 4.4: (devam)

PR	MS	LS	MGS	MTA	MTY	TLS (P)	ALS ($\sum_j Z_j$)	AFD(Z)	GAP	ÇS
51	90	20	3	127968	10664	14	15	0,933	6,66	6000,77
52	90	17	4	119424	9952	13	15	0,867	13,33	6000,33
53	90	20	4	119424	9952	13	15	0,867	13,33	6000,39
54	95	17	2	143352	11946	15	17	0,882	11,76	10355,2
55	95	20	2	143352	11946	15	17	0,882	11,76	6000,3
56	95	15	3	134292	11191	14	*	*	*	6000,1
57	95	17	3	134292	11191	14	16	0,875	12,5	6000,05
58	95	20	3	134292	11191	14	16	0,875	12,5	11601,4
59	95	17	4	133812	11151	14	16	0,875	6,25	6000,54
60	95	20	4	133812	11151	14	16	0,875	11,8	7733,36
61	100	17	2	141828	11819	15	16	0,938	6,25	6000,33
62	100	20	2	141828	11819	15	16	0,938	6,25	6000,18
63	100	17	3	144300	12025	16	17	0,941	5,88	6000,47
64	100	20	3	144300	12025	16	17	0,941	5,88	6503,57
65	100	17	4	141828	11819	15	*	*	*	6000,09
66	100	20	4	141828	11819	15	16	0,938	6,25	6246,13

Tablo 4.4'te görüldüğü üzere:

- Lokasyon sayısı ve malzeme sayısı dışında malzeme grubu sayısının da değişmesi sonuçlara değişkenlik katmaktadır.
- 95 malzeme ve daha fazla olduğu durumlarda GAP değerinde sıfıra ulaşılamamıştır.
- Problem 56'da model 6000,1 sn çalıştırılmasına rağmen çözüm bulunamamıştır. Problem 57 ve Problem 58 ile aynı veri setine sahip olan Problem 56'da tek fark lokasyon sayısının 15 seçilmesidir. Lokasyon sayısı Problem 57 ve Problem 58'de 16 bulunmuştur. Bu veri setinin teorik lokasyon sayısının 15 olması ve GAP değerlerinin 12,5 olması nedeniyle 15 lokasyona yerleştirilip yerleştirilemeyeceği denenmiştir. Fakat Problem 56'da malzemeler 15 lokasyona yerleştirilememiştir ve süre içerisinde herhangi bir sonuca ulaşılamamıştır.
- Problem 65 de model 6000,09 sn çalışmasına karşın çözüme ulaşılamamıştır. Veri seti lokasyon sayısı hariç aynı olan Problem 66'da çözüme ulaşılmıştır ve 16 lokasyon açılmıştır. Problem 65'te lokasyon sayısı 17 olmasına rağmen uygun yerleşime çözüm süresi içerisinde ulaşılamamıştır.
- Geliştirilen problemlerde GAP değerleri genellikle 85 malzeme ve üstünde artış göstermeye başlamıştır. 85 ve 90 malzeme olan problemlerde GAP değeri sadece

malzeme grubu sayısı arttırıldığında oluşmaktadır. 95 ve 100 malzeme olan problemlerde ise GAP değeri mutlaka oluşmaktadır ve çözüm süresi sonuna kadar kullanılmaktadır.

- Toplam 66 problemin ortalama çözüm süresi 3868 olarak, çözüm sürelerinin standart sapması ise 3036,51 olarak hesaplanmıştır.
- Toplam 66 problemin ortalama GAP değeri 4,01 olarak hesaplanmıştır ve amaç fonksiyonu değerleri ortalama 0,92 olarak hesaplanmıştır.
- Yapılan testlerde veri boyutu büyüdükçe GAP değerlerinde ve çözüm sürelerinde ciddi artışlar olmaktadır. Buna rağmen amaç fonksiyonu değeri en düşük 0,81 olarak hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonu değeri en fazla bir olabileceği için problemlerin hiçbirinde amaç fonksiyonu belli bir seviyenin altına düşmediği anlaşılmaktadır.
- Malzeme sayısı 85-90, malzeme grubu sayısının üç veya üzerinde olduğu problemlerde çözüm sonucunun optimum olup olmadığı doğrulanamamaktadır. Aynı şekilde malzeme grubu sayısına bakılmaksızın malzeme sayısı 95'ten itibaren çözüm sonucunun optimum olup olmadığı doğrulanamamaktadır.

4.3 Performans

Geliştirilen matematiksel modelin küçük, orta ve büyük veri setlerindeki çözüme ulaşılan problemlerden elde edilen ortalama çözüm süreleri, ortalama GAP değerleri ve ortalama amaç fonksiyonu değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir. Çözüm sonucuna ulaşamayan problemler bu hesaplamalara katılmamıştır. Veri setlerinin boyutları malzeme sayılarına göre gruplandırılmıştır. Malzeme sayısı 40 ve 40'tan az ise küçük boyutlu, 40 ile 60 arasında ve 60 dahil ise orta boyutlu, 60'tan fazla ise büyük boyutlu problem olarak gruplandırılmıştır.

Tablo 4.5: Küçük, orta ve büyük boyuttaki problemlerin karşılaştırması

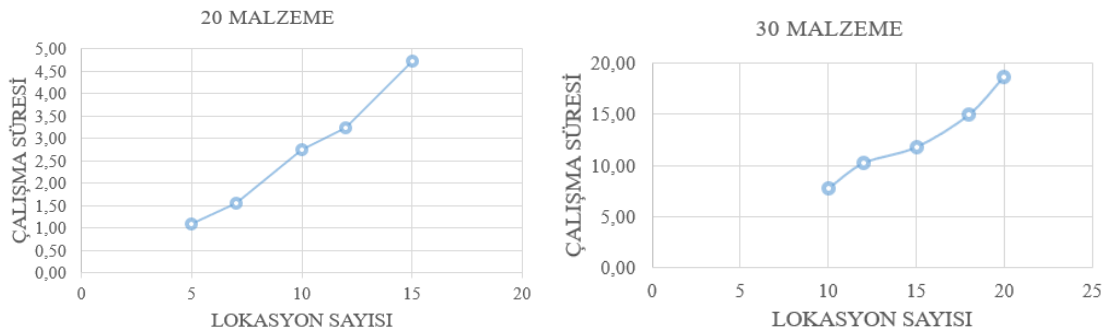
Grup	Ortalama Çözüm Süresi (sn)	Ortalama GAP (%)	Ortalama Amaç Fonksiyonu
Küçük	9,81	0	0,95
Orta	91,56	0	0,93
Büyük	3868	4,01	0,92

Tablo 4.5'te görüldüğü üzere veri setinin büyümesi ile çözüm süreleri doğru orantılı bir şekilde artış göstermektedir ve çözüm süresi büyük veri setinde ciddi şekilde artmıştır. Büyük veri setinde çözüm süresinin dramatik şekilde artması, modelin ölçeklenebilirlik sınırlarını göstermektedir. Bu durum özellikle MILP modellerinde beklenen bir sonuç olup, değişken ve kısıt sayısındaki doğrusal olmayan artışın çözüm performansını doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır. Bu bulgu, modelin küçük ve orta ölçekli uygulamalarda oldukça verimli çalıştığını, ancak büyük ölçeklere geçildiğinde daha güçlü çözüm stratejilerine ihtiyaç duyulabileceğini göstermektedir. Küçük ve orta boyuttaki veri setlerinde GAP değerinin %0 çıkması, optimal çözüme kesin olarak ulaşıldığını göstermektedir. Büyük veri setinde %4,01'lik GAP, modelin optimal çözüme yakın ancak tam optimal olmayabilecek bir çözüm bulunduğunu göstermektedir. Veri seti büyüdükçe çözüm kalitesi hafif düşmektedir fakat kabul edilebilir seviyesini korumaktadır. Büyük veri setinde amaç fonksiyonu değerinin çok az bir düşüş göstermesi, çözüm kalitesinin veri seti büyüdükçe bozulmadığını, aksine modelin büyük problemlerde bile tutarlı ve kabul edilebilir bir performans sergilediğini göstermektedir.

4.3.1 Küçük ve orta boyutlu problemlerin performansı

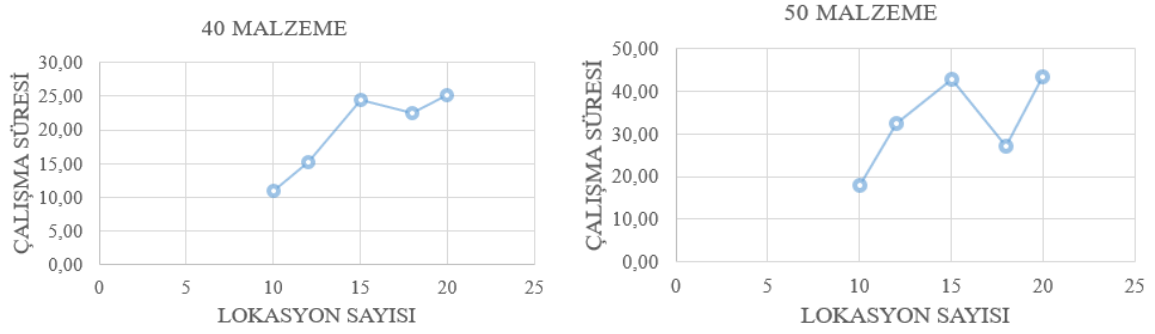
Küçük ve orta ölçekli örneklerde model oldukça verimli çalışmakta ve çözülebilirliğini korumaktadır. Problemin çözüm süresi lokasyon ve malzemelerin sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

20 malzeme ve 30 malzeme olan problemlerde modelin çalışma süresi Şekil 4.7'de görüldüğü üzere 20 sn aşmamaktadır.



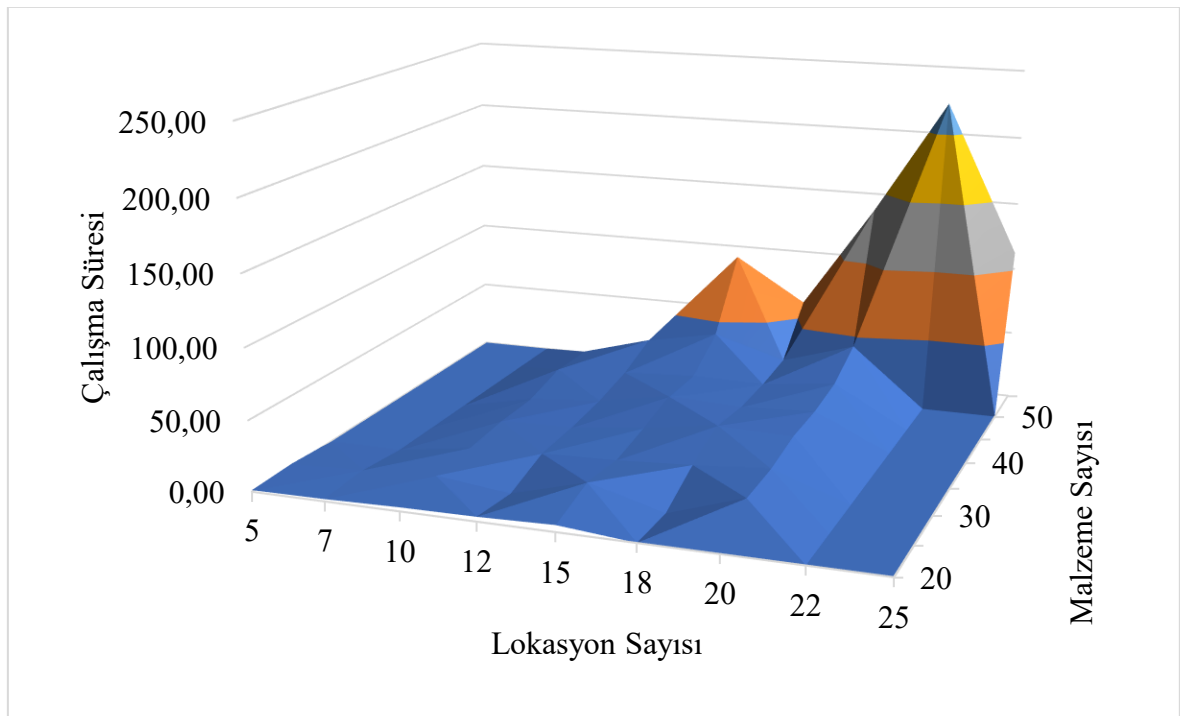
Şekil 4.7: 20 malzeme ve 30 malzeme için lokasyona göre çözüm süresi

Malzeme ve lokasyon sayısı arttıkça Şekil 4.8’de görüldüğü üzere çözüm süresi önemli ölçüde yükselmektedir. 20 lokasyon ve 50 malzeme gibi orta boyuttaki örneklerde çözüm süresi 50 sn yaklaşmaktadır. Özellikle 15 lokasyon ve 40 malzemedan sonra çözüm süresinde dikkat çekici artışlar gözlemlenmiştir; bu durum, modelin hesaplama yükünün kritik bir eşiği aştığını göstermektedir.



Şekil 4.8: 40 malzeme ve 50 malzeme için lokasyona göre çözüm süresi

Şekil 4.9’da sunulan grafik, malzeme ve lokasyon sayısındaki artışın modelin çözüm süresine etkisini göstermektedir. Özellikle 25 lokasyon ve 50 malzeme seviyesinde çözüm süreleri dramatik biçimde artmakta, bu da modelin hesaplama yükünün kritik eşiklere ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.9: Malzeme sayısı, lokasyon sayısı ve çözüm süresinin grafiği

Modelin çözüm hızını etkileyen en önemli iki kriter olan lokasyon sayısı ve malzeme sayısı için korelasyon katsayısı ve belirlilik katsayısı hesaplamaları yapılmıştır ve Tablo 4.6’’de sunulmuştur. Küçük ve orta boyutlu problemler için yapılan bu hesaplamalar sonucunda lokasyon sayısı ile çalışma hızı arasındaki korelasyon katsayısı 0,65 olarak, belirlilik katsayısı ise 0,43 olarak bulunmuştur. Bu sonuç doğrultusunda çalışma hızı lokasyon sayısına 0,43 oranında bağlı olduğunu göstermektedir. Malzeme sayısı ile çalışma hızı arasındaki korelasyon değeri ise 0,56 olarak, belirleme katsayısı ise 0,31 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç doğrultusunda çalışma hızı malzeme sayısına 0,31 oranında bağlı olduğu bulunmuştur. Son olarak yapılan malzeme sayısı ve lokasyon sayısı çarpımı ile çalışma hızı arasındaki korelasyon değeri ise 0,76 olarak hesaplanmış ve belirleme katsayısı ise 0,58 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç doğrultusunda çalışma hızı, malzeme sayısı ve lokasyon sayısı çarpımına 0,76 oranında bağlı olduğu saptanmıştır.

Tablo 4.6: Malzeme sayısı, lokasyon sayısı ile çözüm süresi arasındaki korelasyon

	Korelasyon Katsayısı	Belirleme Katsayısı (R^2)
Malzeme Sayısı- Çalışma Hızı	0,65659	0,43110
Lokasyon Sayısı- Çalışma Hızı	0,56225	0,31613
Malzeme Sayısı*Lokasyon Sayısı- Çalışma Hızı	0,76706	0,58839

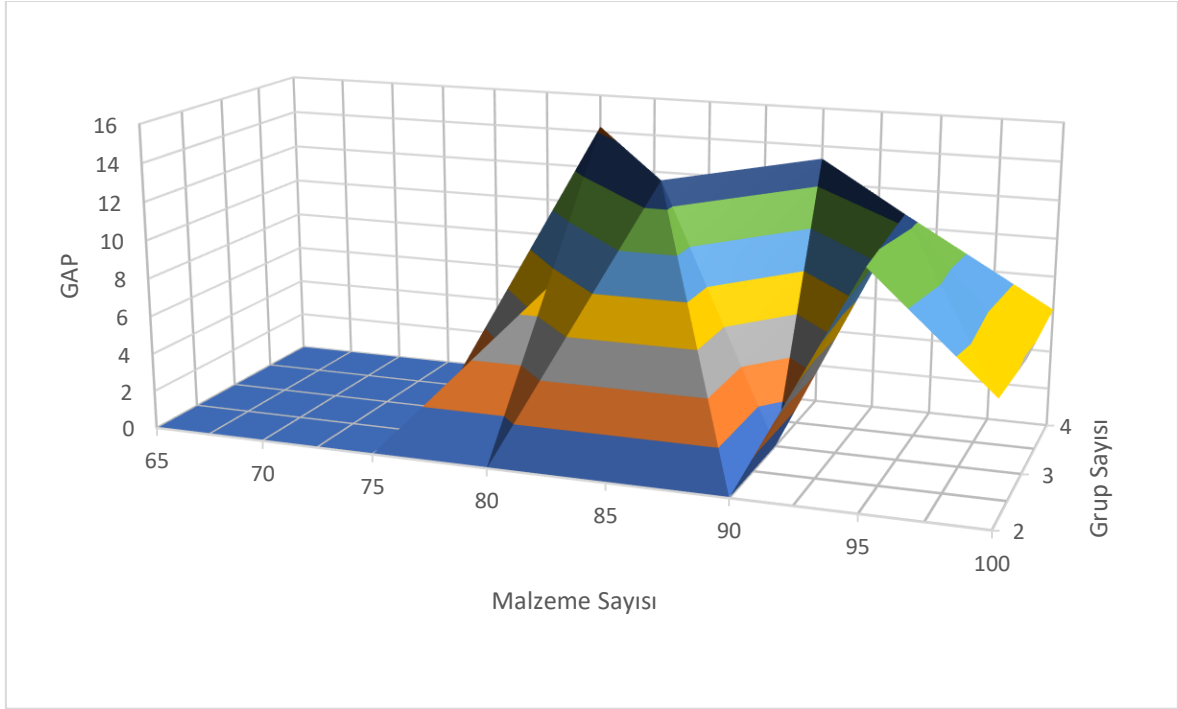
4.3.2 Büyük boyutlu problemlerin performansı

Büyük boyutlu veri setleri 65 malzeme ve üstündeki malzeme sayıları için geçerli olmaktadır. Bu çalışmalarda küçük ve orta boyutlu problemlerden farklı olarak malzeme grubu sayıları da çeşitlendirilerek 2, 3 ve 4 malzeme grubu olarak çeşitlendirilmiştir. Toplam 66 farklı problem denenmiştir ve bu problemlerin çalışma süreleri 190 sn ile 10000 sn arasında değişiklik göstermektedir.

Aşağıda sunulan grafikler yalnızca büyük veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneysel analizlere ait sonuçları göstermektedir. Bu grafikler, özellikle veri boyutunun yüksek olduğu durumlarda modelin performansını ve çözüm davranışını daha ayrıntılı şekilde inceleyebilmek amacıyla hazırlanmıştır.

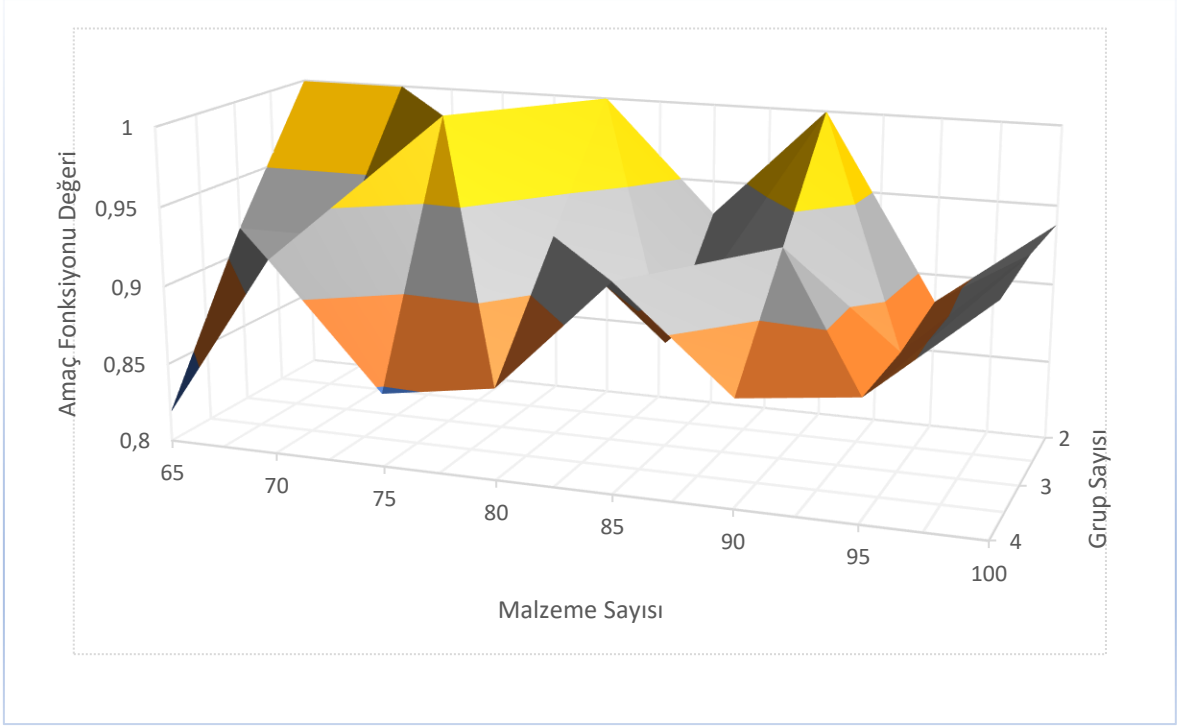
Şekil 4.10’da büyük veri setinde malzeme sayısının artışına bağlı olarak GAP değerlerinin nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Grafik incelendiğinde, belirli eşiklerden sonra GAP değerlerinde belirgin bir yükseliş olduğu, özellikle 80-90 aralığındaki malzeme sayılarını

takiben çözüm kalitesinin kısmen azaldığı görülmektedir. Bu durum, veri setinin büyüklüğü nedeniyle modelin GAP değerinin ciddi bir şekilde arttığı; artan kombinasyonel yapı ve karar uzayının genişlemesinin GAP değerlerini yukarı yönlü etkilediğini göstermektedir. GAP'ın zaman zaman 15-16 seviyelerine ulaşması, büyük ölçekli MILP problemlerinde Gurobi'nin optimalite toleransı dahilinde en iyi uygulanabilir çözümü verdiğini göstermektedir.



Şekil 4.10: Malzeme sayısı, grup sayısı ve GAP değerinin grafiği

Şekil 4.11'de yalnızca büyük veri setine ait amaç fonksiyonu değerlerinin değişimini göstermektedir. Amaç fonksiyonunda gözlenen dalgalanmalar oldukça sınırlıdır ve değerlerin 0,81-1 aralığında stabil kaldığı görülmektedir. Bu bulgu, GAP değerlerindeki artışa rağmen modelin çözüm kalitesinin büyük ölçüde korunduğunu ve üretilebilir çözümler arasında tatmin edici bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle malzeme sayısı orta seviyelerdeyken amaç fonksiyonu çıktılarının daha yüksek olması, büyük veri setinde dahi modelin belirli problemlerde oldukça etkili sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.



Şekil 4.11: Malzeme sayısı, grup sayısı ve amaç fonksiyonu değerinin grafiği

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen her iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, modelin büyük veri seti üzerinde çalışırken kararlı fakat hesaplama açısından zorlanan ve uzun süre alan bir yapıda olduğu sonucuna varılabilir. GAP değerleri kapsamında optimal çözüme yaklaşma gücü azalsa da amaç fonksiyonu değerlerinin kabul edilebilir seviyelerde kalması, modelin genel geçer performansının güçlü olduğunu göstermektedir. Bu durum, büyük ölçekli problemlerde çözüm süresi ve GAP azaltma hedefleri doğrultusunda daha hızlı bilgisayarlar, sezgisel yöntemler, ayrıştırma teknikleri veya hızlandırıcı algoritmaların eklenmesinin faydalı olabileceğine işaret etmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu tezde, kâğıt endüstrisinde faaliyet gösteren bir üretim işletmesinin mamul deposunun yerleşim planlamasına yönelik olarak bir çalışma yapılmıştır. İncelenen problemde mamul depodaki malzemeler rulo şeklindedir ve üst üste koyularak istiflenmektedir. Üst üste koyulacak malzemelerin doğru kombinasyonlar ile yerleştirilmesi ve depodaki alan verimliliğini arttırmak için bu tezde bir MILP modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile depo alanında gerçekleştirilen karmaşık istifleme, yerleştirme ve lokasyon tahsis kararlarının sistematik bir yaklaşımla ele alınmasını sağlamaktadır. Geliştirilen MILP modeli; malzemelerin ağırlık ve yükseklik gibi fiziksel boyutları, geliş sıraları, müşteri veya tedarikçi firmalara göre belirlenen malzeme grupları, her bir lokasyonun ağırlık ve yükseklik kapasitesi ve güvenli istifleme gibi çok boyutlu parametreleri dikkate alarak, depo alanının maksimum verimlilikle kullanılmasını amaçlayan bütünlük bir karar mekanizması ortaya koymaktadır. Modelin yapısı, depo yönetiminde rutin olarak karşılaşılan operasyonel belirsizlikleri ve kısıtları nicel bir çerçeveye oturtmakta; böylece hem alan kullanımının optimize edilmesi hem de istifleme güvenliğinin sağlanması açısından işletmeye stratejik bir avantaj kazandırması hedeflenmiştir. Model sonuçları, lokasyon kullanımının minimize edilmesiyle birlikte depo alanının daha kompakt, düzenli ve işlevsel bir yapıya kavuşturulması için bir alternatif gösterilmiştir. Güvenlik açısından, ağır malzemelerin hafif malzemelerin üzerine yerleştirilmesini engelleyen kısıtın yanı sıra, λ parametresi ile kontrollü ağırlık toleransı sayesinde modelin çözüm uzayında daha fazla alternatif oluşmuş, istifleme esneklikleri artırılmış ve bu sayede hem güvenlik koşulları sağlanmış hem de modelin yapısal esnekliği korunmuştur. Malzemelerin geliş sıralarının modele entegre edilmesi, zamana bağlı depo yönetiminin kritik bir bileşeni olarak değerlendirilmiştir. λ parametresi ile ifade edilen sıra esnekliği ile malzemelerin en fazla λ parametresi değeri kadar sıra gecikmeyle istiflenmesine izin verilerek operasyonel gerçeklik ile matematiksel model arasında uyum sağlanmıştır. Bu durum depoda akışkan bir yerleşim düzeninin oluşturulmasına katkıda bulunması hedeflenmiştir. Ayrıca malzemelerin sipariş verilen firmalara göre gruplandırılması, sevkiyat süreçlerinde yaşanabilecek karışıklık ve gecikmelerin önüne geçilmesini sağlamak; aynı firmaya ait malzemelerin aynı lokasyonlarda toplanmasıyla hem operasyonel hata riskleri azaltmak hem de sevkiyat planlamasında zaman tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır. Modelin çözümü için Gurobi Optimizer yazılımı kullanılmıştır. Örnek olarak alınan 50 malzemelik veri seti detaylı bir şekilde tanıtıldıktan sonra çözüm sonuçları detaylı olarak incelenmiştir. Örnek olarak alınan

50 malzemenin çözüm sonucunda yerleştiği lokasyonlar teknik resim üzerinden görselleştirilmiştir. Küçük ve orta ölçekli problemler üzerinden gerçekleştirilen analizlerde lokasyon atamaları, malzeme dağılımları, istifleme yükseklikleri ve ağırlık dağılımları grafiksel ve istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Çözüm sürelerinin belirleyicileri korelasyon katsayısı ve belirleme katsayısı (R^2) analizleri ile incelenmiştir. Büyük boyutlu veri setleri üzerinde test edilen toplam altmış altı problem ise modelin ölçeklenebilirliğini, hesaplama yükünü, GAP değerlerini ve amaç fonksiyonu performansına açıklık getirmiştir. Özellikle veri boyutunun artmasıyla modelin hesaplama sürelerinin nasıl değiştiği detaylı biçimde gözlemlenmiştir. Bulgular, modelin matematiksel doğruluk, performans kararlılığı, uygulanabilirlik ve hesaplama verimliliği açısından iyi sonuçlar verdiği ve gerçek zamanlı depo planlama süreçlerinde karar destek mekanizması olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Modelin, depo tasarımı ve yerleşim planlamasında kullanılan geleneksel yöntemlere kıyasla daha sistematik, esnek ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır. Çalışmanın hem endüstriyel uygulamalar hem de akademik literatür açısından yeni bir bakış açısı oluşturmuştur. Gelecek çalışmalar kapsamında, operatör erişim mesafeleri, forklift güzergâhları ve çok katmanlı depolama sistemleri gibi yeni kısıtların eklenmesi önerilmektedir. Bu problemde lokasyonlar boşken atama yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda mevcut işleyen bir yerleşim üzerinden problemler denenebilir. Gelecek çalışmalar için ihtiyaç duyulması halinde depolardaki mevcut malzemelerin yerleştirilmesi için sıra kısıtını devre dışı bırakarak depodaki malzemelerin yeniden yerleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca çok büyük boyutlu problemlerde çözüm süresinin artması ihtimaline karşı sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin (örneğin Genetik Algoritmalar, PSO, Tabu Arama, vb.) entegrasyonunun modelin hızını ve hesaplama etkinliğini geliştirebileceği düşünülmektedir. Bunlara ek olarak, modelin dinamik depo koşulları altında performansını değerlendirmeye yönelik simülasyon tabanlı hibrit yaklaşımların geliştirilmesi, modelin daha gerçekçi, esnek ve sürdürülebilir bir karar destek sistemi haline gelmesine katkı sağlayacaktır. Tüm bu yönleriyle çalışma, depo yönetimi süreçlerine bilimsel yeni bir bakış açısı kazandırmaktadır.

6. KAYNAKÇA

- Acar, P. d. d., Ateş, D. b. A.** (2011). Tedarik zinciri faaliyetlerinin maliyetleri ve dış kaynak kullanımı ilişkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16(3), 9-27.
- Akkaya, S. B., Gül, A., Coşkun, Z., Karaman, C., Öztop, H., Mullaoglu, G.** (2019). The distributor's pallet loading problem: A case study. *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018*, 937–948.
- Ekici, A.** (2023). A large neighborhood search algorithm and lower bounds for the variable-Sized bin packing problem with conflicts. *European Journal of Operational Research*, 308(3), 1007-1020.
- El-Ashmawi, W. H., Abd Elminaam, D. S.** (2019). A modified squirrel search algorithm based on improved best fit heuristic and operator strategy for bin packing problem. *Applied Soft Computing*, 82, 105565.
- Evinsel, C.** (2010). Depo tasarımı ve yerleşimi. *İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, 163s, İstanbul.
- Fernández-Pachas, R., Huang, J.** (2025) Automated warehouse layout design: A software application, International Conference on Industrial Engineering and Applications, Munich.
- Guerriero, F., Musmanno, R., Pisacane, O., Rende, F.** (2013). A mathematical model for the Multi-Levels Product Allocation Problem in a warehouse with compatibility constraints. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4385-4398.
- Gül, G., Erol, B., Öngelen, G., Eser, S., Çetinkaya, Ç., Özmutlu, H. C., Erhuy, C. G.** (2016). Ambar depolama maksimizasyonu. *Endüstri Mühendisliği*, 27(4), 26-38.
- Heragu, S. S., Du, L., Mantel, R. J., Schuur, P. C.** (2005). Mathematical model for warehouse design and product allocation. *International Journal of Production Research*, 43(2), 327-338.
- Horta, M., Coelho, F., Relvas, S.** (2016). Layout design modelling for a real world just-in-time warehouse. *Computers & industrial engineering*, 101, 1-9.
- Jafari Kang, M., Mobtahej, P., Sedaghat, A., Hamidi, M.** (2021). A soft optimization model to solve space allocation problems in breakbulk terminals. Munich Personal RePEc Archive, 111372.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kordos, M., Boryczko, J., Blachnik, M., Golak, S.** (2020). Optimization of warehouse operations with genetic algorithms. *Applied sciences*, 10(14), 4817.
- Kostas, A.** (2022). *Etkin Bir Depo Tasarımı: Pareto Analizi İle Parçacık Sürü Algoritması İle Raf Yerleşimi İyileştirme* Haliç Üniversitesi.
- Lersteau, C., Nguyen, T. T., Le, T. T., Nguyen, H. N., Shen, W.** (2021). Solving the problem of stacking goods: mathematical model, heuristics and a case study in container stacking in ports. *IEEE Access*, 9, 25330-25343.
- Lin, B., Li, J., Bai, R., Qu, R., Cui, T., Jin, H.** (2022). Identify patterns in online bin packing problem: An adaptive pattern-based algorithm. *Symmetry*, 14(7), 1301.
- Looms, T., & Xie, L.** (2025). CPU-Based Layout Design for Picker-to-Parts Pallet Warehouses. *arXiv preprint arXiv:2506.04266*.
- Luu, V. T., Chromjaková, F., Bobák, R.** (2023). An optimization approach for an order-picking warehouse: An empirical case. *Journal of Competitiveness*, 15(4), 154–170.
- Mayadunne, S., Rajagopalan, H. K., Sharer, E.** (2024). A multi-step mixed integer programming heuristic for warehouse layout optimization. *Supply Chain Analytics*, 8, 100088.
- Mohamud, I. H., Kafi, M. A., Shahron, S. A., Zainuddin, N., Musa, S.** (2023). The Role of Warehouse Layout and Operations in Warehouse Efficiency: A Literature Review. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 56(1).
- Muppani, V. R., Adil, G. K.** (2008). Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: a simulated annealing approach. *Omega*, 36(4), 609-618.
- Perera, D., Mirando, U., Fernando, A.** (2022). Warehouse space optimization using linear programming model and goal programming model. In *Proceedings of the 2021 International Conference on Advanced Research in Computing*, 145-150.
- Rushton, A., Croucher, P., Baker, P.** (2022). *The handbook of logistics and distribution management: Understanding the supply chain*. Kogan Page Publishers.
- Sawicki, P., Sawicka, H.** (2023). Design optimization of stacked pallet load units. *Applied Sciences*, 13(4), 2153.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Shahroudnejad, A., Mousavi, P., Perepelytsia, O., Sahir, Staszak, D., Taylor, M. E., Bawel, B.** (2024). A novel framework for automated warehouse layout generation. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7, 1465186.
- Sooksaksun, N., Kachitvichyanukul, V., Gong, D.-C.** (2012). A class-based storage warehouse design using a particle swarm optimisation algorithm. *International Journal of Operational Research*, 13(2), 219-237.
- Toktaş-palut, P., Okçuoğlu, F.** (2019). Depo tasarımı ve yerleşimi: Bir gerçek hayat uygulaması. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 14-22.
- Tresca, G., Cavone, G., Carli, R., Cerviotti, A., Dotoli, M.** (2022). Automating bin packing: A layer building matheuristics for cost effective logistics. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(3), 1599-1613.
- Viveros, P., González, K., Mena, R., Kristjanpoller, F., Robledo, J.** (2021). Slotting optimization model for a warehouse with divisible first-level accommodation locations. *Applied Sciences*, 11(3), 936.
- Yalçın, A. Y., Can, B.** (2019). Tam sayılı programlama ve simülasyon ile raf alanı optimizasyonu: bir ambalaj firmasında uygulama. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 375-388.
- Yener, F., Yazgan, H. R.** (2019). Optimal warehouse design: Literature review and case study application. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 1-13.
- Yerlikaya, M. A., Arıkan, F.** (2022). Sipariş toplama sistemlerinde üretim planlama ve sınıf temelli depo ürün atama problemi için bütünleşik model önerisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(3), 1703-1712.
- Zhang, W., Jin, Y., Zhang, R., Wang, Y.** (2024). Layout optimization of irregular storage areas under class storage strategy based on clustering and multi-bin size packing problem. *PloS one*, 19(8), e0307218.
- Öztürk, B., Saraç, T.** (2023). Optimizing logistics warehouse space utilization with minimum total transportation. *Journal of Scientific Reports-A(060)*, 63-78.

EKLER

EKLER

EK A: Küçük ve Orta Boyutlu Problemlerin Malzeme Veri Seti

Tablo A.1: Küçük ve Orta Boyutlu Problemler Problem 1 Malzeme Veri Seti

Nu.	Yükseklik (h_i)	Ağırlık (w_i)	Geliş Sırası (r)	Güvenli Yükseklik (V_i)	Grup (g)
1	250	3000	1	15000	A
2	243	2916	1	14580	A
3	152	1824	1	9120	A
4	182	2184	1	10920	A
5	152	1824	1	9120	A
6	142	1704	1	8520	A
7	112	1344	1	6720	A
8	55	660	1	3300	A
9	182	2184	2	10920	B
10	162	1944	2	9720	B
11	152	1824	2	9120	A
12	77	924	2	4620	A
13	77	924	2	4620	A
14	182	2184	2	10920	A
15	152	1824	2	9120	B
16	112	1344	2	6720	B
17	101	1212	2	6060	A
18	101	1212	2	6060	A
19	182	2184	3	10920	A
20	142	1704	3	8520	A

Tablo A.2: Küçük ve Orta Boyutlu Problemler Problem 3 Malzeme Veri Seti

Nu.	Yükseklik (h_i)	Ağırlık (w_i)	Geliş Sırası (r)	Güvenli Yükseklik (V_i)	Grup (g)
1	250	3000	1	350	A
2	243	2916	1	350	A
3	152	1824	1	750	A
4	182	2184	1	520	A
5	152	1824	1	550	A
6	142	1704	1	600	A
7	112	1344	1	850	A
8	55	660	1	1100	A
9	182	2184	2	520	B
10	162	1944	2	750	B
11	152	1824	2	740	A
12	77	924	2	1000	A
13	77	924	2	1000	A
14	182	2184	2	520	A
15	152	1824	2	740	B
16	112	1344	2	940	B
17	101	1212	2	995	A
18	101	1212	2	995	A
19	182	2184	3	590	A
20	142	1704	3	790	A
21	142	1704	3	790	A
22	89	1068	3	1055	B
23	89	1068	3	1055	B
24	162	1944	3	690	A
25	142	1704	3	790	A
26	132	1584	3	840	A
27	122	1464	3	890	A
28	89	1068	3	1055	B
29	142	1704	4	550	A
30	112	1344	4	940	A

Tablo A.3: Küçük ve Orta Boyutlu Problemler Problem 5 Malzeme Veri Seti

Nu.	Yükseklik (h_i)	Ağırlık (w_i)	Geliş Sırası (r)	Güvenli Yükseklik (V_i)	Grup (g)
1	250	3000	1	350	A
2	243	2916	1	350	A
3	152	1824	1	750	A
4	182	2184	1	520	A
5	152	1824	1	550	A
6	142	1704	1	600	A
7	112	1344	1	850	A
8	55	660	1	1100	A
9	182	2184	2	520	B
10	162	1944	2	750	B
11	152	1824	2	740	A
12	77	924	2	1000	A
13	77	924	2	1000	A
14	182	2184	2	520	A
15	152	1824	2	740	B
16	112	1344	2	940	B
17	101	1212	2	995	A
18	101	1212	2	995	A
19	182	2184	3	590	A
20	142	1704	3	790	A
21	142	1704	3	790	A
22	89	1068	3	1055	B
23	89	1068	3	1055	B
24	162	1944	3	690	A
25	142	1704	3	790	A
26	132	1584	3	840	A
27	122	1464	3	890	A
28	89	1068	3	1055	B
29	142	1704	4	550	A
30	112	1344	4	940	A
31	102	1224	4	990	A
32	102	1224	4	990	A
33	93	1116	4	1035	B
34	93	1116	4	1035	B
35	142	1704	4	600	A
36	142	1704	4	600	A
37	89	1068	4	1055	B
38	89	1068	4	1055	B
39	89	1068	4	1055	B
40	89	1068	4	1055	B

Tablo A.4: Küçük ve Orta Boyutlu Problemler Problem 7 Malzeme Veri Seti

Nu.	Yükseklik (h_i)	Ağırlık (w_i)	Geliş Sırası (r)	Güvenli Yükseklik (V_i)	Grup (g)
1	250	3000	1	350	A
2	243	2916	1	350	A
3	152	1824	1	750	A
4	182	2184	1	520	A
5	152	1824	1	550	A
6	142	1704	1	600	A
7	112	1344	1	850	A
8	55	660	1	1100	A
9	182	2184	2	520	B
10	162	1944	2	750	B
11	152	1824	2	740	A
12	77	924	2	1000	A
13	77	924	2	1000	A
14	182	2184	2	520	A
15	152	1824	2	740	B
16	112	1344	2	940	B
17	101	1212	2	995	A
18	101	1212	2	995	A
19	182	2184	3	590	A
20	142	1704	3	790	A
21	142	1704	3	790	A
22	89	1068	3	1055	B
23	89	1068	3	1055	B
24	162	1944	3	690	A
25	142	1704	3	790	A
26	132	1584	3	840	A
27	122	1464	3	890	A
28	89	1068	3	1055	B
29	142	1704	4	550	A
30	112	1344	4	940	A
31	102	1224	4	990	A
32	102	1224	4	990	A
33	93	1116	4	1035	B
34	93	1116	4	1035	B
35	142	1704	4	600	A
36	142	1704	4	600	A
37	89	1068	4	1055	B
38	89	1068	4	1055	B
39	89	1068	4	1055	B
40	89	1068	4	1055	B
41	112	1344	5	940	A
42	112	1344	5	940	A
43	112	1344	5	940	A
44	112	1344	5	940	A
45	102	1224	5	990	A
46	93	1116	5	1035	B
47	182	2184	5	520	A
48	162	1944	5	690	A
49	152	1824	5	740	A
50	152	1824	5	740	A

Tablo A.5: Küçük ve Orta Boyutlu Problemler Problem 9 Malzeme Veri Seti

Nu.	Yükseklik (h_i)	Ağırlık (w_i)	Geliş Sırası (r)	Güvenli Yükseklik (V_i)	Grup (g)
1	250	3000	1	350	A
2	243	2916	1	350	A
3	152	1824	1	750	A
4	182	2184	1	520	A
5	152	1824	1	550	A
6	142	1704	1	600	A
7	112	1344	1	850	A
8	55	660	1	1100	A
9	182	2184	2	520	B
10	162	1944	2	750	B
11	152	1824	2	740	A
12	77	924	2	1000	A
13	77	924	2	1000	A
14	182	2184	2	520	A
15	152	1824	2	740	B
16	112	1344	2	940	B
17	101	1212	2	995	A
18	101	1212	2	995	A
19	182	2184	3	590	A
20	142	1704	3	790	A
21	142	1704	3	790	A
22	89	1068	3	1055	B
23	89	1068	3	1055	B
24	162	1944	3	690	A
25	142	1704	3	790	A
26	132	1584	3	840	A
27	122	1464	3	890	A
28	89	1068	3	1055	B
29	142	1704	4	550	A
30	112	1344	4	940	A
31	102	1224	4	990	A
32	102	1224	4	990	A
33	93	1116	4	1035	B
34	93	1116	4	1035	B
35	142	1704	4	600	A
36	142	1704	4	600	A
37	89	1068	4	1055	B
38	89	1068	4	1055	B
39	89	1068	4	1055	B
40	89	1068	4	1055	B
41	112	1344	5	940	A
42	112	1344	5	940	A
43	112	1344	5	940	A
44	112	1344	5	940	A
45	102	1224	5	990	A

Tablo A.5 (devam): Küçük ve Orta Boyutlu Problemler Problem 9 Malzeme Veri Seti

Nu.	Yükseklik (h_i)	Ağırlık (w_i)	Geliş Sırası (r)	Güvenli Yükseklik (V_i)	Grup (g)
46	93	1116	5	1035	B
47	182	2184	5	520	A
48	162	1944	5	690	A
49	152	1824	5	740	A
50	152	1824	5	740	A
51	93	1116	4	1035	B
52	132	1584	3	840	A
53	89	1068	3	1055	B
54	142	1704	3	790	A
55	55	660	1	1100	A

EK B: Küçük ve Orta Boyutlu Problemlerin Çözüm Sonuçları**Tablo B.1:** Küçük ve orta boyutlu problemler Problem 1 çözüm sonuçları

Lokasyon	Malzeme	Kat	Geliş Sırası	Yükseklik	Ağırlık
1	1	1	1	250	3000
	4	2	1	182	2184
	6	3	1	142	1704
	8	6	1	55	660
	12	5	2	77	924
	13	4	2	77	924
2	3	3	1	152	1824
	7	4	1	112	1344
	14	2	2	182	2184
	17	5	2	101	1212
	19	1	3	182	2184
3	9	1	2	182	2184
	10	2	2	162	1944
	15	3	2	152	1824
	16	4	2	112	1344
4	2	1	1	243	2916
	5	2	1	152	1824
	11	3	2	152	1824
	18	5	2	101	1212
	20	4	3	142	1704

Tablo B.2: Küçük ve orta boyutlu problemler Problem 3 çözüm sonuçları

Lokasyon	Malzeme	Kat	Geliş Sırası	Yükseklik	Ağırlık
1	2	1	1	243	2916
	3	2	1	152	1824
	5	3	1	152	1824
	17	4	2	101	1212
	18	5	2	101	1212
2	9	1	2	182	2184
	10	2	2	162	1944
	22	5	3	89	1068
	23	3	3	89	1068
	28	4	3	89	1068
3	6	3	1	142	1704
	7	4	1	112	1344
	12	5	2	77	924
	14	2	2	182	2184
	19	1	3	182	2184
4	4	1	1	182	2184
	25	3	3	142	1704
	29	2	4	142	1704
	30	4	4	112	1344
5	1	1	1	250	3000
	20	2	3	142	1704
	21	3	3	142	1704
	26	4	3	132	1584
	27	5	3	122	1464
6	8	4	1	55	660
	11	2	2	152	1824
	13	3	2	77	924
	24	1	3	162	1944
7	15	1	2	152	1824
	16	2	2	112	1344

Tablo B.3: Küçük ve orta boyutlu problemler Problem 5 çözüm sonuçları

Lokasyon	Malzeme	Kat	Geliş Sırası	Yükseklik	Ağırlık
1	9	1	2	182	2184
	22	7	3	89	1068
	23	6	3	89	1068
	28	2	3	89	1068
	33	4	4	93	1116
	38	3	4	89	1068
	40	5	4	89	1068
2	4	1	1	182	2184
	21	4	3	142	1704
	24	2	3	162	1944
	27	5	3	122	1464
	36	3	4	142	1704
3	3	1	1	152	1824
	5	2	1	152	1824
	13	6	2	77	924
	17	5	2	101	1212
	18	4	2	101	1212
	20	3	3	142	1704
4	10	1	2	162	1944
	15	2	2	152	1824
	16	3	2	112	1344
	34	4	4	93	1116
	37	5	4	89	1068
	39	6	4	89	1068
5	1	1	1	250	3000
	6	2	1	142	1704
	25	4	3	142	1704
	30	5	4	112	1344
	35	3	4	142	1704
6	7	4	1	112	1344
	8	6	1	55	660
	11	3	2	152	1824
	12	5	2	77	924
	14	2	2	182	2184
	19	1	3	182	2184
7	2	1	1	243	2916
	26	3	3	132	1584
	29	2	4	142	1704
	31	4	4	102	1224
	32	5	4	102	1224

Tablo B.4: Küçük ve orta boyutlu problemler Problem 7 çözüm sonuçları

Lokasyon	Malzeme	Kat	Geliş Sırası	Yükseklik	Ağırlık
1	16	1	2	112	1344
	22	5	3	89	1068
	28	6	3	89	1068
	34	8	4	93	1116
	37	2	4	89	1068
	38	4	4	89	1068
	39	7	4	89	1068
	46	3	5	93	1116
2	31	5	4	102	1224
	44	4	5	112	1344
	47	1	5	182	2184
	48	2	5	162	1944
	50	3	5	152	1824
3	20	3	3	142	1704
	26	4	3	132	1584
	27	5	3	122	1464
	30	6	4	112	1344
	35	2	4	142	1704
	36	1	4	142	1704
4	3	1	1	152	1824
	5	3	1	152	1824
	6	4	1	142	1704
	11	2	2	152	1824
	43	5	5	112	1344
5	4	1	1	182	2184
	32	5	4	102	1224
	41	3	5	112	1344
	42	4	5	112	1344
	49	2	5	152	1824
6	2	1	1	243	2916
	8	5	1	55	660
	12	4	2	77	924
	17	3	2	101	1212
	19	2	3	182	2184
7	9	1	2	182	2184
	10	2	2	162	1944
	15	3	2	152	1824
	23	6	3	89	1068
	33	4	4	93	1116
	40	5	4	89	1068
8	1	1	1	250	3000
	7	3	1	112	1344
	14	2	2	182	2184
	45	4	5	102	1224
9	13	6	2	77	924
	18	5	2	101	1212
	21	4	3	142	1704
	24	1	3	162	1944
	25	2	3	142	1704
	29	3	4	142	1704

Tablo B.5: Küçük ve orta boyutlu problemler Problem 9 çözüm sonuçları

Lokasyon	Malzeme	Kat	Geliş Sırası	Yükseklik	Ağırlık
1	1	1	1	250	3000
	8	6	1	55	660
	12	5	2	77	924
	17	4	2	101	1212
	27	3	3	122	1464
	52	2	3	132	1584
	55	7	1	55	660
2	10	1	2	162	1944
	28	2	3	89	1068
3	4	1	1	182	2184
	5	2	1	152	1824
	7	3	1	112	1344
	30	4	4	112	1344
	31	5	4	102	1224
	32	6	4	102	1224
4	11	2	2	152	1824
	13	6	2	77	924
	18	5	2	101	1212
	21	4	3	142	1704
	24	1	3	162	1944
	54	3	3	142	1704
5	3	1	1	152	1824
	6	2	1	142	1704
	35	3	4	142	1704
	41	5	5	112	1344
	43	4	5	112	1344
	45	6	5	102	1224
6	2	1	1	243	2916
	19	2	3	182	2184
	20	4	3	142	1704
	36	3	4	142	1704
7	14	1	2	182	2184
	25	4	3	142	1704
	26	5	3	132	1584
	29	3	4	142	1704
	48	2	5	162	1944
8	9	1	2	182	2184
	15	2	2	152	1824
	33	6	4	93	1116
	34	7	4	93	1116
	38	4	4	89	1068
	39	5	4	89	1068
9	51	3	4	93	1116
	16	1	2	112	1344
	22	3	3	89	1068
	23	2	3	89	1068
	37	5	4	89	1068
	40	6	4	89	1068
	46	4	5	93	1116
10	53	7	3	89	1068
	42	5	5	112	1344
	44	4	5	112	1344
	47	1	5	182	2184
	49	2	5	152	1824
	50	3	5	152	1824

EK C: Büyük Boyutlu Problemlerin Malzeme Veri Seti

<https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/WEIUET>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Hasan Aydın
Doğum tarihi ve yeri : 10/09/1997- Yozgat / Kadışehri
e-posta : hasan.aydin@msu.edu.tr

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı	2026
Lisans	Konya Teknik Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ Endüstri Mühendisliği	2020
Lise	Ali Naili Erdem Anadolu Lisesi	2015

Yayın Listesi

Aydın, H., Küçükkoç, İ., Sarucan, A. (2025). *Warehouse layout optimization: An application in the paper industry*. International Conference on Mathematics and Applied Data Science, Konya, Türkiye, [Tezden türetilmiştir].