

**KONTEYNER YÜKLEME PROBLEMLERİ
İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER VE
ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ**

Zeynep ÖZSÜT
Yüksek Lisans Tezi

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Mart-2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1401F023**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Zeynep ÖZSÜT'ün "Konteyner Yükleme Problemleri için Matematiksel Modeller ve Çözüm Yöntemleri " başlıklı Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 13.02.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir

	Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ
Üye :	Doç Dr. Onur KAYA
Üye :	Doç. Dr. Özden ÜSTÜN

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KONTEYNER YÜKLEME PROBLEMLERİ İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Zeynep ÖZSÜT

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ

2015, 78 Sayfa

Bu tezde konteyner yükleme problemleri için matematiksel modeller ve çözüm yöntemleri ele alınmıştır. Belirli varsayımlar altında konteyner yükleme ve konteyner çeşit seçimi için iki amaçlı karma tamsayılı matematiksel modeller ve matematiksel model temelli bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen iki amaçlı matematiksel model ve matematiksel model temelli sezgisel yöntemin çözümünde "Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi" ve "Konik skalerleştirme yöntemi" olmak üzere iki farklı skalerleştirme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca bu problemler için yeni bir sıralama sezgiseli ve yerleştirme sezgiseli önerilmiş, bu sezgisellerin kullanıldığı bir tavlama benzetimi metasezgiseli geliştirilmiştir. Literatürde yer alan ve yeni oluşturulan test problemleri çözülmüş, elde edilen sonuçlar literatürde ulaşılan sonuçlarla ve geliştirilen diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Konteyner Yükleme, Matematiksel modelleme, Tavlama Benzetimi, Sezgisel, Skalerleştirme

ABSTRACT

Master of Science Thesis

MATHEMATICAL MODELS AND SOLUTION METHODS FOR CONTAINER LOADING PROBLEMS

Zeynep ÖZSÜT

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Industrial Engineering Program**

Supervisor: Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ

2015, 78 pages

In this thesis, mathematical models and solution methods are considered for container loading problems. In order to solve container loading and container assortment problem two-objective mixed integer mathematical models and mathematical model based heuristics are proposed under various assumptions and constraints. Two different solution methods, weighted sum and conic scalarization methods are used to solve proposed two objective mathematical model and mathematical model based heuristic. For this problem, a new filling and a ranking heuristics are proposed. Also, a simulating annealing metaheuristic is developed and new filling and ranking heuristics are used in this algorithm to solve problems. Test problems and generated new problems are solved and results are compared with literature and other proposed solution methods.

Keywords: Container loading, Mathematical modeling, Simulated annealing, Heuristics, Scalarization

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma sırasında, bilgi deneyim ve güvenini esirgemeyen danıŐmanım **Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ** 'ye, hayatımın her anında olduğu gibi bu zorlu süreçte de yanımda olduklarını hissettiren canım babam **Muharrem ÖZSÜT**, güzel annem **Aysel ÖZSÜT** ve tüm aileme, sadece iş arkadaŐı değil daha fazlası olan sevgili iş arkadaşlarıma ve halimden en çok anlayıp bana her konuda destek olan **EŐref BOĞAR**'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KONTEYNER YÜKLEME PROBLEMLERİ	4
2.1. Literatür Araştırması	4
2.2. KYP’nde Ele Alınan Kısıtlar	6
2.2.1 Konteyner ile ilgili kısıtlar.....	6
2.2.2 Kutu ile ilgili kısıtlar	7
2.2.3 Kargo ile ilgili kısıtlar	7
2.2.4 Pozisyonlandırma ile ilgili kısıtlar.....	8
2.2.5 Yükleme ile ilgili kısıtlar.....	8
2.3. Konteyner Yükleme Problemlerinin Varsayımları	8
2.3.1 Ortogonal kesim-yerleşim	9
2.3.2 Üst üste gelmeme kısıtı	10
2.3.3 Fiziksel boyutlar	10
2.4. Kesme ve Paketleme Problemlerinin Sınıflandırılması	11
2.4.1 Boyuta göre	11
2.4.2 Atama çeşidine göre	11
2.4.3 Küçük nesnelerin (parça, kutu vb.) çeşidine göre	11
2.4.4 Büyük nesnelerin (konteyner, sac vb.) çeşidine göre	11
2.4.5 Küçük nesnelerin şekline göre.....	12
2.5. KYP’nin Sınıflandırılması	12
2.5.1 Girdinin enküçüklendiği problem türleri.....	12
2.5.2 Çıktının enbüyüklendiği problem türleri	13
2.6. KYP’nin Karmaşıklığı	14

3. ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ	16
3.1. Kesin Çözüm Yöntemleri	16
3.2. Sezgisel Yöntemler	17
3.3. Metasezgiseller	19
4. SKALERLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	22
4.1. Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi	24
4.2. Konik Skalerleştirme Yöntemi	24
5. TEZ KAPSAMINDA KYP İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELLER	26
5.1. KYP için Karma Tamsayılı Matematiksel Model	26
5.1.1 Kümeler ve parametreler	26
5.1.2 Karar değişkenleri	27
5.1.3 Matematiksel model	28
5.1.4 İki amaçlı karma tamsayılı matematiksel model	31
5.2. KYP için Parçaların Orta Noktasını Eksenlere Atayan Karma Tamsayılı Matematiksel Model	31
5.2.1 Kümeler ve parametreler	32
5.2.2 Karar değişkenleri	33
5.2.3 Matematiksel model	35
5.2.4 İki amaçlı parçanın orta noktasını eksenlere atayan karma tamsayılı matematiksel model.....	38
6. KYP İÇİN GELİŞTİRİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ	39
6.1. KYP için Matematiksel Model Temelli Sezgisel Yöntem	39
6.1.1 Ana matematiksel model	39
6.1.2 KYP için iki amaçlı ana matematiksel model	41
6.1.3 Alt matematiksel model.....	43
6.2. KYP için Bir Yerleştirme Sezgiseli	44
6.3. KYP için Gezgin Satıcı Problemi-En Yakın Komşu Sezgiseli.....	47
6.3.1 Parça benzerliklerinin belirlenmesi ve parça uzaklık matrisinin oluşturulması.....	48

6.3.2	GSPEKS'ne göre parça yükleme önceliklerinin belirlenmesi.....	49
6.3.3	Yerleştirme algoritmasının uygulanması.....	49
6.4.	KYP için Tavlama Benzetimi	50
7.	SAYISAL SONUÇLAR	53
7.1.	KYP için Geliştirilen Matematiksel Modellerle Elde Edilen Sonuçlar	53
7.2.	KYP için Matematiksel Model Temelli Sezgisel Yöntem ile Elde Edilen Sonuçlar	55
7.3.	KYP için İki Amaçlı Geliştirilen MMTS İle Elde Edilen Sonuçlar	60
7.4.	KYP için GSPEKS ve Yerleştirme Sezgiseline Göre Elde Edilen Sonuçlar	65
7.5.	Tavlama Benzetimi İle Elde Edilmiş Sonuçlar	67
7.6.	Çözüm Yöntemleri ile Elde Edilen Sonuçlar	70
8.	SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	75
	KAYNAKLAR	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Ortogonal yerleşim	9
Şekil 2.2. Ortogonal olmayan yerleşim.....	9
Şekil 2.3. Çakışma durumu	10
Şekil 2.4. Fiziksel boyutları aşma durumu.....	10
Şekil 3.1. Katmanlara ayrılmış konteyner [5].....	17
Şekil 3.2. Bir katmanın görünüşü [5].....	18
Şekil 4.1. Dışbükey olmayan görüntü kümesi	24
Şekil 6.1. Katman-1, kat-1	45
Şekil 6.2. Katman-1, kat-1 katman derinliği güncelleme	46
Şekil 6.3. Katman-1, kat-2	46
Şekil 6.4. Katman-2, kat-1 ve kat-2	47
Şekil 6.5. GSPEKS'ne göre yerleşim	50
Şekil 7.1. <i>thpack9–15</i> için ATY göre elde edilen sonuçlar	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Karmaşıklık dereceleri[20]	15
Çizelge 3.1. Örnek parça boyutları	18
Çizelge 6.1. N=7 için örnek	45
Çizelge 6.2. N=4 için örnek	48
Çizelge 6.3. Parça benzerlik matrisi	49
Çizelge 6.4. Kutu kümesi.....	51
Çizelge 6.5. Parça rotasyon bilgileri	51
Çizelge 6.6. Parça rotasyonlarına karşılık gelen eksenler.....	51
Çizelge 7.1. Parça ve konteyner boyutları	53
Çizelge 7.2. Örnek problem ve elde edilen sonuçlar	54
Çizelge 7.3. ATY ve KSY örnek problem sonuçları	54
Çizelge 7.4. MMTSY ile elde edilmiş sonuçlar.....	56
Çizelge 7.5. İlk aşamada parçaların yerleştiği konteynerler	58
Çizelge 7.6. Konteynerlere yerleştirilen parça sayıları	58
Çizelge 7.7. Yerleştirilemeyen parçalar için ilk aşama sonucu	58
Çizelge 7.8. Yerleştirilemeyen parçalar için ikinci aşama sonucu	59
Çizelge 7.9. MMTSY'nin aşamalarında kullanılan konteyner sayısı	59
Çizelge 7.10. İki amaçlı KYP için ATY ile elde edilmiş sonuçlar	61
Çizelge 7.11. İki amaçlı KYP için KSY ile elde edilmiş sonuçlar	62
Çizelge 7.12. KYP için GSPEKS'e göre elde edilen sonuçlar	65
Çizelge 7.13. GSPEKS ve GRSY'nin karşılaştırılması	67
Çizelge 7.14. RBTB ile elde edilen sonuçlar	68
Çizelge 7.15. SBTB ile elde edilen sonuçlar	69
Çizelge 7.16. GSPEKS sonuçları ve SBTB ile elde edilen sonuçlar	70
Çizelge 7.17. Çözüm yöntemleri ve elde edilen sonuçlar.....	71
Çizelge 7.18. LES ile çözüm yöntemleri sonuçları arasındaki uzaklık	73

KISALTMALAR DİZİNİ

KYP	: Konteyner yükleme problemleri
PÇS	: Parça çeşit sayısı
PS	: Parça sayısı
MKS	: Minimum konteyner sayısı
LES	: Literatürde elde edilen sonuç
MMSY	: Matematiksel model temelli sezgisel yöntem
ATY	: Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi
KSY	: Konik skalarizasyon yöntemi
GSPEKS	: Gezgin satıcı problemi en yakın komşu sezgiseli
GRSY	: George ve Robinson sınıflandırma yöntemi
RBTB	: Rassal başlangıçlı tavlama benzetimi
SBTB	: Sezgisel başlangıçlı tavlama benzetimi
YAKKS	: Yerleştirme aşamasında kullanılan konteyner sayısı
KKS	: Kullanılan konteyner sayısı
HOKKS	: Hacim optimizasyonunda kullanılan konteyner sayısı

1. GİRİŞ

Bu tezde konteyner yükleme ve konteyner seçim problemleri için çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Literatürde yer alan hacim kaybının enküçüklenmesinden farklı olarak, seçilen konteyner çeşit sayısının da enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Buna yönelik literatürde yer almayan iki amaçlı matematiksel modeller ve matematiksel model temelli yeni bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. İki farklı skalerleştirme yöntemi kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Geliştirilen matematiksel model temelli sezgisel yöntem, tek amaca yönelik hacim kaybının enküçüklenmesi için güncellenerek genel konteyner yükleme problemleri için de kullanılmıştır. Konteyner yükleme problemleri için yeni bir sıralama sezgiseli ve yerleştirme sezgiseli önerilmiştir. Bu sezgiseller kullanılarak çözümler elde edilmiş, ayrıca bu yerleştirme sezgiselinin kullanıldığı bir tavlama benzetimiyle de çözümlere ulaşılmıştır. Ek olarak, sıralama ve yerleştirme sezgiselinin verdiği sonuçlar tavlama benzetimi için başlangıç çözüm olarak alınmış, bu çözümler de iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Konteyner yükleme problemleri (KYP), kesme ve paketleme problemlerinin bir kolu olan üç boyutlu kesme ve paketleme probleminin bir türüdür. Bir boyutlu kesme problemlerinin 1960'lı yıllardan itibaren literatürde yer almasıyla başlayan ve bir buçuk, iki ve üç boyutlu olarak çeşitleri olan kesme problemleri, gerçek hayat problemlerine doğrudan çözüm aramaktadır. Uzun boruların, cam karton ve sac levhaların, kerestelerin kesimi gibi problemlere sıkça rastlanmaktadır. Bu kesimlerden doğan kayıpları azaltmak, birim üretim maliyetlerini azaltma yollarını arayan işletmeler için büyük bir rekabet üstünlüğü sağlamaktadır. İmalatta hammadde kayıplarının yanında, ürünler ve ürünlerin saklandığı ambalaj ve koruyucu kaplamalar için de işletmeler alan tahsis etmekte, belli bir miktarda stok bulundurmaktadır. Bu noktada ihtiyaç duyulacak malzemelerin miktar, çeşit ve boyutlarının belirli olması kilit rodedir. Aynı zamanda sürekli bir taşımanın söz konusu olduğu işletme içi ve işletme dışı lojistik faaliyetlerde, taşımanın ve yüklemenin uygun araç ve yöntemlerle yapılması gerekir. Taşıma için, ürünlerin boyutlarına uygun olmayan boyut ve çeşitlerde araçların seçimi veya tam tersine kasaların, paletlerin veya kutuların taşıma yapılan araçlara uygun büyüklükte ve

tasarımda olmayışı, işletmelere maliyet olarak dönmektedir. Bu durum işletmeye zarar vermekle birlikte, katma değer yaratmayan süreçler nedeniyle nihai kullanıcıya da ürün fiyatında artış olarak yansımaktadır. Konteyner yükleme işlemlerinin yoğun olduğu bir başka alan da limanlardır. Yük gemilerine konteynerlerin yüklenmesi karmaşık bir süreçtir. Bu işlemlerin çizelgelenmesi, konteynerlerin yükleninceye kadar limanda istiflenmesi ve gemiye de belirli bir düzende yüklenmesi ve gemilerden boşaltılması esnasında konteyner çeşitlerinin çok sayıda ve belirsiz olması bu işlemleri zorlaştırmaktadır. Endüstrinin tüm alanlarında işletmenin etkileşim halinde olduğu hammadde ve ürün tedarikçileri ve lojistik firmalarına kadar tedarik zincirinin tüm halkaları bu tür problemlerden olumsuz etkilenmektedir.

KYP, üç boyutlu küçük parça veya kutuların üç boyutlu büyük nesne veya konteynerlere, kutuların birbiriyle çakışmadığı ve kutuların konteynerin boyutlarını aşmadan yerleştirildiği geometrik atama problemleridir. Genel kesme problemlerinde kutu paketleme olarak ele alınan problem başlığı KYP için "girdinin enküçüklenmesi" , yine genel kesme problemlerinde sırt çantası problemi olarak adlandırılan problem türünün KYP'ndeki karşılığı da "çıkıntının enbüyüklenmesi" olarak ifade edilir. Girdinin enküçüklenmesinde bir kutu kümesi vardır ve tüm kutuların konteynerlere yüklenmesi şartıyla en az sayıda konteyner kullanmak veya hacim kaybını enküçüklemek amaçlanır. Çıktı enbüyüklenmesinde ise bir veya birden fazla belirli sayıda konteynere, belirli kutulardan yükleme yapılarak maksimum sayıda parça yüklemek veya hacimce maksimum doluluğa ulaşmak amaçlanır.

İkinci bölümde konteyner yükleme problemleri ile ilgili literatür araştırması, konteyner yükleme problemlerinin türleri, varsayımları ve kısıt türlerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde literatürde mevcut olup tez çalışmasında temel alınan ve literatürde sık kullanılan çözüm yöntemleri; kesin çözüm yöntemleri, sezgisel yöntemler ve metasezgisel yöntemler olmak üzere üç başlık altında incelenmiştir.

Dördüncü bölümde skalerleştirme yöntemleri genel hatlarıyla anlatılmış, Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi ve Konik Skalerleştirme Yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde ise konteyner yükleme ve konteyner seçim problemleri için geliştirilen karma tamsayı matematiksel modeller yer almaktadır. Bu modeller konteyner çeşitlerinin dikkate alınarak kurulduğu tek ve çok amaçlı modellerdir. Altıncı bölümde ise yine tek ve çok amaçlı olarak önerilen matematiksel model temelli sezgisel yöntem ile konteyner yükleme problemleri için geliştirilen sıralama ve yerleştirme sezgiseli ile metasezgisel yöntemlere yer verilmiştir.

Yedinci bölümde ise geliştirilen matematiksel modellere ve çözüm yöntemlerine ait hesaplamalı sonuçlar verilmiştir. Matematiksel modeller ve diğer yöntemler literatürde yer alan ve üretilen test problemleri için çözdürülmüştür.

Son bölümde ise sonuç ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. KONTEYNER YÜKLEME PROBLEMLERİ

KYP geniş bir çalışma alanı olan kesme ve paketleme problemlerinin içinde yer almaktadır. Kesme problemleri genel olarak üç boyutta ele alınmaktadır. Bir boyutlu kesme problemlerinde ana malzeme ve bu ana malzemeden kesilecek olan parçalar bir boyutludur. İki boyutlu kesme problemlerinde ise ana malzeme ve parçalar iki boyutludur. En, boy ve yükseklik olmak üzere üç boyutlu küçük nesnelere üç boyutlu büyük nesnelere yüklenmesi veya üç boyutlu büyük nesnelere üç boyutlu küçük nesnelere yüklenmesi ise üç boyutlu kesme ve paketleme problemleri olarak ele alınır. Bir diğer problem türü olan bir buçuk boyutlu kesme problemlerinde ise ana malzeme ve parçaların bir boyutunun uzunluğu sonsuz kabul edilirken, ikinci boyut sabittir.

KYP’nde içine küçük nesnelere yerleştirileceği büyük nesne; ana malzeme, stok veya konteyner olarak adlandırılır. Yerleşecek küçük nesnelere ise parça veya kutu olarak adlandırılır. Büyük nesneye küçük nesnelere yerleştirilmesinden sonra kalan boş hacme ise fire yada hacim kaybı denilmektedir.

KYP’nin lojistik sektöründeki öneminin ve son yıllarda çalışma sıklığının artması nedeniyle, problemin farklı çeşitleri bulunmaktadır. Bunun nedeni gerçek hayat problemlerine çok yakın olması ve farklı yapılar da kısıtlarının olmasıdır.

Bu bölümde öncelikle KYP ile ilgili genel bir literatür araştırması verilmiş, devamında ise KYP’nin ait olduğu problem türü olan kesme ve paketleme problemleri sınıflandırılmış, daha sonra KYP kendi içerisinde sınıflandırılarak, varsayımlarından, kısıtlarından ve karmaşıklığından bahsedilmiştir.

2.1. Literatür Araştırması

Chen ve Sen [1], konteyner yükleme problemleri için bir analitik model geliştirmiştir. Model bir kutu ve konteyner kümesini içermektedir. Kutular ve konteynerlerin boyutlarının farklı olmasına izin verilmiştir. Kutuların tümünün yüklenmesi için uygun konteyner kümesinin hacim kaybını en küçükleyecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu model ile ilgili ayrıntılı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilmiştir. Westerlund vd. [2], N boyutlu tahsis problemleri için bir tamsayılı

doğrusal programlama modeli önermişlerdir. İş çizelgelemeyi bir, tesis yerleşimini iki ve konteyner yükleme gibi problemleri üç boyutlu tahsis problemi olarak ele almışlar ve küçük problemler için çözümler elde etmişlerdir. Kasımbeyli vd. [3] bir boyutlu kesme ve malzeme seçimi problemini ele alarak iki amaçlı doğrusal tamsayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Çalışmanın bir amacı firenin enküçüklenmesi iken, ikinci amaç rulo çeşit sayısının enküçüklenmesidir. Ayrıca kesim planları bu çalışmada parametre değildir ve geliştirilen matematiksel model kesim planlarını da oluşturmaktadır. Dereli ve Das [4], iki amaçlı KYP için bir hibrit tavlama benzetimi önermişlerdir. Amaç bir konteyneri maksimum hacim doluluğu ve ağırlıkla yüklemektir. Çalışmada ağırlıklandırılmış hedef programlama modeli kurulmuş ve amaç fonksiyonu bu amaçlardan sapmanın enküçüklenmesi şeklinde ele alınmıştır. Modelin çözümü için yerleştirme sezgiseli içeren bir tavlama benzetimi kullanılmıştır. George ve Robinson[5], KYP için, bir duvar inşa sezgiseli önermiştir. Konteyneri katmanlara ayırarak duvarları inşa etme mantığına dayanan bu sezgiselden çözüm yöntemleri bölümünde bahsedilmiştir. Morabito ve Areneles [6], konteyneri giyotin kesimle daha küçük parçalara ayırarak ilerleyen bir giyotin kesim yaklaşımı önermişlerdir. Gilmore ve Gomory [7], parçaları kule halinde inşa ederek, bu kuleleri konteynerin zeminine iki boyutlu kesme problemini çözerek yerleştiren bir yaklaşımı benimsemiştir. Bortfeldt ve Gehring[8], KYP için bir genetik algoritma önermiştir. Yerleştirme sezgiseli olarak [7]'de önerilen sezgiseli temel alan bu metasezgiselde, farklı kuleler oluşturarak daha iyi çözümler elde edilmeye çalışılmıştır. Bischoff ve Ratcliff [9], çalışmalarında farklı kısıtları ele almışlardır. Bunlar parçaların birlikte yüklenme kısıtı, bir parçanın yükleme önceliği, parçanın rotasyonu, bir parçanın diğerinden belirli bir mesafeden uzak veya yakın olması gibi kısıtlardır. Bischoff vd.[10], KYP için bir sezgisel önermiştir. Yüklenecek bir kutu kümesi vardır. Kutular üst üste koyulmaktadır ve bir kutunun diğerinin üzerine koyulmasında hacim doluluğu dikkate alınmaktadır. Bir kutu diğerinin üzerine koyulduğunda iki kutunun oluşturduğu üç boyutlu hacmin boş kalan kısmının enküçük olmasına dayanan bir sezgiseldir. Eley[11] 'in çalışmasında bir kutu kümesi vardır ve bu kutuların yüklenmesi için gerekli konteyner sayısının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Bir konteyner sezgisel olarak parçaların istiflenmesi şeklinde doldurulmakta ve ardından kalan parçalara göre

diğer konteynerler doldurulmaktadır. Gonçalves ve Resende [12], ise iki boyutlu ve üç boyutlu kutu paketleme problemi için populasyon temelli rassal anahtarlı genetik algoritma geliştirmiştir. Bir parça yerleştirilince boş alanlar oluşmaktadır ve bu boş alanları yönetmek için en büyük alan gösterimi kullanılmaktadır. Önerilen algoritmaya göre rassal anahtarlara dayanan bir yerleştirme algoritması kullanılmıştır. Parçaları kutulara yerleştirmek için kullanılan sıralamayı oluşturmak ve yerleştirme prosedürü için kullanılan parametreleri geliştirmek için yanlı rassal anahtarlı genetik algoritmayla birlikte yeni bir uyum fonksiyonu ile çözüm kalitesi artırılmaya çalışılmıştır. Maura ve Oliveira [13], konteyner yükleme ve araç rotalama problemlerini birlikte ele almıştır. Aynı yerden gelen siparişlerin birlikte yüklenmesi ve konteynerin ağırlık sınırını aşmamak gibi kısıtlar ele alınmıştır. Bortfeldt ve Homberger [14] de bu problemi iki aşamalı bir sezgisel olarak önce paketle sonra rotala şeklinde ele almışlardır.

2.2. KYP'nde Ele Alınan Kısıtlar

KYP'nde farklı türde kısıtlar yer almaktadır. Bu kısıtlar ele alınan problemin özelliklerine göre değişiklik göstermektedir [8].

2.2.1 Konteyner ile ilgili kısıtlar

- **Ağırlık sınırı:** Genelde amaç konteynerde boşluk bırakmamak olsa da , yüklenen parçalar çok ağır veya konteynerin alabileceği bir ağırlık üst sınırı varsa bu kısıt dikkate alınır.

- **Ağırlık dağılımı, yük dengesi:** Bu kısıt ağırlığın konteyner zemini boyunca dağılımını gerektirir. Yükün dengeli taşınması, taşıma esnasında oluşabilecek riskleri azaltır. Tüm boyutlarda ele alınacağı gibi, örneğin sadece yükseklik boyutunda ağırlık merkezinin zemine yakın olması istenebilir. Bu durumda ağır parçalar alta hafifler ise üste yerleştirilecektir.

2.2.2 Kutu ile ilgili kısıtlar

• **Yükleme öncelikleri:** Bu kısıt çıktı enbüyüklenmesi ve girdi enküçüklenmesi problemlerinde farklı olarak ele alınabilir. Girdi enküçüklemeğinde amaç fonksiyonuna katkısı daha çok olan kutuların yükleme öncelikleri daha yüksek olabilir. Eğer tüm kutular yüklenecekse de, kutularla ilgili teslimat yerleri, raf ömürleri, belirli kutuların mutlaka birlikte yüklenmesi veya kesinlikle birlikte yüklenmemesi gibi kısıtlar da olabilir.

• **Konumlandırma-Rotasyon kısıtları:** Bu kısıt literatürde en sık dikkate alınan kısıttır. Bir parçanın her boyutta rotasyonuna izin verildiği takdirde altı farklı şekilde konumlandırılabilir. Parçaların yükseklik boyutunda rotasyona gidilmemesi sadece en-boy rotasyonuna izin verilebileceği gibi, forklifte yükleyiş veya parçaların tutma kavrama özelliklerinden dolayı hiç bir şekilde rotasyona izin verilmeyebilir.

• **İstif kısıtları:** Bir kutunun diğerinin üzerine nasıl koyulacağıyla ilgilenir. Bir kutunun üzerine kaç adet kutu koyulabileceği, kutunun ne kadarlık bir basınca veya ağırlığa dayanabileceği gibi faktörler göz önünde bulundurulur. Kutu bazında düşünülecek olursa da, her bir kutunun yüzeyleri farklı olabileceği için bu kısıtı her boyutta farklı ele almak gerekebilir.

2.2.3 Kargo ile ilgili kısıtlar

• **Tam sevkiyat kısıtları:** Bir kutu türünün yüklenmiş olmasına bağlı belli kutularında yüklenmesi gerekebilir. Aynı zamanda yüklenmemiş ise ait olduğu kümeden hiç bir kutunun yüklenmemesi de istenebilir. Mobilya, mutfak gibi montaj gerektiren kargolarda genelde tek seferde teslimat istenir. O nedenle ya tamamı yüklenir yada hiçbiri yüklenmez.

• **Tahsis kısıtları:** Bu kısıt genelde çoklu konteyner yükleme problemlerinde ele alınır. Tek bir siparişte aynı konteynere yüklenmemesi gereken kutular olabilir. Örneğin gıda ve temizlik ürünlerinin birlikte taşınmaması gibi.

2.2.4 Pozisyonlandırma ile ilgili kısıtlar

Bu kısıt kutu-konteyner veya kutu-kutu arasında olabilir. Bazı kutuların konteynerlerin belirli bir noktasına veya belirli bir alanına yerleştirilmesi gerekebilir. Belirli bir kutu kümesinin birlikte veya mutlaka belirli bir mesafa uzaklıkta yer alması gerekebilir. Bununla birlikte yükleme boşaltma durumlarına göre de kutular için belirli bölgeler ayrılabilir. Farklı müşterilere kutuların teslim edileceği durumlarda da bu kısıt göz önünde bulundurulabilir.

2.2.5 Yükleme ile ilgili kısıtlar

• **Denge kısıtları:** Dikey denge ve yatay denge olarak ele alınabilen bu kısıt, kutuların veya kutuları taşıyan çalışan ve araçların zarar görmemesi için dikkate alınır. Dikey dengede bir kutunun diğerlerinin üzerine veya zemine düşmemesini sağlar. Kutunun alt yüzeyinin konteynerin zemini veya üzerine koyulduğu diğer kutu tarafından belirli bir oranda desteklenmesi gerekir. Aynı durum yatay dengede kutuların yan yüzeylerinin belli bir oranda diğer kutular veya konteynerle teması için de geçerlidir.

• **Karmaşıklık kısıtları:** Karmaşık yükleme biçimleri, kutuların el ile yüklenmesi durumunda, yüklemenin nasıl yapılacağı zorluklara ve zaman kaybına neden olabilir. Aynı zamanda karmaşık bir yapı, forklift ile yapılan yüklemelerde, kutuların forklifte temas eden yüzeylerinin düzgün olmayışı problemlere neden olabilir.

Bu çalışmada parçalar ile ilgili rotasyon kısıtı dikkate alınmış, parçaların her yönde rotasyona uğramalarına izin verilmiştir.

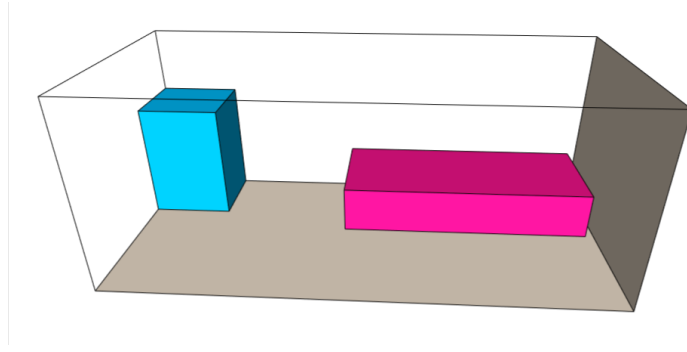
2.3. Konteyner Yükleme Problemlerinin Varsayımları

Kesme ve paketleme problemleri için bazı temel varsayımlar bulunmaktadır. Bu varsayımlar her problem türü için sabit kabul edilmektedir.

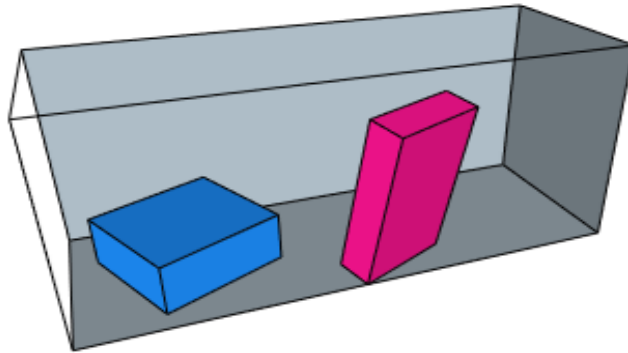
- Ortogonal kesim-yerleştirme
- Çakışmama (overlapping)
- Fiziksel boyutlar

2.3.1 Ortogonal kesim-yerleşim

Kesilecek veya yerleştirilecek parçaların tüm kenarlarının, konteyner veya büyük nesnenin kenarlarına paralel olarak yerleştirilmesi gerekir. Şekil (2.1) ve Şekil (2.2) 'de ortogonal olan ve olmayan yerleşimler verilmiştir.



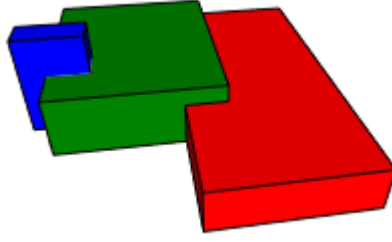
Şekil 2.1. Ortogonal yerleşim



Şekil 2.2. Ortogonal olmayan yerleşim

2.3.2 Üst üste gelmeme kısıtı

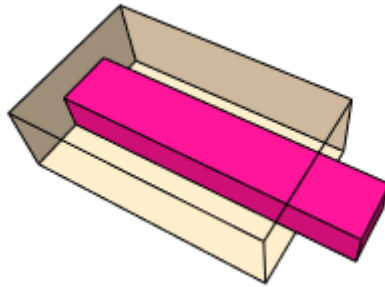
Kesilecek veya yerleştirilecek bir parçanın herhangi bir bölümünün, herhangi bir diğer parçanın bir bölümüyle kesinlikle çakışmaması gerekir. Bu kısıt bir parçanın tüm boyutları için kontrol edilir (Şekil(2.3)).



Şekil 2.3. Çakışma durumu

2.3.3 Fiziksel boyutlar

Kesilecek veya yerleştirilecek parçanın, konteynerin fiziksel boyutlarını aşmadığı varsayılır. Boyuta konteynerin boyutunu aşan bir parça o konteynere yerleştirilemez (Şekil(2.4)).



Şekil 2.4. Fiziksel boyutları aşma durumu

2.4. Kesme ve Paketleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Bu bölümde öncelikle kesme ve paketleme problemleri için farklı sınıflandırma yöntemlerinden bahsedilecek ve sonraki bölümde konteyner yükleme problemleri için sınıflandırma yapılacaktır. Bu sınıflandırmalarda literatürde yer alan [16], [17], [18] çalışmaları temel alınmıştır. Kesme ve paketleme problemleri için bazı sınıflandırma yöntemleri aşağıda verildiği gibidir:

2.4.1 Boyuta göre

Bir, bir buçuk, iki ve üç boyutlu olarak sınıflandırılır.

2.4.2 Atama çeşidine göre

Seçili büyük nesnelere kümesine atanacak amaç fonksiyonuna uygun nesnelere belirlenmesi türü çıktı-değer enbüyüklenmesi, seçili küçük nesnelere tamamının amaç fonksiyonuna uygun şekilde atanarak kullanılacak büyük nesnelere kümesinin belirlenmesi değer-girdi enküçükleme olarak sınıflandırılır.

2.4.3 Küçük nesnelere (parça, kutu vb.) çeşidine göre

- **Özdeş küçük parçalar:** Her bir parçanın en, boy ve yükseklik boyutlarının diğer parçaların boyutlarıyla aynı olduğu özdeş parçalardan oluşan sınıftır
- **Zayıf heterojen çeşitte parçalar:** Parça kümesinde bir kaç çeşit parça ve her bir parça çeşidinden belirli sayıda mevcut olan sınıftır
- **Güçlü heterojen çeşitte parçalar:** Parça kümesindeki tüm parçaların birbirinden farklı ve sadece bir adet olduğu sınıftır

2.4.4 Büyük nesnelere (konteyner, sac vb.) çeşidine göre

- **Tek büyük nesne:** Büyük nesnelere kümesi tek bir nesneden oluşur

• **Sayıli büyük nesne:** Büyük nesne kümesinin birden fazla sayıda nesneden oluştuğu sınıfıdır. Bu büyük nesnelere özdeş, zayıf heterojen veya güçlü heterojen olabilir.

2.4.5 Küçük nesnelere şekline göre

Düzenli şekilli nesnelere ve düzensiz şekilli nesnelere olmak üzere ikiye ayrılır. Düzenli şekilli nesnelere dörtgen, daire, kutu, silindir gibi tüm parçaların belirli bir şekilde olduğu kümeyi ifade eder.

Bu çalışmada ele alınan KYP, boyutuna göre üç boyutlu, atama çeşidine göre girdinin enküçüklendiği, küçük nesnelere her türde olabildiği, büyük nesne yani konteynerlerin özdeş ve ya zayıf heterojen olabildiği ve küçük nesnelere şekline göre düzenli şekilli parçalardan oluşan problemdir.

2.5. KYP'nin Sınıflandırılması

Konteyner yükleme problemleri kesme ve paketleme problemlerinin boyutuna göre üç boyutlu, atama çeşidine göre çıktı enküçükleme ve girdi enküçükleme türleri de olabilen, her türlü küçük ve büyük nesnelere içeren bir alt türüdür. KYP'nin de kendi içerisinde sınıfları bulunmaktadır. Aşağıda verilen sınıflandırma atama çeşidine göre [18]:

2.5.1 Girdinin enküçüklendiği problem türleri

• **Tek konteyner boyutlu malzeme kesme problemi (TKBMKP):** Zayıf heterojen kutu kümesinin minimum sayıda özdeş konteynerlere yüklenmesi

• **Çok konteyner boyutlu malzeme kesme problemi (ÇKBMKP):** Zayıf heterojen kutu kümesinin minimum sayıda zayıf heterojen konteynerlere yüklenmesi

• **Çoklu malzeme kesme problemi (ÇMKP):** Zayıf heterojen kutu kümesinin minimum sayıda güçlü heterojen konteynerlere yüklenmesi

• **Tek konteyner boyutlu malzeme paketleme problemi (TKBMPP):** Kuvvetli heterojen kutu kümesinin minimum sayıda özdeş konteynerlere yüklenmesi

• **Çok konteyner boyutlu malzeme paketleme problemi (ÇKBMPP):** Kuvvetli heterojen kutu kümesinin minimum sayıda zayıf heterojen konteynerlere yüklenmesi

• **Çoklu malzeme paketleme problemi (ÇMPP):** Kuvvetli heterojen kutu kümesinin minimum sayıda kuvvetli heterojen konteynerlere yüklenmesi

• **Açık boyutlu problem (ABP):** Belli bir kutu kümesinin bir veya iki boyutu değişken konteynerlere, konteynerin hacmini enküçükleyecek şekilde yüklenmesi

2.5.2 Çıktının enbüyüklediği problem türleri

• **Özdeş parça paketleme problemi (ÖPPP):** Tek bir konteynerin maksimum sayıda özdeş parçayla yüklemesi

• **Tek büyük nesne yerleştirme problemi (TBNYP):** Tek bir konteynerin, yükleme değerini enbüyükleyecek parçaların zayıf heterojen kutu kümesinden seçilerek yüklenmesi

• **Çoklu özdeş büyük nesne yerleştirme problemi (ÇÖBNYP):** Birden fazla sayıda özdeş konteynerin, yükleme değerini enbüyükleyecek parçaların zayıf heterojen kutu kümesinden seçilerek yüklenmesi

• **Çoklu heterojen büyük nesne yerleştirme problemi (ÇHBNYP):** Birden fazla çeşitte zayıf veya heterojen konteyner kümesinin, yükleme değerini enbüyükleyecek parçaların zayıf heterojen kutu kümesinden seçilerek yüklenmesi

• **Tekli sırt çantası problemi (TSP):** Tek bir konteynerin, yükleme değerini enbüyükleyecek parçaların kuvvetli heterojen kutu kümesinden seçilerek yüklenmesi

• **Çoklu özdeş sırt çantası problemi (ÇÖSP):** Birden fazla özdeş konteynerin, yükleme değerini enbüyükleyecek parçaların kuvvetli heterojen kutu kümesinden seçilerek yüklenmesi

• **Çoklu heterojen sırt çantası problemi (ÇHSP):** Birden fazla çeşitte zayıf veya heterojen konteyner kümesinin, yükleme değerini enbüyükleyecek parçaların kuvvetli heterojen kutu kümesinden seçilerek yüklenmesi

Bu çalışmada girdinin en küçüklendiği KYP türü ele alınmıştır. Zayıf heterojen kutu kümesinin minimum sayıda özdeş konteynerlere yüklendiği tek konteyner boyutlu malzeme kesme problemi (TKBMKP) ve zayıf heterojen kutu kümesinin minimum sayıda zayıf heterojen konteynerlere yüklendiği çok konteyner boyutlu malzeme kesme problemi (ÇKBMKP) için matematiksel modeller ve çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

2.6. KYP'nin Karmaşıklığı

Bir problemi çözebilen en iyi algoritmanın karmaşıklığı, o problemin karmaşıklığına eşittir[20]. Problemlerin karmaşıklığı genel olarak P ve NP olmak üzere iki gruba ayrılır. Bir problem, polinom zamanda bir deterministik makine ile çözülebiliyorsa P , polinom zamanda deterministik olmayan bir algoritma ile çözülebiliyorsa NP karmaşıklık sınıfına girer.

NP karmaşıklık sınıfı, polinom zaman içerisinde deterministik olmayan bir makine tarafından çözülebilen tüm karar problemleri kümesini temsil eder. Bir veya birden fazla karar düğümü içeren deterministik olmayan bir algorithmada, hangi düğümün seçileceğine dair bir yöntem olmadığı için çok sayıda devam noktası ve sonuç bulunur.

Bir NP karar problemi için, NP sınıfının diğer tüm problemleri polinom olarak o karar problemine indirgenebiliyorsa $NP-Tam$ olarak adlandırılır. Bir $NP-Tam$ problemini çözmek için polinom zamanlı deterministik bir algoritma mevcutsa, NP sınıfının tüm problemleri polinom zamanda çözülebilir. $NP-Tam$ problemleri ile ilişkili diğer bir grup da, $NP-Zor$ problemlerdir. Gerçek hayat problemlerinin bir çoğu için kanıtlanmış etkin algoritmalar mevcut olmadığından, bu problemler $NP-Zor$ sınıfına girer. Bu problemlerin çözümü üssel zaman gerektirir. Bu nedenle $NP-Zor$ problemlerin çözümünde sezgiseller ve metasezgiseller önemli yer tutar. Bazı problemler için, problem fonksiyonuna bağlı çözüm süreleri Çizelge (2.1)'de verildiği gibidir [20] .

Çizelge 2.1. Karmaşıklık dereceleri[20]

Karmaşıklık	$n=10$	$n=20$	$n=30$	$n=40$	$n=50$
$O(x)$	0.0001s	0.00002s	0.00003s	0.00004s	0.00005 s
$O(x^2)$	0.001 s	0.0004 s	0.0009 s	0.0016 s	0.0025 s
$O(x^5)$	0.1 s	0.32 s	24.3 s	1.7 dk	5.2 dk
$O(2^x)$	0.001 s	1.0 s	17.9 dk	12.7 gün	35.7 yıl
$O(3^x)$	0.059 s	58.0 dk	6.5 yıl	3855 yy	2×10^8 yy

Bu çalışmada ele alınan KYP endüstride sıklıkla karşılaşılan gerçek hayat problemleridir. Problemlerin çözümleri için geliştirilmiş etkin algoritmalar bulunmamaktadır. Bu sebeple KYP *NP-zor* problemler olarak tanımlanmıştır [18].

3. ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

KYP için çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çözüm yöntemlerinden kesin çözüm yöntemleri, sezgisel yöntemler ve metasezgisel yöntemler başlıkları altında bahsedilmiştir. Bahsedilen çözüm yöntemleri daha çok tez kapsamında temel alınan yaklaşımlardır.

3.1. Kesin Çözüm Yöntemleri

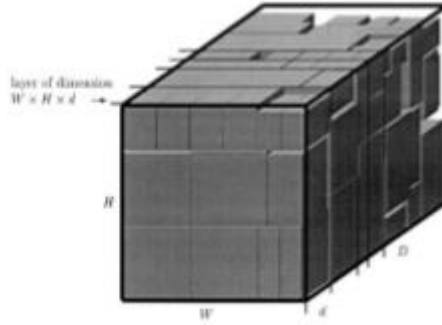
KYP ve konteyner seçim problemlerinde en iyi çözümü elde etmek için geliştirilen matematiksel modeller mevcuttur. Bu çalışmada matematiksel model olarak Chen [1] ve Westerlund[15] un çalışmalarında geliştirilen karma tamsayılı doğrusal matematiksel modeller temel alınmıştır. İki modelde de parçalar analitik düzleme birbirleri ile çakışmama ve konteynerin boyutunu aşmama temel kısıtları altında yerleştirilirler. [1]'in modelinde bir parçanın ön-sol-dip köşesinin atandığı kordinatlar bulunurken, [15] parçanın üç boyutunun orta noktalarının atandığı noktalar bulunur. Her iki modelde de parçaların her boyutta rotasyonuna izin verilmiştir. [1]'in amaç fonksiyonu boş kalan hacmin enküçüklenmesi iken, [15]'te her bir konteynerin maliyeti vardır ve amaç toplam kullanılan konteyner sayısına bağlı konteyner maliyetinin enküçüklenmesi üzerine kurulmuştur. Her iki modelde de kullanılacak konteyner kümesine ve hangi kutunun hangi konteynere atandığına karar verilir. Ancak her iki matematiksel model için de çözülmüş büyük test problemleri yoktur. Bunun nedeni büyük boyutlu problemlerde karar değişkeni ve kısıt sayısının çok olması ve modellerin uzun çözüm süresi gerektirmesidir. [1] altı parça için, derinliği ve yüksekliği belirli olan bir konteynerde uzunluğu enküçüklemek üzere çözüme ulaşmıştır. [15] ise on üç parça dört konteyner için modeli çözdürmüştür. İlerleyen bölümlerde bu modellerin konteyner çeşitlerini dikkate alınarak kurulmuş versiyonları geniş bir şekilde anlatılacaktır.

3.2. Sezgisel Yöntemler

KYP'nin çözümü için çok sayıda sezgisel geliştirilmiştir. Bu çalışmada George ve Robinson [5] tarafından geliştirilen duvar inşa (Wall building) sezgiseli temel alınarak bir sezgisel geliştirilmiştir. Bu sezgisel literatürde en yaygın ve farklı şekillerde değiştirilerek kullanılan sezgiseldir. Bu sezgisel konteyner boyunca katmanlar oluşturularak konteyneri doldurmaya çalışır.

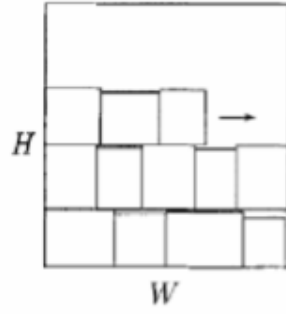
İlk olarak konteyner bir katmana ayrılır. Katman belirlendikten katlar oluşturularak bu katman doldurulur. Bu işlem konteynerde katman oluşturmak için yer kalmayıncaya kadar devam ettirilir. Burada iki önemli durum mevcuttur; katman derinliğinin belirlenmesi ve katmanların doldurulma şekli:

- **Katman derinliğinin belirlenmesi:** Yüklenmemiş her parçanın üç boyutundan en kısa olan boyutu alınır ve bu boyuta göre parçalar büyükten küçüğe sıralanır. İlk sırada yer alan parçanın bu en kısa olan boyutu katmanın derinliği olarak belirlenir. En uzun boyutu ise, konteynerin derinliğine paralel olacak şekilde yerleştirilir (Şekil (3.1)).



Şekil 3.1. Katmanlara ayrılmış konteyner [5]

- **Katmanların doldurulması:** Katmanı başlatan ilk parça yerleştirildikten sonra öncelik sırası gelen parça, bu parçayı takiben katmanda yer kalmayıncaya kadar katlar halinde yerleştirilir (Şekil (3.2)).



Şekil 3.2. Bir katmanın görünüşü [5]

Kutu kümesi $N=4$ için örnek parça boyutları Çizelge (3.1)'de verildiği gibi olsun:

Nadet kutu; $i=1,2,3,4$

l_i :i. kutunun uzunluğu

w_i :i. kutunun derinliği

h_i :i. kutunun yüksekliği

Çizelge 3.1. Örnek parça boyutları

Kutu	l	w	h	minimum
1	7	3	2	2
2	6	16	10	6
3	11	5	7	5
4	4	9	12	4

Bu durumda en yüksek önceliğe sahip kutu 2. kutu, en düşük önceliğe sahip kutu ise 1. kutu olur ve katmanın derinliği 6 olur.

Biscoff ve Marriott [bismar] farklı öncelik belirleme ve yükleme sezgisellerini kıyaslayan bir çalışma yapmışlardır. Katman derinliğinin belirlenmesi önemli bir konu olduğu için farkı varyasyonlar önermişlerdir. Bunlar:

- Kutuların en küçük boyutlarının büyükten küçüğe sıralanmasına göre sınıflandırma,
- Henüz yüklenmemiş kutuların sayısının büyükten küçüğe sıralanmasına göre sınıflandırma,

- Kutuların hacimlerinin büyükten küçüğe sıralanmasına göre sınıflandırma,
- Kutuların en küçük boyutlarının küçükten büyüğe sıralanmasına göre sınıflandırma,
- Henüz yüklenmemiş kutuların sayısının küçükten büyüğe sıralanmasına göre sınıflandırma,
- Kutuların hacimlerinin küçükten büyüğe sıralanmasına göre sınıflandırmadır.

3.3. Metasezgiseller

Metasezgiseller, zor ve çözümünü uzun süre gerektiren problemler için makul sürede kabul edilebilir sonuçlar veren kesin olmayan çözüm yöntemleridir. Literatüre Glover [21] tarafından tanımlanan metasezgiseller, farklı şekillerde sınıflandırılırlar [20] :

- Doğayı taklit edip etmemelerine göre: Yapay bağışıklık sistemi biyolojiden; karınca ve arı kolonileri, sürü zekasından parçacık sürü optimizasyonu farklı canlı türlerinden ve tavlama benzetimi fizikten ilham alan metasezgisellerdir.

- Hafızalı olup olmamalarına göre metasezgiseller: Bazı metasezgiseller arama esnasında hafıza kullanmazlar. Yerel arama, tavlama benzetimi, GRASP hafızasız metasezgisellerden bazılarıdır. Bazı metasezgisellerde ise geçmiş bilgiler arama esnasında dikkate alınır. Yasaklı aramada kısa ve uzun süreli hafızaların bulunması gibi.

- Deterministik veya rassal olmalarına göre metasezgiseller: Yerel arama, yasaklı arama gibi metasezgiseller deterministik kararlar vererek arama yaparlar. Bu metasezgisellerde aynı başlangıç çözüm her defasında aynı sonucu verir. Tavlama benzetimi gibi metasezgisellerde ise rassal kurallar uygulanır.

- Tek çözüm veya popülasyon temelli metasezgiseller: Yerel arama, tavlama benzetimi gibi algoritmalarda arama tek çözüm üzerinden devam ettirilir, daha çok yerel en iyilemede güçlüdürler. Popülasyon temelli metasezgiseller ise daha çok çözüm uzayında çeşitlendirmeyi sağlayarak farklı bölgelerde çözüm ararlar (Genetik algoritma vb.).

• İteratif veya açgözlü çözüme göre metasezgiseller: İteratif algoritmalar tam bir çözümlerle başlarlar ve bazı operatörler aracılığıyla her iterasyonda değişime uğrarlar. Açgözlü algoritmalarda ise başlangıç çözüm boştur ve tam çözüm elde edilinceye kadar devam edilir. Metasezgisellerin çoğu iteratif algoritmalarıdır.

Bu çalışmada tavlama benzetimi üzerinde durulacağından, bu metasezgisel hakkında bazı bilgiler verilecektir.

Literatüre Kirkpatrick [27] tarafından tanıtılan tavlama benzetimi doğadan ilham alan bir metasezgiseldir. Madde ilk önce ısıtılır ve yavaş yavaş soğutulur. Burada amaç daha güçlü bir kristal yapı elde etmektir. Burada maddenin ne kadar ısıtıldığı ve ne hızla soğutulduğu önemlidir. Hızlı bir soğutma veya yeterince ısıtmama kristalin kusurlu oluşmasına sebep verebilmektedir ve bulunan her sıcaklık seviyesinde dengeye ulaşmak zorlaşmaktadır.

Tavlama benzetimi tek bir çözümlerle başlayıp bu çözümün varyasyonları ile devam eden bir algoritma olduğundan tek çözüm temellidir ve önceki çözümler arama esnasında dinamik olarak kullanılmadığından hafızalı değildir. İyileştirme sağlamayan bir komşu çözümün seçilmesinde rassal kurallar uygulandığından deterministik değil rassal bir algoritmadır.

Tavlama benzetimi bir başlangıç çözümlerle başlar ve her iterasyonda bir komşu çözüm oluşturulur. Oluşturulan komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri eldeki çözümlerden daha iyi ise o çözüm her zaman kabul edilir. Komşu çözüm daha kötü ise, bu çözüm bir olasılık fonksiyonu değerine göre kabul ya da reddedilir. Burada kötü çözümün kabul edilmesindeki temel amaç, yerel en iyiden kaçarak farklı bölgelerde sonuç aramaktır. Algoritma ilerledikçe, kötü çözümlerinin kabul edilme olasılığı azalır. Bu işlemler her sıcaklıkta ve durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder.

Tavlama benzetiminin parametreleri:

T_{max} : Başlangıç sıcaklık

T_{min} : Son sıcaklık

T : Seviye sıcaklığı

$g(t)$: Sıcaklık fonksiyonu

ΔE : Komşu çözüm ile mevcut çözüm amaç fonksiyonları değeri farkı

$P(\Delta E, T)$: Değişim kabul olasılığı

$f(s)$: Amaç fonksiyonu değeri

$f(s')$: Komşu çözüm amaç fonksiyonu değeri

R: Olasılık kabul değeri

$$P(\Delta E, T) = e^{-\frac{f(s')-f(s)}{T}}$$

Tavlama benzetiminin adımları:

•**Adım 1** : Başlangıç çözümü oluştur

$$s=s_0, \quad T=T_{\max}$$

Denge durumuna ulaşıncaya kadar Adım 2 yi tekrar et

•**Adım 2** : Rassal komşu çözüm oluştur, amaç fonksiyonları değeri farkını hesapla

$\Delta E=f(s')-f(s)$ $\Delta E \leq 0$ ise komşu çözümü kabul et ($s=s'$)

$\Delta E > 0$ ise $P(\Delta E, T)$ olasılığını hesapla

$P(\Delta E, T) > R$ ise komşu çözümü kabul et ($s=s'$)

$P(\Delta E, T) \leq R$ ise çözümü reddet Denge durumuna ulaşıldıysa, adım

3'e git

•**Adım 3** : Durdurma kriteri sağlanmamışsa ($T > T_{\min}$) sıcaklığı güncelle ve Adım 2'ye dön,

$$T=g(t)$$

Durdurma kriteri sağlanmışsa ($T < T_{\min}$),

Çıktı= Bulunan en iyi sonuç

4. SKALERLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

KYP'nin çok amaçlı olarak ele alınması gerçek hayat problemlerinin çözümü için önemli bir konudur. Hacim kaybının enküçüklemesine ek olarak, kullanılan konteyner çeşit sayısının enküçüklenmesi bir çok fayda sağlamaktadır. Özellikle lojistik faaliyetlerde kullanılan konteyner çeşit sayısı minimumda tutmak, maliyeti düşürecek, ürün ve ürünlerin taşındığı kasa ve kutu türlerinin ve tasarımlarının belirlenmesinde homojenlik sağlayacak ve nakliye ve satın alımlarda iskonto getirebilecektir. Bu nedenlerle bu çalışmada ele alınan matematiksel modeller ve matematiksel model temelli sezgisel yöntem çok amaçlı olarak da ele alınmıştır ve farklı skalerleştirme yöntemleri kullanılmıştır.

Çok amaçlı bir probleminin, gerçek değerli bir amaç fonksiyonuna sahip uygun bir skaler optimizasyon problemi ile değiştirilmesine skalerleştirme denmektedir. Skalerleştirme fonksiyonları aracılığıyla, çok amaçlı bir optimizasyon problemi tek amaçlı hale getirilebilir. Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi, Epsilon kısıt yöntemi, Benson skalerleştirme yöntemi ve Konik skalerleştirme yöntemi en yaygın kullanılan skalerleştirme yöntemlerindedir. Bu çalışmada Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi ve Konik skalerleştirme yöntemi kullanılmıştır. Bazı genel kavramlar ve tanımlar aşağıda verildiği gibidir:

Negatif olmayan reel sayılar kümesi şu şekilde tanımlanmıştır; $\mathbb{R}_+^n := \{y = (y_1, \dots, y_n) : y_i \geq 0, i = 1, \dots, n\}$, ve $Y \subset \mathbb{R}^n$ boş olmayan bir kümedir. \mathbb{R}^n 'de boş olmayan C alt kümesi, eğer $y \in C \lambda \geq 0 \Rightarrow \lambda y \in C$ ise *koni* olarak adlandırılır.

\mathbb{R}^n kümesi, $C \subset \mathbb{R}^n$ şeklindeki bir koni tarafından kısmi sıralanmış kabul edilir.

Tanım 1 [22]

- $y \in Y$ noktası eğer $(\{y\} - C) \cap Y = \{y\}$ ise Y 'nin (C sıralama konisine göre) minimal noktasıdır.
- $y \in Y$ noktası eğer $(\{y\} - \text{int}(C)) \cap Y = \emptyset$ ise zayıf minimal nokta olarak adlandırılır.
- Bir $y \in Y$ noktası eğer y noktası Y 'nin minimal noktası ve \mathbb{R}^n 'nin sıfır noktası $\text{cone}(Y) := \{\lambda y : \lambda \geq 0, y \in Y\}$ iken $\text{cl}(\text{cone}(Y + C -$

$\{y\}$)'nin minimal noktası ise \mathbb{Y} kümesinin Benson anlamda has minimal noktasıdır.

- $\bar{Y} \in \mathbb{Y}$ noktası, eğer $\mathbb{C} \setminus \{\mathbf{0}_{\mathbb{R}^n}\} \subset \text{int}\mathbb{C}$ iken bir \mathbb{K} konisine göre \mathbb{Y} kümesinin minimal noktası ise Henig anlamda has minimal nokta olarak adlandırılır.

Çok amaçlı optimizasyon problemi aşağıda verilmiştir;

$$\min_{\{x \in \mathbb{X}\}} [f_1(x), \dots, f_n(x)], \quad (4.1)$$

\mathbb{X} uygun çözümlerin boş olmayan bir kümesi ve $f_i : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, n$ gerçekteğerli fonksiyonlar olsun. Her $x \in \mathbb{X}$ için $f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))$ ve $\mathbb{Y} := f(\mathbb{X})$ olsun.

Tanım 2 [18] Eğer $y = f(x)$ noktası \mathbb{Y} kümesinin minimal, zayıf minimal yada has minimal noktası ise bir $x \in \mathbb{X}$ uygun çözümü, (4.1) probleminin etkin, zayıf etkin yada has etkin çözümüdür.

\mathbb{C} konisi \mathbb{R}^n 'de verilsin. \mathbb{C} konisinin dual konisi \mathbb{C}^* ve quasi-iç konisi $\mathbb{C}^\#$ şu şekilde tanımlanır;

$$\mathbb{C}^* = \{y^* \in \mathbb{R}^n : y^{*T}y \geq 0 \text{ for all } y \in \mathbb{C}\} \quad (4.2)$$

ve

$$\mathbb{C}^\# = \{y^* \in \mathbb{R}^n : y^{*T}y > 0 \text{ for all } y \in \mathbb{C} \setminus \{0\}\}, \quad (4.3)$$

y^{*T} vektörü, y^* vektörünün transpozu, $y^{*T}y = \sum_{i=1}^n y_i^* y_i$ ise $y^* = (y_1^*, \dots, y_n^*)$ ve $y = (y_1, \dots, y_n)$ vektörlerinin skaler çarpımıdır.

İzleyen üç koni genişletilmiş dual koniler olarak adlandırılır ve [20] çalışmasında tanıtılmıştır.

$$\mathbb{C}^{a*} = \{(y^*, \alpha) \in \mathbb{C}^\# \times \mathbb{R}_+ : y^{*T}y - \alpha\|y\| \geq 0 \text{ for all } y \in \mathbb{C}\}, \quad (4.4)$$

$$\mathbb{C}^{a0} = \{(y^*, \alpha) \in \mathbb{C}^\# \times \mathbb{R}_+ : y^{*T}y - \alpha\|y\| > 0 \text{ for all } y \in \text{int}(\mathbb{C})\}, \quad (4.5)$$

ve

$$\mathbb{C}^{a\#} = \{(y^*, \alpha) \in \mathbb{C}^\# \times \mathbb{R}_+ : y^{*T}y - \alpha\|y\| \geq 0 \text{ for all } y \in \mathbb{C} \setminus \{0\}\}, \quad (4.6)$$

\mathbb{C}^{a0} konisinin tanımında \mathbb{C} konisinin boş olmadığı varsayılmıştır. $\mathbb{C}^{a*}, \mathbb{C}^{a0}$ ve $\mathbb{C}^{a\#}$ konileri arasındaki izleyen ilişki, tanımlarından çıkarılmaktadır;

$$\mathbb{C}^{a\#} \subset \mathbb{C}^{a0} \subset \mathbb{C}^{a*}.$$

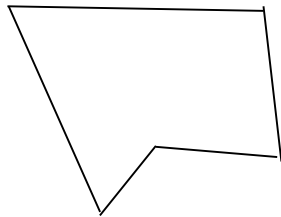
4.1. Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi

Gass ve Saaty [26] tarafından 1955'te ortaya koyulan Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde en yaygın kullanılan yöntemdir. Her bir amaç bir ağırlık katsayısı ile ilişkilendirilir ve amaçların ağırlıklandırılmış toplamı ile oluşturulmuş fonksiyon en iyilenmeye çalışılır.

Her w_i ($w_i \geq 0$) ağırlığı bir $f_i(x)$ ($i=1, \dots, n$) amaç fonksiyonu ile ilişkilendirdiğinde, skaler problem aşağıda verildiği şekilde olacaktır:

$$\min_{\{x \in \mathbb{X}\}} \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (WSS(w))$$

Eğer uygun çözüm alanının amaç uzayındaki görüntü kümesi Şekil (4.1)'deki gibi dışbükey değilse, yöntem bu kısımlara amaç fonksiyonlarının konveks bileşelerini en iyileyerek ulaşamaz. Ancak amaç uzayı konveks ise bu yöntemle zayıf ve has etkin çözümlerin tamamına ulaşılabilir.



Şekil 4.1. Dışbükey olmayan görüntü kümesi

4.2. Konik Skalerleştirme Yöntemi

Konik skalerleştirme yöntemi Gasimov ([23],[24],[25]) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem ile Y amaç uzayının konveks yada konveks olmadığı durumlarda zayıf ve has etkin çözümlerin hepsi elde edilebilir. Bu yöntem ile karar

vericinin tercihlerini yansıtan, amaç fonksiyonu ağırlıkları ile referans noktası dikkate alınır ve yöntem referans noktasının seçimi konusunda bir kısıtlama getirmez. Bu yöntemle göre skaler optimizasyon problemi aşağıda verildiği gibidir:

$$\min_{\{x \in \mathbb{X}\}} \sum_{i=1}^n w_i (f_i(x) - a_i) + \alpha \sum_{i=1}^n |f_i(x) - a_i| \quad (CS(w, \alpha, a))$$

$a = (a_1, \dots, a_n)$ referans noktası bir karar verici tarafından, belli bir noktaya yakın enküçük noktaların hesaplanması istendiğinde tanımlanabilir. Konik skalerleştirme yöntemi, referans noktalarının belirlenmesi durumunda herhangi bir kısıtlama getirmez. Referans noktaları keyfi olarak seçilebilir. Verilen skaler problemin çözümler kümesi $Sol(CS(w, \alpha, a))$ ile tanımlanmıştır.

Teorem: $\mathbb{Y} \cap \mathbb{R}^n$ boş olmayan bir küme, $a \in \mathbb{R}^n$ verilen bir referans noktası ve $\mathbb{C} = \mathbb{C}$ olsun. $(w, \alpha) \in \mathbb{C}^{a^*}$ olarak verilsin ve bir $(w, \alpha) \in \mathbb{C}^{a^*}$ çifti için $Sol(CS(w, \alpha, a)) = \emptyset$ olduğunu varsayalım. Buna göre;

- Eğer $(w, \alpha) \in \mathbb{C}^{a^0} = \{(w_1, \dots, w_n), \alpha) : 0 \leq \alpha < w_i, w_i > 0 \ i = 1, \dots, n\}$ ise ve $w_k > \alpha$ olacak şekilde $k \in \{1, \dots, n\}$ var ise o zaman $Sol(CS(w, \alpha, a))$ kümesinin her noktası (4.1) probleminin zayıf etkin çözümdür.
- $Sol(CS(w, \alpha, a))$ kümesinin tek bir elemanı var ise o eleman (4.1) probleminin etkin çözümdür.
- Eğer $(w, \alpha) \in \mathbb{C}^{a^\#} = \{(w_1, \dots, w_n), \alpha) : 0 \leq \alpha < w_i, i = 1, \dots, n\}$ o zaman $Sol(CS(w, \alpha, a))$ kümesinin her noktası (4.1) probleminin (Benson yada Henig) has etkin çözümdür. Yine aynı şekilde eğer \bar{x} (4.1) probleminin (Benson yada Henig) has etkin çözümlü ise o zaman $(w, \alpha) \in \mathbb{C}^{a^\#}$ ve $a \in \mathbb{R}^n$ referans noktası vardır.

5. TEZ KAPSAMINDA KYP İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELLER

Bu bölümde KYP için bir amaçlı ve iki amaçlı geliştirilen matematiksel modellere yer verilmiştir. Geliştirilen karma tamsayılı matematiksel modellerde V adet konteyner çeşidi ve her bir çeşitten önceden belirlenmiş sayıda konteyner bulunmaktadır. Toplam talebi N adet olan kutular , kullanılacak toplam konteyner sayısı yada boş kalan hacim enküçüklenecek şekilde parçaların rotasyonlarına her yönde izin verilerek yerleştirilir.

5.1. KYP için Karma Tamsayılı Matematiksel Model

Bu bölümde KYP için geliştirilen model Chen [1]'in önerdiği matematiksel model temel alınarak geliştirilmiştir. Chen [1]'in modelinde tüm parça ve konteynerler bağımsız girdi iken, bu modelde konteynerler bağımsız girdi değil ait oldukları çeşite göre tanımlanır. Örneğin iki çeşit konteyner ve bu konteynerlerden onar adet konteyner olsun. [1]'in modelinde yirmi adet konteyner birbirinden bağımsız girdi olarak tanımlanırken, önerilen modelde çeşitler ve bu çeşitlere ait konteynerler belirlidir. Kullanım önceliği belirleme, çeşit sayısı minimizasyonu gibi çeşit faktörünün önemli olduğu durumlar için, konteynerlerin çeşitlerine bağımlı olarak tanımlanması kolaylık sağlayacaktır.

5.1.1 Kümeler ve parametreler

Kullanılacak kümeler şu şekildedir;

$i = 1, \dots, N$; parça sayısı

$j = 1, \dots, V$; konteyner çeşitleri

$t = 1, \dots, m_j$; her bir konteyner çeşidinden mevcut konteyner sayısı

Parametreler;

p_i : i . kutunun uzunluğu

q_i : i . kutunun derinliği

r_i : i . kutunun yüksekliği

L_j : j . konteyner çeşidinin uzunluğu

W_j : j . konteyner çeşidinin derinliği

H_j : j . konteyner çeşidinin yüksekliği

m_j : j . konteyner çeşidine ait mevcut konteyner sayısı

m_j sayısı parametre olarak eldeki miktara bağlı verilebileceği gibi, sonsuz sayıda kabul edilerek maksimum sayı parça talep sayısı kadar da alınabilir.

5.1.2 Karar değişkenleri

$$s_{ijt} = \begin{cases} 1, & i. kutu j. konteyner çeşitinin t. konteynerine atanırsa \\ 0, & diğer durumlarda \end{cases}$$

$$n_{jt} = \begin{cases} 1, & j. konteyner çeşitinin t. konteyneri kullanılırsa \\ 0, & diğer durumlarda \end{cases}$$

x_i, y_i, z_i : i . kutunun sol-ön-dip başlangıç koordinatlarını gösteren sürekli

değişkenler

$$l_{xi} = \begin{cases} 1, & i. kutunun uzunluğu X eksenine paralel ise \\ 0, & dd \end{cases}$$

$$l_{yi} = \begin{cases} 1, & i. kutunun uzunluğu Y eksenine paralel ise \\ 0, & dd \end{cases}$$

$$l_{zi} = \begin{cases} 1, & i. kutunun uzunluğu Z eksenine paralel ise \\ 0, & dd \end{cases}$$

$$w_{xi} = \begin{cases} 1, & i. kutunun derinliği X eksenine paralel ise \\ 0, & dd \end{cases}$$

$$w_{yi} = \begin{cases} 1, & i. kutunun derinliği Y eksenine paralel ise \\ 0, & dd \end{cases}$$

$$w_{hi} = \begin{cases} 1, & i. kutunun derinliği Z eksenine paralel ise \\ 0, & dd \end{cases}$$

$$h_{xi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun yüksekliği } X \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$h_{yi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun yüksekliği } Y \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$h_{zi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun yüksekliği } Z \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$a_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun solunda ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$b_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun sağında ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$c_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun önünde ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$d_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun arkasında ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$e_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun altında ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$f_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun üzerinde ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

5.1.3 Matematiksel model

$$\min \sum_{j=1}^V \sum_{t=1}^{m_j} L_j W_j H_j n_{jt} - \sum_{i=1}^N p_i q_i r_i \quad (5.1)$$

$$x_i + p_i l_{i,xi} + q_i w_{i,xi} + r_i h_{i,xi} \leq x_k + (1 - a_{ik}) M \quad \forall i \quad \forall k \quad i < k \quad (5.2)$$

$$x_k + p_k l_{kxk} + q_k w_{kxk} + r_k h_{kxk} \leq x_i + (1 - b_{ik})M \quad \forall i \quad \forall k \quad i < k \quad (5.3)$$

$$y_i + p_i l_{iyi} + q_i w_{iyi} + r_i h_{iyi} \leq y_k + (1 - c_{ik})M \quad \forall i \quad \forall k \quad i < k \quad (5.4)$$

$$y_k + p_k l_{kyk} + q_k w_{kyk} + r_k h_{kyk} \leq y_i + (1 - d_{ik})M \quad \forall i \quad \forall k \quad i < k \quad (5.5)$$

$$z_i + p_i l_{izi} + q_i w_{izi} + r_i h_{izi} \leq z_k + (1 - e_{ik})M \quad \forall i \quad \forall k \quad i < k \quad (5.6)$$

$$z_k + p_k l_{zk} + q_k w_{zk} + r_k h_{zk} \leq z_i + (1 - f_{ik})M \quad \forall i \quad \forall k \quad i < k \quad (5.7)$$

$$a_{ik} + b_{ik} + c_{ik} + d_{ik} + e_{ik} + f_{ik} \geq s_{ijt} + s_{kjt}^{-1} \quad \forall i \quad \forall k \quad \forall j \quad \forall t \quad i < k \quad (5.8)$$

$$\sum_{j=1}^v \sum_{t=1}^{m_j} s_{ijt} = 1 \quad \forall i \quad (5.9)$$

$$\sum_{i=1}^N s_{ijt} \leq M n_{jt} \quad \forall j \quad \forall t \quad (5.10)$$

$$x_i + p_i l_{ixi} + q_i w_{ixi} + r_i h_{ixi} \leq L_j + (1 - s_{ijt})M \quad \forall i \quad \forall j \quad \forall t \quad (5.11)$$

$$y_i + p_i l_{iyi} + q_i w_{iyi} + r_i h_{iyi} \leq W_j + (1 - s_{ijt})M \quad \forall i \quad \forall j \quad \forall t \quad (5.12)$$

$$z_i + p_i l_{izi} + q_i w_{izi} + r_i h_{izi} \leq H_j + (1 - s_{ijt})M \quad \forall i \quad \forall j \quad \forall t \quad (5.13)$$

$$l_{xi} + l_{yi} + l_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (5.14)$$

$$w_{xi} + w_{yi} + w_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (5.15)$$

$$h_{xi} + h_{yi} + h_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (5.16)$$

$$l_{xi} + w_{xi} + h_{xi} = 1 \quad \forall i \quad (5.17)$$

$$l_{yi} + w_{yi} + h_{yi} = 1 \quad \forall i \quad (5.18)$$

$$l_{zi} + w_{zi} + h_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (5.19)$$

Yukarıdaki karma tamsayıli matematiksel modele göre, amaç fonksiyonu tüm kutular yüklendikten sonra kullanılan konteynerlerde kalan boş hacmin enküçüklenmesidir (5.1). Kısıt (5.2) ve (5.3) parçaların x ekseninde birbirleri ile çakışıp çakışmadığını kontrol eder. Aynı şekilde (5.4) ve (5.5) kısıtları y, (5.6) ve (5.7) kısıtları da parçaların z eksenindeki çakışmaları kontrol eder. (5.8) kısıtı ise parçalar aynı konteynere atandığı zaman (5.2)-(5.7) kısıtlarının kontrolünü garanti eder. (5.9) kısıtı bir parçanın bir konteyner çeşidinin bir konteynerine mutlaka atanmasını sağlar. (5.10) kısıtına göre de bir konteyner çeşidinin bir konteynerine parça atandığı zaman, o konteyner kullanılmıştır. Bir konteyner çeşidinin bir konteynerine atanmış bir parçanın, o konteynerin boyutlarını aşamayacağı (5.11-5.13) kısıtları ile sağlanır. Bir parçanın uzunluğu x,y,z eksenlerinden sadece birine paraleldir (5.14). Aynı şekilde bir parçanın derinliği x,y,z eksenlerinden sadece birine (5.15) ve yüksekliği de x,y,z eksenlerinden sadece birine paraleldir (5.16). Bir parçanın ya uzunluğu, ya derinliği ya da yüksekliği x eksenine paraleldir (5.17) ve bu kısıtlar y ve z eksenleri için de geçerlidir (5.18-5.19).

5.1.4 İki amaçlı karma tamsayılı matematiksel model

Gerçek hayat problemlerinde kullanılan konteyner çeşit sayısının fazla olması ek maliyetlere ve belirsizliklere sebep olabilir. Kullanılan çeşitlerin mümkün olduğunca homojen olması ürünlerin yerleşimi, kasa ve kutuların tasarımı ve lojistik faaliyetlerin kolaylaşması anlamında fayda sağlar. Bununla birlikte az çeşitte büyük sayılarda anlaşma yapma veya satın alımlarda maliyet de azaltılabilir. Bu nedenle mümkün olduğunca az çeşitte konteyner kullanmak, bu tür gerçek hayat problemlerine çözüm oluşturur. Bu nedenle bir önceki bölümde verilen karma tamsayılı matematiksel modele bir 0-1 tamsayılı karar değişkeni, amaç fonksiyonu ve kısıt ilave edilir.

$$g_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ konteyner çeşidi kullanılıyorsa} \\ 0, & d. d. \end{cases}$$

$$\min \sum_{j=1}^v g_j \quad (5.20)$$

$$\sum_{p,t=1}^{m_j} n_{jt} \leq M g_j \quad \forall j \quad (5.21)$$

Kullanılan konteyner çeşit sayısını enküçükmek üzere ikinci amaç fonksiyonu olarak (5.20) denklemi eklenir. Kısıt (5.21) ile de bir konteyner çeşidinin kullanılıp kullanılmadığı kontrol edilir

5.2. KYP için Parçaların Orta Noktasını Eksenlere Atayan Karma Tamsayılı Matematiksel Model

Westerlund [15]'un önerdiği matematiksel modelde de yine tüm parçalar ve konteynerler bağımsız girdi olarak tanımlanmıştır. Her bir konteynerin kullanım maliyeti vardır ve amaç fonksiyonu bu maliyetin en küçülenmesine yönelik kurulmuştur. Önceki bölümde önerilen modelde olduğu gibi bu modelde de konteyner çeşitleri ve bu çeşitlere ait konteyner sayıları dikkate alınmıştır. Amaç

fonksiyonu ise hacim kaybının enküçüklenmesine yönelik kurulmuştur. Önceki bölümde ve bu bölümde önerilen modellerde temel mantık parçaların üç boyutlu analitik düzleme atanması olsa da ek kısıtlar ve sonuçların yorumlanması anlamında farklılıklar vardır. Bu modelde çözüm kolaylığı sağlaması açısından parçaların toplam hacmi, kullanılan konteynerlerin toplam hacminden küçük olmalıdır kısıtı mevcuttur. Bir önceki modelde parçalar ön, sol, dip köşelerine göre eksenlere atanırken bu modelde parçanın orta noktalarına göre bir atama yapılmaktadır ve kısıtlar buna bağlı değişmektedir. Önceki bölümde verilen modelde parçanın hangi boyutunun hangi eksene atandığı bilgisine (5.15-5.19) kısıtlarının yorumlanması ile ulaşılrken, bu model bir parçanın x,y,z eksenlerine atanan boyutları vermektedir.

5.2.1 Kümeler ve parametreler

Kullanılacak kümeler şu şekildedir:

$$i=1,\dots,N$$

$$j=1,\dots,V$$

$$t = 1, \dots, m_j$$

Parametreler;

L_j :j. konteyner çeşidinin uzunluğu

W_j :j. konteyner çeşidinin derinliği

H_j :j. konteyner çeşidinin yüksekliği

m_j :j. konteyner çeşidine ait mevcut konteyner sayısı

p_i :i. kutunun uzunluğu

q_i :i. kutunun derinliği

r_i :i. kutunun yüksekliği

5.2.2 Karar değişkenleri

Yukarıda verilenlere göre tanımlanan tamsayı ve 0-1 karar değişkenleri aşıağıda verilmiştir;

$$s_{ijt} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } j. \text{ konteyner çeşitinin } t. \text{ konteynerine atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$n_{jt} = \begin{cases} 1, & j. \text{ konteyner çeşitinin } t. \text{ konteyneri kullanılırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$G_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu ile } k. \text{ kutu aynı konteynerde atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

X_i : i. kutunun x eksenindeki boyutu

Y_i : i. kutunun y eksenindeki boyutu

Z_i : i. kutunun z eksenindeki boyutu

x_i : i. kutunun orta noktasının x ekseninde atandığı noktanın koordinatı

y_i : i. kutunun orta noktasının y ekseninde atandığı noktanın koordinatı

z_i : i. kutunun orta noktasının z ekseninde atandığı noktanın koordinatı

CCX_i : i. kutunun yerleştirildiği konteynerin uzunluğu

CCY_i : i. kutunun yerleştirildiği konteynerin derinliği

CCZ_i : i. kutunun yerleştirildiği konteynerin yüksekliği

$$l_{xi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun uzunluğu } X \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$l_{yi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun uzunluğu } Y \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$l_{zi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun uzunluğu } Z \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$w_{xi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun derinliği } X \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$w_{yi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun derinliği } Y \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$w_{hi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun derinliği } Z \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$h_{xi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun yüksekliği } X \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$h_{yi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun yüksekliği } Y \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$h_{zi} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutunun yüksekliği } Z \text{ eksenine paralel ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$a_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun solunda ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$b_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun sağında ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$c_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun önünde ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$d_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun arkasında ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$e_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun altında ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

$$f_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } k. \text{ kutunun üzerinde ise} \\ 0, & \text{dd} \end{cases}$$

5.2.3 Matematiksel model

$$\min \sum_{j=1}^v \sum_{t=1}^{m_j} L_j W_{jH_j} n_{jt} - \sum_{i=1}^n p_i q_i r_i \quad (5.22)$$

$$\frac{X_i + X_k}{2} \leq x_i - x_k + (a_{ik} + b_{ik})M \quad \forall i, k \quad i < k \quad (5.23)$$

$$\frac{X_i + X_k}{2} \leq x_k - x_i + (a_{ik} - b_{ik} + 1)M \quad \forall i, k \quad i < k \quad (5.24)$$

$$\frac{Y_i + Y_k}{2} \leq y_i - y_k + (c_{ik} + d_{ik})M \quad \forall i, k \quad i < k \quad (5.25)$$

$$\frac{Y_i + Y_k}{2} \leq y_k - y_i + (c_{ik} - d_{ik} + 1)M \quad \forall i, k \quad i < k \quad (5.26)$$

$$\frac{Z_i + Z_k}{2} \leq z_i - z_k + (e_{ik} + f_{ik})M \quad \forall i, k \quad i < k \quad (5.27)$$

$$\frac{Z_i + Z_k}{2} \leq z_k - z_i + (e_{ik} - f_{ik} + 1)M \quad \forall i, k \quad i < k \quad (5.28)$$

$$a_{ik} + c_{ik} + e_{ik} + G_{ik} \leq 3 \quad \forall i \quad \forall k \quad i < k \quad (5.29)$$

$$\sum_{j=1}^v \sum_{t=1}^{m_j} s_{ijt} = 1 \quad \forall i \quad (5.30)$$

$$\sum_{i=1}^N s_{ijt} \leq M n_{jt} \quad \forall j \quad \forall t \quad (5.31)$$

$$s_{ijt} + s_{kjt} \leq G_{ik} + 1 \quad \forall j \quad \forall t \quad (5.32)$$

$$X_i = p_i l_{ixi} + q_i w_{ixi} + r_i h_{ixi} \quad \forall i \quad (5.33)$$

$$Y_i = p_i l_{iyi} + q_i w_{iyi} + r_i h_{iyi} \quad \forall i \quad (5.34)$$

$$Z_i = p_i l_{izi} + q_i w_{izi} + r_i h_{izi} \quad \forall i \quad (5.35)$$

$$l_{ixi} + l_{iyi} + l_{izi} = 1 \quad \forall i \quad (5.36)$$

$$w_{xi} + w_{yi} + w_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (5.37)$$

$$h_{xi} + h_{yi} + h_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (5.38)$$

$$l_{xi} + w_{xi} + h_{xi} = 1 \quad \forall i \quad (5.39)$$

$$l_{yi} + w_{yi} + h_{yi} = 1 \quad \forall i \quad (5.40)$$

$$l_{zi} + w_{zi} + h_{zi} = 1 \quad \forall i \quad (5.41)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i q_i r_i s_{ijt} \leq L_j W_j H_j n_{jt} \quad \forall j \quad \forall t \quad (5.42)$$

$$x_i \geq \frac{X_i}{2} \quad \forall i \quad (5.43)$$

$$y_i \geq \frac{Y_i}{2} \quad \forall i \quad (5.44)$$

$$z_i \geq \frac{Z_i}{2} \quad \forall i \quad (5.45)$$

$$x_i \leq CCX_i - \frac{X_i}{2} \quad \forall i \quad (5.46)$$

$$y_i \leq CCY_i - \frac{Y_i}{2} \quad \forall i \quad (5.47)$$

$$z_i \leq CCZ_i - \frac{Z_i}{2} \quad \forall i \quad (5.48)$$

$$CCX_i = \sum_{j=1}^v \sum_{t=1}^{m_j} s_{ijt} L_j \quad \forall i \quad (5.49)$$

$$CCY_i = \sum_{j=1}^v \sum_{t=1}^{m_j} s_{ijt} W_j \quad \forall i \quad (5.50)$$

$$CCZ_i = \sum_{j=1}^v \sum_{t=1}^{m_j} s_{ijt} H_j \quad \forall i \quad (5.51)$$

Amaç fonksiyonu hacim kaybının enküçüklenmesidir ve (5.22) fonksiyonu kullanılan toplam konteyner hacminden parçaların toplam hacminin çıkarılması ile oluşan değerin enküçüklenmesini sağlar. Parçaların eksenlerde çakışmamları kısıtı (5.23-5.28) kısıtları ile sağlanır. İki parçanın yarı uzunlukları toplamı, parçaların

orta noktalarının atandıkları koordinat değerlerinin farkından küçük olmalıdır. Parçaların eksenlerde çakışıp çakışmadıklarının kontrolü o parçalar aynı konteynere atanmışlarsa yapılır (5.29). Bir parçanın mutlaka atanması gerekmektedir (5.30) ve bir konteyner çeşidinin bir konteynerine bir parça atanmışsa, o konteyner kullanılmıştır (5.31). Herhangi iki parça bir konteyner çeşidine ait aynı konteynere atanmışsa, bu iki parça aynı konteynere atanmıştır (5.32). Bir parçanın x eksenindeki boyutu, o parçanın ya uzunluğu ya derinliği ya da yüksekliğinin boyutudur ve bu kısıt y ve z eksenleri için de geçerlidir (5.33-5.35). Önceki modelde olduğu gibi bir parçanın uzunluğu x,y,z eksenlerinden sadece birine paraleldir (5.36). Aynı şekilde bir parçanın derinliği x,y,z eksenlerinden sadece birine (5.37) ve yüksekliği de x,y,z eksenlerinden sadece birine paraleldir (5.38). Bir parçanın ya uzunluğu, ya derinliği ya da yüksekliği x eksenine paraleldir (5.39) ve bu kısıtlar y ve z eksenleri için de geçerlidir (5.40,5.41). Bir konteynere atanan parçaların toplam hacmi, o konteynerin hacmini aşamaz (5.42). Bir parçanın orta noktasının atandığı x koordinatı, o parçanın x eksenine atanan boyutunun yarısından büyük olmalıdır (5.43) ve bu kısıt parçanın orta noktasının atandığı y ve z eksenleri için de geçerlidir (5.44,5.45). Bir parçanın orta noktasının atandığı x koordinatı, o parçanın atandığı konteynerin x eksenindeki boyutu ile parçanın x eksenine atanan boyutunun yarısının farkından küçük olmalıdır (5.46) ve bu kısıt parçanın orta noktasının atandığı y ve z eksenleri için de geçerlidir (5.47-5.48). Bir parçanın bir boyutunun atandığı x eksenin uzunluğu, o parçanın atandığı konteynerin Önceki bölümde önerilen çok amaçlı matematiksel modelde olduğu gibi, burada da parçanın orta noktasını eksenlere atayan karma tamsayılı matematiksel modele bir 0-1 tamsayılı karar değişkeni, amaç fonksiyonu ve kısıt ilave edilir. erinliği ve z eksenin yüksekliği, o parçanın atandığı konteynerin derinliğine ve yüksekliğine eşittir (5.50-5.51).

5.2.4 İki amaçlı parçanın orta noktasını aksenlere atayan karma tamsayılı matematiksel model

Önceki bölümde önerilen çok amaçlı matematiksel modelde olduğu gibi, burada da parçanın orta noktasını aksenlere atayan karma tamsayılı matematiksel modele bir 0-1 tamsayılı karar değişkeni, amaç fonksiyonu ve kısıt ilave edilir.

$$g_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ konteyner çeşidi kullanılıyorsa} \\ 0, & d.d. \end{cases}$$

Karar değişkeni kümesi dışında, bir önceki bölümdeki matematiksel modele ek olarak oluşturulan yeni amaç fonksiyonu ve ek kısıt şu şekildedir:

$$\min \sum_{j=1}^v g_j \quad (5.52)$$

$$\sum_{t=1}^{m_j} n_{jt} \leq M g_j \quad \forall j \quad (5.53)$$

Kullanılan konteyner çeşit sayısının enküçüklenmesi (5.52) denklemi ile sağlanırken, (5.53) kısıtı j. konteyner çeşidinin kullanılıp kullanılmadığını kontrol eder.

6. KYP İÇİN GELİŞTİRİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Bu bölümde KYP geliştirilen çözüm yöntemleri yer almaktadır. Bunlar KYP için bir amaçlı ve iki amaçlı geliştirilen matematiksel model temelli sezgisel yöntem, KYP için geliştirilen sıralama ve yerleştirme sezgiselleri ve tavlama benzetimidir.

6.1. KYP için Matematiksel Model Temelli Sezgiel Yöntem

Bu bölümde KYP için matematiksel model temelli bir sezgisel geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel modelde KYP iki aşamada ele alınmaktadır. İlk aşamada hacim optimizasyonu ile kutular konteynerlere fireyi en küçükleyecek şekilde atanmaktadır. Bu atama sonunda kullanılacak konteynerler ve kutuların atandığı konteynerler belirlidir. Ancak bir konteynere atanmış bir kutunun konteynere yerleşip yerleşmeyeceği, yerleşecek ise konteynerin neresine ve ne şekilde yerleştirildiği belirli değildir.

İkinci aşamada problem konteyner bazında çözülür. Yani her bir konteyner ve o konteynere atanması gereken kutular problemin kendisini oluşturur. Bu aşamada Chens [1]'in önerdiği matematiksel modele göre problem her bir konteyner için, tek konteyner bazında kullanılmayan hacim en küçüklenecek şekilde çözdürülür. Çözümlerde konteynere atanmamış kutular bulunabilir. Bu aşamadan sonra atanamayan kutulardan yeni bir küme oluşturulur ve birinci aşamaya tekrar dönülür ve atanmamış kutu kalmayınca kadar sezgisel devam ettirilir. Problemi bu şekilde alt problemlere bölerek çözmek, hesaplama kolaylığı ve çözüm için gereken zamanın azalması nedeniyle kolaylık sağlamaktadır.

6.1.1 Ana matematiksel model

Ana matematiksel modelde, KYP için V adet konteynere, N tane kutu, verilen hacim optimizasyonu matematiksel modeline göre atanır.

Kümeler ve parametreler

Kullanılacak kümeler şu şekildedir;

$i=1, \dots, N$; Kutu sayısı

$j=1, \dots, V$; Konteyner sayısı

Kullanılacak parametreler şu şekildedir;

V adet konteyner; $j=1, \dots, V$

N adet parça; $i=1, \dots, n$

p_i : i . kutunun uzunluğu

q_i : i . kutunun derinliği

r_i : i . kutunun yüksekliği

L_j : j . konteynerin uzunluğu

W_j : j . konteynerin derinliği

H_j : j . konteynerin yüksekliği

Karar değişkenleri

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu } j. \text{ konteynere atanırsa} \\ 0, & d. d \end{cases}$$

$$n_j = \begin{cases} 1, & j. \text{ konteyner kullanılmışsa} \\ 0, & d. d. \end{cases}$$

Matematiksel Model

$$\min \sum_{j=1}^V \left(L_j W_j H_j n_j - \sum_{i=1}^N p_i q_i r_i s_{ij} \right) \quad (6.1)$$

$$\sum_{j=1}^V s_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (6.2)$$

$$\sum_{i=1}^N s_{ij} \leq M n_j \quad \forall j \quad (6.3)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i q_i r_i s_{ij} \leq L_j W_j H_j n_j \quad \forall j \quad (6.4)$$

Amaç fonksiyonu (6.1), kullanılmayan hacmi enküçüklerken, (6.2) kısıtı her bir parçanın mutlaka bir konteynere atanmasını sağlamaktadır. (6.3) bir konteynere atanmış bir kutu varsa o konteynerin kullanıldığını gösterir ve (6.4) ise bir konteynere atanan parçaların toplam hacminin, konteynerin hacmini aşmamasını sağlar.

Ana modelde elde edilen sonuçlar, alt problem olan ikinci aşamanın girdilerini oluşturur. Bu girdiler konteynerler ve bu konteynerlere hacim optimizasyonuna göre atanmış olan kutulardır.

6.1.2 KYP için iki amaçlı ana matematiksel model

Aşağıda verilen karma tamsayılı matematiksel model, farklı çeşitte konteynerlerin kullanılabilirdiği durumu göz önüne almaktadır. Bu durumda bir önceki bölümde verilen ana model yeni parametreler dikkate alınarak geliştirilmiştir. Kullanılan konteyner çeşit sayısını enküçükleyen yeni bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Modelde V çeşit konteyner, her bir konteyner çeşidine ait m_j adet konteyner ve yüklenmesi gereken N adet parça parametre olarak kullanılmıştır.

Kullanılacak kümeler şu şekildedir;

$i=1, \dots, N$

$j=1, \dots, V$

$t = 1, \dots, m_j$

Parametreler;

p_i : i. kutunun uzunluğu

q_i : i. kutunun derinliği

r_i : i. kutunun yüksekliği

L_j : j. konteyner çeşidinin uzunluğu

W_j :j. konteyner çeşidinin derinliği

H_j :j. konteyner çeşidinin yüksekliği

m_j :j. konteyner çeşidine ait mevcut konteyner sayısı

Bir önceki modelde tanımlanan s_{ij} ve n_j karar değişkenleri güncellenmiş ve yeni bir karar değişkeni g_j eklenmiştir.

$$s_{ijt} = \begin{cases} 1, & i.kutu j.konteyner \text{ çeşidinin } t.konteynerine \text{ atanırsa} \\ 0, & d.d \end{cases}$$

$$n_{jt} = \begin{cases} 1, & j.konteyner \text{ çeşidinin } t.konteyneri \text{ kullanılmışsa} \\ 0, & d.d. \end{cases}$$

$$g_j = \begin{cases} 1, & j.konteyner \text{ çeşidi kullanılmışsa} \\ 0, & d.d. \end{cases}$$

$$\min \sum_{j=1}^V \sum_{t=1}^{m_j} \left(L_j W_j H_j n_{jt} - \sum_{i=1}^N p_i q_i r_i s_{ijt} \right) \quad (6.5)$$

$$\min \sum_{j=1}^V g_j \quad (6.6)$$

$$\sum_{j=1}^V \sum_{t=1}^{m_j} s_{ijt} = 1 \quad \forall i \quad (6.7)$$

$$\sum_{i=1}^N s_{ijt} \leq M n_{jt} \quad \forall j \quad (6.8)$$

$$\sum_{t=1}^{m_j} n_{jt} \leq M g_j \quad \forall j \quad (6.9)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i q_i r_i s_{ijt} \leq L_j W_j H_j n_{jt} \quad \forall j \quad \forall t \quad (6.10)$$

Konteyner çeşitlerinin dikkate alınmadığı bir önceki modelin amaç fonksiyonu yine fireyi enküçükleyecek şekilde (6.5) güncellenmiş ve kullanılan konteyner çeşit sayısını enküçükleyen (6.6) kısıtı modele eklemiştir. Yine tüm parçaların mutlaka atanması (6.7) gerekmektedir. Bir konteyner çeşidinin bir çeşidine bir parça atanmışsa o konteyner (6.8) ve o konteyner çeşidi kullanılmış

demektir (6.9). Bir konteynere atanan parçaların hacmi de o konteynerin hacmini aşamaz (6.10).

6.1.3 Alt matematiksel model

Alt modelde, ana modelde elde edilen, her bir konteyner ve o konteynere atanan kutu kümesi için [1]'de önerilen model tek bir konteyner için atanan parçaların hacminin enbüyüklenmesi amacı altında çözdürülür. Konteynere yerleştirilemeyen tüm parçalar yeni bir talep kümesi olarak güncellenir ve bu döngü atanmayan parça kalmayıncaya kadar devam ettirilir. Sezgiselin ikinci aşaması problem tek konteynere indirildiği için bir amaçlı ve iki amaçlı KYP için aynıdır.

Kullanılacak kümeler şu şekildedir;

$i=1,\dots,N$

Parametreler;

p_i : i. kutunun uzunluğu

q_i : i. kutunun derinliği

r_i : i. kutunun yüksekliği

L: konteynerin uzunluğu

W: konteynerin derinliği

H: konteynerin yüksekliği

$$s_i = \begin{cases} 1, & i. \text{ kutu konteynere atanırsa} \\ 0, & d. d. \end{cases}$$

Amaç fonksiyonu atanan parçaların hacminin enbüyüklenmesini sağlar (6.11). Her bir parçanın atanması zorunluluğu kısıtı çıkarılır ve (6.12-6.15) kısıtları tek konteynere atama yapılacağı için sadece parça indisine göre güncellenir.

$$\max \sum_{i=1}^N p_i q_i r_i s_i \quad (6.11)$$

$$a_{ik} + b_{ik} + c_{ik} + d_{ik} + e_{ik} + f_{ik} \geq s_i + s_k - 1 \quad \forall i \quad \forall k \quad i < k \quad (6.12)$$

$$x_i + p_i l_{xi} + q_i w_{xi} + r_i h_{xi} \leq L + (1 - s_i)M \quad \forall i \quad (6.13)$$

$$y_i + p_i l_{yi} + q_i w_{yi} + r_i h_{yi} \leq W + (1 - s_i)M \quad \forall i \quad (6.14)$$

$$z_i + p_i l_{zi} + q_i w_{zi} + r_i h_{zi} \leq H + (1 - s_i)M \quad \forall i \quad (6.15)$$

6.2. KYP için Bir Yerleştirme Sezgiseli

Daha önceki bölümlerde literatürde yer alan bazı yerleştirme sezgisellerinden bahsedilmişti. Bu bölümde KYP için farklı bir yerleştirme sezgiseli önerilmiştir. Önerilen sezgiselin farkı, her bir katman derinliğinin başlangıçta değil, yerleşim yapıldıktan sonra belirlenmesidir. Katman derinliğinin baştan belirlenmesi ciddi bir varsayımdır ve olası iyi çözümlere ulaşma ihtimali en baştan engellenmiş olabilir.

Önerilen yerleştirme sezgiseline göre öncelikle bir katman oluşturulur. Katmanın derinliği her katmana her yeni parça eklendiğinde kontrol edilir ve güncellenir. Yani katmana yerleştirilen son parçadan sonra katmanın güncel derinliği tespit edilmiş olur. Bir katmanın derinliği, o katmanda yer alan en geniş parçanın derinliğine eşittir. Aynı şekilde, katmanda bulunan her bir katın yüksekliği de, o kata parça yerleştirilemeyinceye kadar güncellenir ve bir sonraki kata geçildiğinde o katın yüksekliği belirlenir. Bir katın yüksekliği, o kata yerleştirilen parçalar içinde en büyük yükseklik boyutuna sahip parçanın boyutuna eşittir.

Önerilen yerleştirme sezgiselinin adımları aşağıda verildiği gibidir:

- Adım 1 : Yerleşmeyi bekleyen parçayı yerleştir ve katman derinliği, kat yüksekliği ve kat uzunluğunu belirle,
- Adım 2 : İzleyen parçanın, katman derinliğine, katın konteynere göre mevcut yüksekliğine ve katın uzunluğa göre konteynere yerleşip yerleşmediğini kontrol et. Yerleşiyorsa kat uzunluğunu, katman derinliğini ve kat yüksekliğini güncelle Adım 2'ye git, yerleşmiyorsa Adım 3'e git
- Adım 3: Kat yüksekliğini ve kat uzunluğunu sıfırla. Parçanın yüksekliği aynı katmanda yeni bir kat açmaya izin veriyorsa parçayı yerleştir. Yerleşiyorsa

kat uzunluğunu, katman derinliğini ve kat yüksekliğini güncelle Adım 2'ye git. Yerleşmiyorsa Adım 4'e git

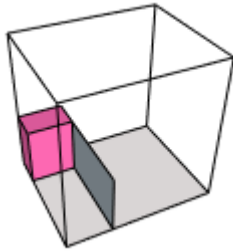
- Adım 4: Katman derinliğini, kat yüksekliğini ve kat uzunluğunu sıfırla. Parçanın derinliği konteynerde yeni bir katman açmaya izin veriyorsa parçayı yerleştir. Yerleşiyorsa kat uzunluğunu, katman derinliğini ve kat yüksekliğini belirle. Yerleşmiyorsa Adım 5'e git
- Adım 5: Yeni bir konteyner aç. Katman derinliği, kat yüksekliği ve kat uzunluğunu sıfırla, Adım 1'e git.

Kutu kümesi $N=7$ için bir örnek verecek olursak, Çizelge (6.1)'de verilen kutular $L=8, W=10, H=10$ boyutlarında bir konteynere yerleştirilecek olsun:

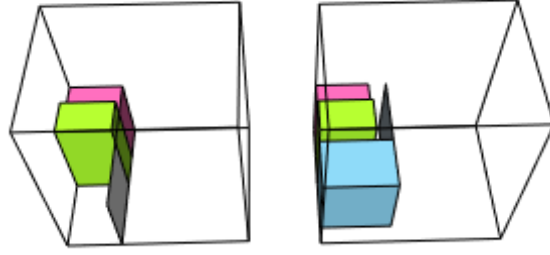
Çizelge 6.1. $N=7$ için örnek

Kutu	l	w	h
1	2	3	4
2	2	3	5
3	3	4	4
4	3	3	3
5	4	2	4
6	5	5	6
7	6	4	4

İlk olarak birinci kutu katman-1, kat-1'e Şekil (6.1)'de görüldüğü gibi yerleştirilir.



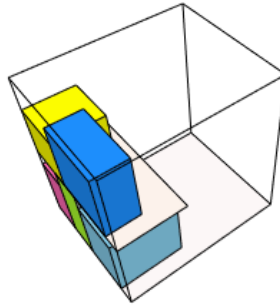
Şekil 6.1. Katman-1, kat-1



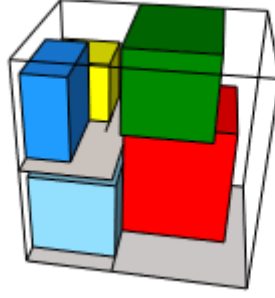
Şekil 6.2. Katman-1, kat-1 katman derinliği güncelleme

İkinci kutuda yerleştirilir ve katman derinliğinin değişmezken kat yüksekliği ikinci parçanın yüksekliğine eşit olur. Üçüncü parçanın derinliği ise, ilk iki parçanın derinliğinden fazla olduğu için, katmanın derinliği güncellenerek bu parçanın derinliğine eşitlenir (Şekil (6.2)).

Dördüncü kutunun yerleştirilmesi için kat uzunluğu yeterli olmadığından, yeni bir kat açılıp açılmayacağı kontrol edilir. Yeni bir kat açmak uygun olduğu için bu parça katman-1 kat-2'ye yerleştirilir. Beşinci kutu da aynı kata yerleştirilir. Şekil (6.3)'te dördüncü ve beşinci kutuların derinliğinin katman derinliğinden daha büyük olmaması nedeniyle katman derinliğinin değişmediği görülmektedir. Ancak kat yüksekliğini bu katta beşinci kutu belirlemektedir.



Şekil 6.3. Katman-1, kat-2



Şekil 6.4. Katman-2, kat-1 ve kat-2

Altıncı kutunun katman-1 kat 2'ye yerleşememesi, bu parça için yeni bir kat açmaya da konteynerin yükseklik boyutunun yeterli olmaması nedeniyle yeni bir katman açılır. Bu parça katman-2 kat-1'e ve son yedinci parça da uzunluğunun yeterli olması nedeniyle katman-2 kat-2'ye yerleştirilir. Bu katmanın derinliği, katmanda en büyük derinliğe sahip olan altıncı parçanın derinliğine eşittir (Şekil6.4).

6.3. KYP için Gezgin Satıcı Problemi-En Yakın Komşu Sezgiseli

Bu bölümde konteyner yükleme probleminin çözümü için gezgin satıcı problemi en yakın komşu sezgiseli (GSPEKS) temel alınarak bir önceliklendirme sezgiseli önerilmiştir. KYP'nin sezgisel yöntemlerle çözümünde parçaların yükleme öncelik sıralarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu öncelikler parçaların hacimce büyükten küçüğe sıralanması, derinlik/uzunluk oranına göre büyükten küçüğe sıralama vb şekillerde yapılabilmektedir. Bu bölümde öncelik belirleme için farklı bir öneri sunulmuştur. İki parçanın birbirine benzerliği diğer parçalara göre ne kadar fazlaysa o parçaların arka arkaya yükleme önceliği o kadar fazladır. Sezgisel üç aşamadan oluşmaktadır:

- Adım 1 : Parça benzerliklerinin belirlenmesi ve parça uzaklık matrisinin oluşturulması
- Adım 2 : Parça uzaklık matrisini kullanarak, en yakın komşu sezgiseline göre parçaların yükleme sırasının belirlenmesi
- Adım 3 : Oluşturulan çözüme yerleştirme algoritmasının uygulanması

6.3.1 Parça benzerliklerinin belirlenmesi ve parça uzaklık matrisinin oluşturulması

Parça benzerlikleri belirlenirken parçaların üç boyutu da dikkate alınır. Daha sonra talebi N adet olan bir sipariş kümesi için, $N \times N$ 'lik uzaklık matrisi oluşturulur. İki parçanın benzerliği uzunluk, derinlik ve yükseklikleri arasındaki skaler farkların toplamı olarak belirlenir. Bu farklar toplamı ne kadar az ise parçalar birbirine o kadar çok benziyor demektir.

Nadet kutu; $i, j=1, \dots, N$

l_i : i. kutunun uzunluğu

w_i : i. kutunun derinliği

h_i : i. kutunun yüksekliği

d_{ij} : i. kutu ile j. kutunun benzerliği olsun

$$d_{ij} = |l_i - l_j| + |w_i - w_j| + |h_i - h_j|$$

Buyutları Çizelge (6.2)'de verildiği gibi olan kutu kümesi $N=4$ için bir örnek verecek olursak:

Çizelge 6.2. $N=4$ için örnek

Kutu	l	w	h
1	12	6	15
2	7	3	5
3	8	8	8
4	11	8	12

$$d_{12} = |l_1 - l_2| + |w_1 - w_2| + |h_1 - h_2|$$

$$d_{12} = |12 - 7| + |6 - 3| + |15 - 5| = 18$$

$$d_{12} = 18, d_{13} = 13, d_{14} = 6$$

$$d_{21} = 16, d_{23} = 9, d_{24} = 16$$

$$d_{31} = 13, d_{32} = 9, d_{34} = 7$$

$$d_{41} = 6, d_{42} = 16, d_{43} = 7$$

Parça benzerlik matrisi Çizelge (6.3)'te verildiği gibidir :

Çizelge 6.3. Parça benzerlik matrisi

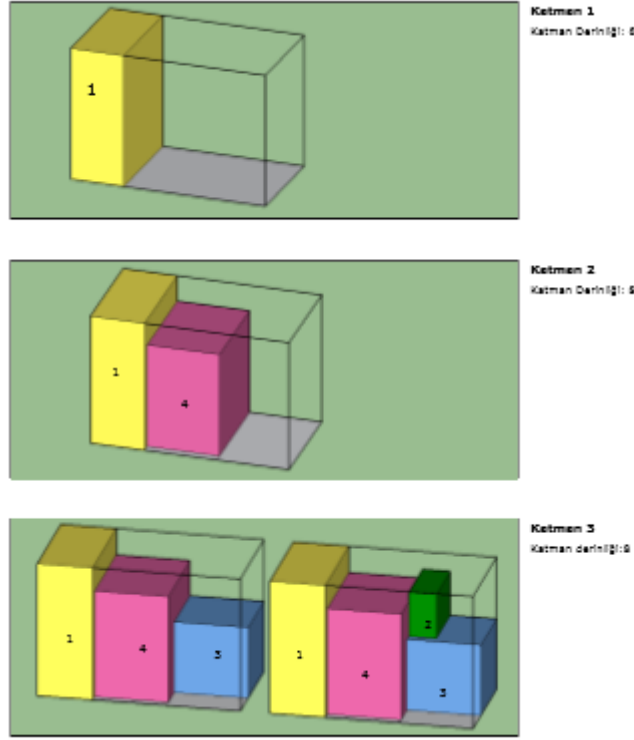
Kutu	1	2	3	4
1	-	18	13	6
2	18	-	9	16
3	13	9	-	7
4	6	16	7	-

6.3.2 GSPEKS'ne göre parçaların yükleme önceliklerinin belirlenmesi

En büyük benzerliğe sahip olan yani parça benzerlik matrisinde en küçük d_{ij} değerine sahip olan kutular belirlenir ve i . kutudan itibaren çözüm oluşturulur. $d_{14}=6$ olduğundan başlangıç çözüm 1-4 olur. 4. kutuyla benzerlik değeri en yüksek olan kutu 3'tür. Çözüm 1-4-3 olur. Son olarak atanmayan 2. parça da diziye eklenerek kutu yükleme sırası 1-4-3-2 olarak belirlenmiş olur.

6.3.3 Yerleştirme algoritmasının uygulanması

Kutu yükleme sırası belirlendikten sonra, kutular bir yerleştirme algoritması göre yerleştirilir. Burada kutular bir önceki bölümde önerilen yerleştirme sezgiseline göre yerleştirilmiştir. Boyutları $L=12, W=22, H=15$ olan bir konteynere yerleştirilerek elde edilen çözümün yerleşimi Şekil (6.5)'te verildiği gibidir:



Şekil 6.5. GSPEKS'ne göre yerleşim

6.4. KYP için Tavlama Benzetimi

Bu bölümde KYP için bir tavlama benzetimi geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın özgün yanı parçaların önceki bölümde önerilen yerleştirme sezgiseline göre yerleştirilmesi ve tavlama benzetiminde başlangıç çözüm olarak sezgisel yöntemle elde edilen yerleşim sırasının, önceki bölümde verilen KYP için gezgin satıcı problemi-yerleştirme sezgiseline göre oluşturulmuş olmasıdır.

KYP için tavlama benzetiminde başlangıç çözüm tüm parçalardan oluşan bir dizi, parça çeşit sayısından oluşan ve parçaların konumlarını gösteren ikinci bir dizi ve eldeki konteynerlerden oluşan üçüncü bir dizidir. Tavlama benzetiminin çıktısı olarak ise kullanılan konteyner sayısına bağlı olarak bir doluluk oranı elde edilir. Parçaların rotasyonuna izin verilmiştir ve çözümde bir parça türüne ait parçaların hangi konumda olduğu bilgisi elde edilir. Aynı zamanda bir parçanın, hangi

konteynerin hangi katmanının hangi katına kaçınıcı sırada yerleştirildiği bilgisine de ulaşılır.

Üç çeşit parçadan oluşan ve her çeşit parçadan ikişer adet parça bulunan bir kutu kümesi Çizelge (6.4)'te verildiği gibi olsun:

Çizelge 6.4. Kutu kümesi

Parça	Adet	L	w	h
1	2	2	4	6
2	2	3	5	2
3	2	2	4	2

Rassal bir çözümün gösterimi 1-3-3-1-2-2 gibi altı elmanlı dizi olacaktır. Parçaların rotasyon bilgisi ise parça çeşit sayısı kadar elemandan oluşan bir dizidir. Bir parça altı konumdan birinde olacağı için her bir parça çeşidinin rotasyon bilgisi Çizelge (6.5)'te verildiği gibi 1-6 arasında bir değer alacaktır:

Çizelge 6.5. Parça rotasyon bilgileri

Parça çeşit no	1	2	3
Rotasyon	5	1	4

Rotasyon bilgisi bir parçanın uzunluk, derinlik veya yüksekliğinin konteynerin hangi eksenine paralel olduğu bilgisini vermektedir ve Çizelge (6.6)'da verildiği gibidir:

Çizelge 6.6. Parça rotasyonlarına karşılık gelen eksenler

Konum	L	W	H
1	l	w	h
2	l	h	w
3	w	l	h
4	w	h	l
5	h	l	w
6	h	w	l

Örneğin birinci parça çeşidinin konumu beş olarak verilmiştir. Yani parçanın yüksekliği konteynerin uzunluğuna, derinliği yine konteynerin derinliğine ve uzunluğu ise konteynerin yüksekliğine paraleldir.

Başlangıç sıcaklığı, soğuma oranı, iterasyon sayısı, kabul olasılık değeri ve durdurma kriteri parametreleri algoritmanın başında belirlenir. Başlangıç sıcaklık değeri ne çok büyük ne de çok küçük olmalıdır. Bu değer ne tüm kötü çözümleri kabul etmeli ne de kötü çözümlerin kabulünü tamamen engellemelidir.

Soğuma oranı ise bir fonksiyona bağlı olarak azaltılmaktadır. Denge durumuna ulaşılan sıcaklıkta, bir sonraki sıcaklığa geçmek için bu fonksiyon kullanılır. Denge durumuna ulaşmak için de o sıcaklıkta belirli bir sayıda iterasyon yapılması gerekir. İterasyon sayısı parametresi de bu denge sıcaklığına ulaşmada kullanılır. Kabul oranı ise, elde edilen kötü bir sonucun kabul olasılığı için bir alt sınırdır. Kötü bir çözüm, çözümün kabul olasılık değeri kabul olasılık değerinin üzerinde olduğu zaman kabul edilir. Burada kötü bir çözümün kabulündeki amaç yerel optimuma takılmamak, farklı bölgelerde çözüm aramaktır ve sıcaklıkla ters orantılıdır. Algoritmanın durdurma kriteri için ise belirli bir sıcaklığa ulaşmış olmak kabul edilmiştir. Burada kabul edilen değer sıcaklığın sıfıra ulaştığı noktadır ve algoritma burada sonlanır. Bulunan en iyi sonuç algoritmanın çıktısıdır.

Başlangıç çözüm iki şekilde oluşturulur: Önceki bölümde önerilen öncelik belirleme ve yerleştirme sezgiseline göre veya rasgele. Daha sonra belirlenen parametreler doğrultusunda yerleştirme sezgiseli uygulanır ve amaç fonksiyonu değeri olan fire oranı hesaplanır. Daha sonra komşu çözüme geçilir. Burada komşu çözüm bir parça çeşidine ait kutuların konum bilgisinin (1-6) değiştirilmesi olarak tanımlanmıştır. Komşu çözümün de amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Fire oranı daha düşük ise komşu çözüm kabul edilir. Komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri daha kötü ise de, olasılık kabul değeri ($P(\Delta E, T)$) hesaplanır. Bu değer başlangıçta belirlenen olasılık kabul değerinden büyükse komşu çözüm kabul edilir; değilse iki parçanın yer değiştirilmesi şeklinde yeni bir komşu çözüm oluşturulur. Bu işlemler denge sıcaklığına ulaşıncaya kadar başta belirlenen iterasyon sayısı kere tekrar edilir. Denge sıcaklığına ulaşıldığında sıcaklık değeri güncellenir ve bu işlemler durdurma kriteri olan sıfır sıcaklığa ulaşıncaya kadar devam ettirilir.

7. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde KYP için geliştirilen bir amaçlı ve iki amaçlı matematiksel modeller, KYP için bir ve iki amaçlı geliştirilen matematiksel model temelli sezgisel yöntem, KYP için sıralama ve yerleştirme sezgiseli ve tavlama benzetimi ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.

7.1. KYP için Geliştirilen Matematiksel Modellerle Elde Edilen Sonuçlar

Literatürden temel alınan matematiksel modeller [1] ve [15], küçük problemler için çözdürülmüştür. Problemin NP-Zor sınıfında yer alması nedeniyle, bu çalışmada da makul zamanda etkin çözümler elde edilememiştir ve sezgisel ve metasezgisellerden faydalanılmıştır. Ancak geliştirilen modeller [15]'te verilen örnek problem için çözdürülmüş, çok amaçlı versiyonlarının sonuçları da aynı problem için verilmiştir. Örnek problem için parça ve konteyner boyutları Çizelge (7.1)'de verilmiştir:

Çizelge 7.1. Parça ve konteyner boyutları

Parça no	h	W	l
1	2	2	2
2	2	2	2
3	2	2	2
4	2	2	2
5	3	2	2
6	3	2	2
7	3	2	2
8	3	2	2
9	3	2	2
10	3	2	2
11	1	3	3
12	1	3	3
13	5	2	1

Kont. no:	H	W	L
1	3	7	3
2	3	7	3
3	4	7	4
4	4	7	4

Örnek problem literatürde yer alan orjinal modeller, KYP için bir amaçlı ve iki amaçlı olarak geliştirilen matematiksel modeller için çözdürülmüştür. İki amaçlı geliştirilen matematiksel model ağırlıklandırılmış toplam yöntemi ve konik skalerleştirme yöntemlerine göre çözdürülmüştür. Chen [1]'in matematiksel modeli temel alınarak geliştirilen matematiksel model MM1 ile Westerlund[15]'un matematiksel modelitemel alınarak geliştirilen matematiksel model ise MM2 ile gösterilmiştir ve sonuçlar Çizelge (7.2)'de verilmiştir:

Çizelge 7.2. Örnek problem ve elde edilen sonuçlar

	Fire	Kul.lanılan Konteyner	Kullanılan Konteyner
[1]	43	2	2
[15]	43	2	2
MM1	43	2	2
MM2	43	2	2

Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi (ATY) ve konik skalerleştirme yöntemine (KSY) göre elde edilen sonuçlar Çizelge (7.3)'te verilmiştir. Kullanılan konteyner çeşit sayısının bu örnek problem için iki olması nedeniyle sonuç çeşitliliği çok fazla değildir. Farklı ağırlıklar için fire (f_1) ve kullanılan konteyner çeşit sayısı (f_2) ile gösterilmiştir. Farklı ağırlıklar için ATY için farklı sonuçlar elde edilmiştir. KSY için ise örneğin f_1 ve f_2 'nin ağırlıkları $(w_1, w_2), (3, 3)$ iken farklı α değerleri için farklı sonuçlar bulunmuştur.

Çizelge 7.3. ATY ve KSY örnek problem sonuçları

Referans noktaları	$r_1=30$		$r_2=1$		
	$w(1,5)$	$w(2,4)$	$w(3,3)$	$w(4,2)$	$w(5,1)$
Ağırlıklar	f_1, f_2	f_1, f_2	f_1, f_2	f_1, f_2	f_1, f_2
WS	92-1	92-1	43-2	43-2	43-2
CS($\alpha=0$)	92-1	92-1	92-1	92-1	92-1
CS($\alpha=1$)	92-1	92-1	92-1	43-2	92-1
CS($\alpha=2$)		92-1	92-1	92-1	
CS($\alpha=3$)			92-1		

KYP için önerilen bir amaçlı ve iki amaçlı matematiksel modeller, test problemlerinde yer alan en küçük boyutlu problem için çözdürülmeye çalışılmış, ancak yirmi dört saatin sonunda çözüm elde edilememiştir. Bu nedenle kısa zamanda kabul edilebilir sonuçlar elde etmek için sonraki bölümlerde verilen çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

7.2. KYP için Matematiksel Model Temelli Sezgisel Yöntem ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümden itibaren Ivancic vd.[28]'nin oluşturduğu test problemleri ele alınmıştır. Test problemlerinin boyutu 47-180 parça arasında değişmektedir. Her test probleminde çeşitli parçalar bulunmaktadır ve her bir test probleminin konteyner boyutları farklıdır. Kullanılan konteyner sayılarının en küçüklenmeye çalışıldığı bu test problemleri için matematiksel model temelli sezgisel yöntem (MMTSY) ile elde edilen sonuçlar ve LES (literatürde elde edilen sonuç) değerleri [11]'e göre Çizelge (7.4)'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. MMTSY ile elde edilmiş sonuçlar

Test Problemi	PÇS	PS	MKS	LES	MMTS	
<i>thpack9-1</i>	2	70	19	26	27	
<i>thpack9-2</i>	2	70	7	10	9	**
<i>thpack9-3</i>	4	180	19	20	20	*
<i>thpack9-4</i>	4	180	26	27	29	
<i>thpack9-5</i>	4	180	46	51	73	
<i>thpack9-6</i>	3	103	10	10	10	*
<i>thpack9-7</i>	3	103	16	16	16	*
<i>thpack9-8</i>	3	103	4	4	5	
<i>thpack9-9</i>	2	110	16	19	19	*
<i>thpack9-10</i>	2	110	37	55	55	*
<i>thpack9-11</i>	2	110	14	17	18	
<i>thpack9-12</i>	3	95	45	53	55	
<i>thpack9-13</i>	3	95	20	25	25	*
<i>thpack9-14</i>	3	95	27	27	28	
<i>thpack9-15</i>	3	95	11	11	13	
<i>thpack9-16</i>	3	95	21	26	24	**
<i>thpack9-17</i>	3	95	7	7	9	
<i>thpack9-18</i>	3	47	1	1	2	
<i>thpack9-19</i>	3	47	1	2	2	*
<i>thpack9-20</i>	3	47	2	2	3	
<i>thpack9-21</i>	5	95	17	24	23	**
<i>thpack9-22</i>	5	95	8	9	9	*
<i>thpack9-23</i>	5	95	17	21	21	*
<i>thpack9-24</i>	4	72	5	6	6	*

Çizelge 7.4. Devam : MMTSY ile elde edilmiş sonuçlar

Test Problemi	PÇS	PS	MKS	LES	MMTS	
<i>thpack9-25</i>	4	72	4	5	5	*
<i>thpack9-26</i>	4	72	3	3	4	
<i>thpack9-27</i>	3	95	4	5	5	*
<i>thpack9-28</i>	3	95	9	10	10	*
<i>thpack9-29</i>	4	118	15	17	18	
<i>thpack9-30</i>	4	118	18	22	23	
<i>thpack9-31</i>	4	118	11	13	14	
<i>thpack9-32</i>	3	90	4	4	5	
<i>thpack9-33</i>	3	90	4	5	5	*
<i>thpack9-34</i>	3	90	5	5,8	9	
<i>thpack9-35</i>	2	84	2	2	3	
<i>thpack9-36</i>	2	84	10	14	14	*
<i>thpack9-37</i>	3	102	12	23	24	
<i>thpack9-38</i>	3	102	25	45	47	
<i>thpack9-39</i>	3	102	12	15	15	*
<i>thpack9-40</i>	4	85	7	9	9	*
<i>thpack9-41</i>	4	85	14	15	18	
<i>thpack9-42</i>	3	90	4	4	5	
<i>thpack9-43</i>	3	90	3	3	3	*
<i>thpack9-44</i>	3	90	3	4	5	
<i>thpack9-45</i>	4	99	2	3	4	
<i>thpack9-46</i>	4	99	2	2	4	
<i>thpack9-47</i>	4	99	3	3	4	

MMTSY ile elde edilen sonuçlar için Çizelge (7.1)'de parça çeşit sayısı (PÇS), parça sayısı (PS), kullanılabilir minimum konteyner sayısı (MKS) ve literatürde yer alan en iyi sonuçlar (LES) gösterilmiştir. Kırk yedi test probleminin (*) ile gösterilen on sekiz tanesinde literatürde ulaşılan en iyi sonuçlara ulaşılmış, (**) ile gösterilen üç problemde ise literatürden daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Aşağıda *thpack9-28* için önerilen MMTSY'in sonuçları aşama aşama verilmiştir. İlk aşamada hacim optimizasyonu yöntemiyle parçalar Çizelge (7.5)'te gösteriliği gibi konteynerlere atanmıştır. Örneğin birinci konteynere dört adet birinci tip, sekiz adet de üçüncü tip parça hacim optimizasyonuna göre yerleşmeye adaydır.

Çizelge 7.5. İlk aşamada parçaların yerleştiği konteynerler

K.N.	1.tip	2.tip	3.tip
1	4	0	8
2	8	2	1
3	1	7	0
4	5	2	5
5	7	0	6
6	10	0	1
7	3	0	8
8	5	3	1
9	0	8	0

Konteynerlere atanan parçalara göre sezgiselin alt modeli çalıştırılmış ve parçalar konteynerlere boş kalan hacmi enküçükleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Yerleştirilen ve yerleştirilemeyen parçalar Çizelge (7.6)'da verildiği gibidir. İkinci konteynere altı adet birinci tip parça yerleşmeye aday iken, dört tanesi yerleşmiş iki tanesi yerleşememiştir. İkinci ve üçüncü tip parçaların hepsi bu konteynere yerleştirilmiştir.

Çizelge 7.6. Konteynerlere yerleştirilen parça sayıları

K.N.	1.tip	2.tip	3.tip
1	4/0	0/0	8/0
2	6/2	2/0	1/0
3	1/0	7/0	0/0
4	5/0	1/1	5/0
5	7/0	0/0	5/1
6	8/2	0/0	1/0
7	3/0	0/0	8/0
8	5/0	3/0	1/0
9	0/0	8/0	0/0
Toplam	4	1	1

Yerleştirilemeyen parçalardan yeni bir küme oluşturulmuş ve sezgiselin ilk adımı hacim maksimizasyonu amacı altında çalıştırılmıştır. Çizelge (7.7)'de tüm parçaların bir konteynere hacimce sığıdığı görülmektedir.

Çizelge 7.7. Yerleştirilemeyen parçalar için ilk aşama sonucu

K.N.	1.tip	2.tip	3.tip
1	4	1	1

Son olarak bu parça kümesi için sezgiselin alt matematiksel modeli tekrar çalıştırılmıştır. Çizelge (7.8)'de verildiği gibi tüm parçalar konteynere yerleşebilmektedir. Sonuç olarak ilk aşamada dokuz ve bir sonraki iterasyonda bir tane olmak üzere toplamda on adet konteyner kullanılmıştır.

Çizelge 7.8. Yerleştirilemeyen parçalar için ikinci aşama sonucu

K.N.	1.tip	2.tip	3.tip
1	4/0	1/0	1/0
toplam	0	0	0

Tüm test problemleri için MMTSY'in hacim optimizasyonu ve yerleştirme aşamalarında kullanılan konteyner sayıları Çizelge (7.9)'de verildiği gibidir. Hacim optimizasyonunda kullanılan konteyner sayısı (HOKKS) ile yerleştirme aşamasında kullanılan konteyner sayısı (YAKKS) toplamı, bu yöntemi göre kullanılan toplam konteyner sayısını vermektedir.

Çizelge 7.9. MMTSY'nin aşamalarında kullanılan konteyner sayısı

Test Problemi	HOKKS	YAKKS	Toplam KKS
<i>thpack9-1</i>	19	8	27
<i>thpack9-2</i>	7	2	9
<i>thpack9-3</i>	19	1	20
<i>thpack9-4</i>	26	3	29
<i>thpack9-5</i>	46	27	73
<i>thpack9-6</i>	10	0	10
<i>thpack9-7</i>	16	0	16
<i>thpack9-8</i>	4	1	5
<i>thpack9-9</i>	17	2	19
<i>thpack9-10</i>	43	12	55
<i>thpack9-11</i>	14	4	28
<i>thpack9-12</i>	53	2	55
<i>thpack9-13</i>	24	1	25
<i>thpack9-14</i>	27	1	28
<i>thpack9-15</i>	11	2	13
<i>thpack9-16</i>	21	3	24
<i>thpack9-17</i>	7	2	9
<i>thpack9-18</i>	1	1	2
<i>thpack9-19</i>	1	1	2
<i>thpack9-20</i>	2	1	3
<i>thpack9-21</i>	19	6	23
<i>thpack9-22</i>	8	1	9
<i>thpack9-23</i>	17	4	21
<i>thpack9-24</i>	5	1	6

Çizelge 7.9. Devam : MMTSY'nin aşamalarında kullanılan konteyner sayısı

Test Problemi	HOKKS	YAKKS	Toplam KKS
<i>thpack9-25</i>	4	1	5
<i>thpack9-26</i>	3	1	4
<i>thpack9-27</i>	4	1	5
<i>thpack9-28</i>	9	1	10
<i>thpack9-29</i>	15	3	8
<i>thpack9-30</i>	18	5	23
<i>thpack9-31</i>	11	3	14
<i>thpack9-32</i>	4	1	5
<i>thpack9-33</i>	4	1	5
<i>thpack9-34</i>	7	2	9
<i>thpack9-35</i>	2	1	3
<i>thpack9-36</i>	10	4	14
<i>thpack9-37</i>	12	12	24
<i>thpack9-38</i>	21	26	47
<i>thpack9-39</i>	12	3	15
<i>thpack9-40</i>	7	2	9
<i>thpack9-41</i>	14	4	18
<i>thpack9-42</i>	4	1	5
<i>thpack9-43</i>	3	0	3
<i>thpack9-44</i>	3	2	5
<i>thpack9-45</i>	2	2	4
<i>thpack9-46</i>	2	2	4
<i>thpack9-47</i>	3	1	4

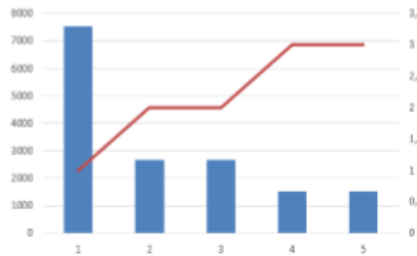
7.3. KYP için İki Amaçlı Geliştirilen MMTS İle Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde test problemlerinde yer alan on bir problem için iki amaçlı geliştirilen MMTSY ile elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Her bir test problemi için, o probleme ait konteyner boyutları $(0.9 \times L, 0.9 \times W, 0.9 \times H)$, $(1.1 \times L, 1.1 \times W, 1.1 \times H)$, $(1.2 \times L, 1.2 \times W, 1.2 \times H)$ ile çarpılarak üç tane daha yeni konteyner boyutları elde edilmiştir. Firenin en küçüklenmesi ve kullanılan konteyner çeşit sayılarının en küçüklenmesi için ATY ve KSY ile çözümler elde edilmiştir. ATY ile elde edilen sonuçlar Çizelge (7.10)'da verildiği gibidir:

Çizelge 7.10. İki amaçlı KYP için ATY ile elde edilmiş sonuçlar

Ağırlıklar Problemler	(w_1, w_2)		(w_1, w_2)		(w_1, w_2)		(w_1, w_2)		(w_1, w_2)	
	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2
<i>thpack9-1</i>	296	2	296	2	296	2	296	2	92	3
<i>thpack9-3</i>	768	2	768	2	768	2	720	3	184	4
<i>thpack9-8</i>	1750	1	1750	1	1750	1	1250	2	1250	2
<i>thpack9-11</i>	106788	2	52788	2	38460	4	35868	4	35868	4
<i>thpack9-15</i>	7536	1	2676	2	2676	2	1506	3	1506	3
<i>thpack9-34</i>	120	2	120	2	120	2	88	3	88	3
<i>thpack9-36</i>	400	2	400	2	400	2	388	3	216	3
<i>thpack9-39</i>	5280	1	960	2	528	2	528	2	528	2
<i>thpack9-41</i>	2170	2	366	3	298	3	298	3	298	3
<i>thpack9-42</i>	14802	1	2405	2	2405	2	2405	2	2405	2
<i>thpack9-47</i>	9817	1	9817	1	9817	1	5437	2	5437	2

Çizelge (7.10)'da her bir test problemi için fire (f_1) ve konteyner çeşit sayısı (f_2) farklı ağırlıklar için en küçüklenmeye çalışılmıştır. Ağırlıklar (w_1, w_2) sırası ile (1,5), (2,4), (3,3), (4,2), (5,1) olarak belirlenmiş, hesaplamalar yapılırken gereken normalleştirmeler yapılmıştır. Test problemlerinde farklı ağırlıklar için farklı sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan konteyner çeşit sayısının ağırlığı arttıkça firenin genel olarak düştüğü görülmektedir. Şekil (7.1)'de *thpack9-15* problemi için firenin ağırlığı bir, kullanılan konteyner çeşit sayısının ağırlığı beş iken fire maksimumdur ancak kullanılan konteyner çeşit sayısı (KÇS) birdir. Firenin ağırlığı arttıkça kullanılan KÇS'nin arttığı görülmektedir.



Şekil 7.1. *thpack9-15* için ATY göre elde edilen sonuçlar

İki amaçlı KYP için test problemleri KSY ile de çözülmüş ve elde edilen sonuçlar problem bazında Çizelge (7.11)'de verilmiştir.

Çizelge 7.11. İki amaçlı KYP için KSY ile elde edilmiş sonuçlar

<i>thpack9-1</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	1000	1	1	5	0	188	3
	1000	1	1	5	1	296	3
	1000	1	2	4	0	188	3
	1000	1	2	4	1	188	3
	1000	1	3	3	0	188	3
	1000	1	3	3	1	188	3
	1000	1	4	2	0	188	3
	1000	1	4	2	1	188	3
	1000	1	5	1	0	188	3
	1000	1	5	1	1	188	4
<i>thpack9-3</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	768	1	1	5	0	72	3
	768	1	1	5	1	768	2
	768	1	2	4	0	520	4
	768	1	2	4	1	72	3
	768	1	3	3	0	72	3
	768	1	3	3	1	72	3
	768	1	4	2	0	432	3
	768	1	4	2	1	72	3
	768	1	5	1	0	336	3
<i>thpack9-8</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	2000	1	1	5	0	1250	2
	2000	1	1	5	1	1750	2
	2000	1	2	4	0	1250	2
	2000	1	2	4	1	1250	2
	2000	1	3	3	0	1250	2
	2000	1	3	3	1	1250	2
	2000	1	4	2	0	1250	2
	2000	1	4	2	1	1250	2
	2000	1	5	1	0	1250	2
	2000	1	5	1	1	125	2
<i>thpack9-15</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	7550	1	1	5	0	1512	3
	7550	1	1	5	1	3160	2
	7550	1	2	4	0	1512	3
	7550	1	2	4	1	1512	3
	7550	1	3	3	0	1512	3
	7550	1	3	3	1	1512	3
	7550	1	4	2	0	1512	3
	7550	1	4	2	1	1512	3
	7550	1	5	1	0	1512	3
	7550	1	5	1	1	1512	3

Çizelge 7.11. Devam : İki amaçlı KYP için KSY ile elde edilmiş sonuçlar

<i>thpack9-34</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	122	1	1	5	0	88	3
	122	1	1	5	1	120	2
	122	1	2	4	0	88	3
	122	1	2	4	1	83	3
	122	1	3	3	0	88	3
	122	1	3	3	1	88	3
	122	1	4	2	0	88	3
	122	1	4	2	1	88	3
	122	1	5	1	0	88	3
	122	1	5	1	1	88	3
<i>thpack9-42</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	148051		1	5	0	2405	2
	148051		1	5	1	148021	
	148051		2	4	0	2405	2
	148051		2	4	1	2405	2
	148051		3	3	0	2405	2
	148051		3	3	1	2405	2
	148051		4	2	0	2405	2
	148051		4	2	1	2405	2
	148051		5	1	0	2405	2
	148051		5	1	1	2405	2
<i>thpack9-47</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	9820	1	1	5	0	5437	2
	9820	1	1	5	1	9817	1
	9820	1	2	4	0	5437	2
	9820	1	2	4	1	5437	2
	9820	1	3	3	0	5437	2
	9820	1	3	3	1	5437	2
	9820	1	4	2	0	5437	2
	9820	1	4	2	1	5437	2
	9820	1	5	1	0	5437	2
	9820	1	5	1	1	5437	2

Çizelge 7.11. Devam : İki amaçlı KYP için KSY ile elde edilmiş sonuçlar

<i>thpack9-11</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	10678	1	1	5	0	43896	3
	10678	1	1	5	1	89680	2
	10678	1	2	4	0	47052	4
	10678	1	3	3	0	52596	4
	10678	1	4	2	0	43896	3
	10678	1	5	1	0	39024	4
<i>thpack9-36</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	400	1	1	5	0	388	3
	400	1	1	5	1	400	2
	400	1	2	4	0	216	3
	400	1	3	3	0	388	3
	400	1	4	2	0	388	3
	400	1	5	1	0	388	3
<i>thpack9-39</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	5280	1	1	5	0	744	3
	5280	1	1	5	1	3768	2
	5280	1	2	4	0	672	3
	5280	1	3	3	0	528	2
	5280	1	4	2	0	744	3
	5280	1	5	1	0	600	2
<i>thpack9-41</i>	a_1	a_2	w_1	w_2	α	f_1	f_2
	2170	1	1	5	0	366	3
	2170	1	1	5	1	2170	2
	2170	1	2	4	0	290	3
	2170	1	3	3	0	468	3
	2170	1	4	2	0	290	3
	2170	1	5	1	0	290	3

Çizelge (7.11)'de test problemleri için verilen referans noktalarına göre elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Ağırlıklar yine (1,5)-(5-1) arasında değişmektedir. Aynı ağırlıkta farklı α değerleri için KSY ile farklı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin *thpack9-11* probleminde ağırlıklar (1,5) iken farklı α değerleri (0,1) için farklı sonuçlar mevcuttur. Kullanılan konteyner çeşit sayısı $\alpha=0$ için üç iken $\alpha=1$ 'de iki çeşittir.

7.4. KYP için GSPEKS ve YerleştirmeSezgiseline Göre Elde Edilen Sonuçlar

KYP için GSPEKS'ne göre elde edilen sonuçlar Çizelge (7.12)'de verilmiştir. Kullanılan konteyner sayıları bu sezgisel göze fazla sayıdadır. KYP test problemleri için (*) ile gösterilen iki problemde LES değeri ulaşmıştır. Bunun nedeni sezgiselin parça rotasyonlarını dikkate almamasıdır.

Çizelge 7.12. KYP için GSPEKS'e göre elde edilen sonuçlar

Test Problemi	PÇS	PS	MKS	LES	GSPEKS
<i>thpack9-1</i>	2	70	19	26	53
<i>thpack9-2</i>	2	70	7	10	18
<i>thpack9-3</i>	4	180	19	20	40
<i>thpack9-4</i>	4	180	26	27	44
<i>thpack9-5</i>	4	180	46	51	80
<i>thpack9-6</i>	3	103	10	10	18
<i>thpack9-7</i>	3	103	16	16	25
<i>thpack9-8</i>	3	103	4	4	5
<i>thpack9-9</i>	2	110	16	19	43
<i>thpack9-10</i>	2	110	37	55	110
<i>thpack9-11</i>	2	110	14	17	43
<i>thpack9-12</i>	3	95	45	53	68
<i>thpack9-13</i>	3	95	20	25	48
<i>thpack9-14</i>	3	95	27	27	55
<i>thpack9-15</i>	3	95	11	11	18
<i>thpack9-16</i>	3	95	21	26	55
<i>thpack9-17</i>	3	95	7	7	11
<i>thpack9-18</i>	3	47	1	1	1
<i>thpack9-19</i>	3	47	1	2	3
<i>thpack9-20</i>	3	47	2	2	3
<i>thpack9-21</i>	5	95	17	24	45
<i>thpack9-22</i>	5	95	8	9	16
<i>thpack9-23</i>	5	95	17	21	33
<i>thpack9-24</i>	4	72	5	6	9

Çizelge 7.12. Devam : KYP için GSPEKS'e göre elde edilen sonuçlar

Test Problemi	PÇS	PS	MKS	LES	GSPEKS
<i>thpack9-25</i>	4	72	4	5	7
<i>thpack9-26</i>	4	72	3	3	5
<i>thpack9-27</i>	3	95	4	5	7
<i>thpack9-28</i>	3	95	9	10	20
<i>thpack9-29</i>	4	118	15	17	35
<i>thpack9-30</i>	4	118	18	22	54
<i>thpack9-31</i>	4	118	11	13	29
<i>thpack9-32</i>	3	90	4	4	6
<i>thpack9-33</i>	3	90	4	5	6
<i>thpack9-34</i>	3	90	5	5,8	13
<i>thpack9-35</i>	2	84	2	2	3
<i>thpack9-36</i>	2	84	10	14	20
<i>thpack9-37</i>	3	102	12	23	28
<i>thpack9-38</i>	3	102	25	45	58
<i>thpack9-39</i>	3	102	12	15	18
<i>thpack9-40</i>	4	85	7	9	18
<i>thpack9-41</i>	4	85	14	15	49
<i>thpack9-42</i>	3	90	4	4	6
<i>thpack9-43</i>	3	90	3	3	5
<i>thpack9-44</i>	3	90	3	4	5
<i>thpack9-45</i>	4	99	2	3	4
<i>thpack9-46</i>	4	99	2	2	2
<i>thpack9-47</i>	4	99	3	3	5

Çizelge (7.13)'te GSPEKS yöntemine ve George ve Robinson[5]'un önerdiği sınıflandırma yöntemine göre (GRSY) yerleştirme sezgiseli aracılığı ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Dört test problemi dışında iki yönteme göre de aynı sayıda konteyner kullanılmıştır. Önerilen GSPEKS'nin *thpack9-23* ve *thpack9-39* problemlerinde daha iyi sonuç verdiği, GRSY'nın ise *thpack9-22* ve *thpack9-25* problemlerinde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Çizelge 7.13. GSPEKS ve GRSY'nın karşılaştırılması

Test Problemi	GSPEKS	GRSY	Test Problemi	GSPEK	GRSY
<i>thpack9-1</i>	53	53	<i>thpack9-25</i>	7	6*
<i>thpack9-2</i>	18	18	<i>thpack9-26</i>	5	5
<i>thpack9-3</i>	40	40	<i>thpack9-27</i>	7	7
<i>thpack9-4</i>	44	44	<i>thpack9-28</i>	20	20
<i>thpack9-5</i>	80	80	<i>thpack9-29</i>	35	35
<i>thpack9-6</i>	18	18	<i>thpack9-30</i>	54	54
<i>thpack9-7</i>	25	25	<i>thpack9-31</i>	29	29
<i>thpack9-8</i>	5	5	<i>thpack9-32</i>	6	6
<i>thpack9-9</i>	43	43	<i>thpack9-33</i>	6	6
<i>thpack9-10</i>	110	110	<i>thpack9-34</i>	13	13
<i>thpack9-11</i>	43	43	<i>thpack9-35</i>	3	3
<i>thpack9-12</i>	68	68	<i>thpack9-36</i>	20	20
<i>thpack9-13</i>	48	48	<i>thpack9-37</i>	28	28
<i>thpack9-14</i>	55	55	<i>thpack9-38</i>	58	58
<i>thpack9-15</i>	18	18	<i>thpack9-39</i>	18*	19
<i>thpack9-16</i>	55	55	<i>thpack9-40</i>	18	18
<i>thpack9-17</i>	11	11	<i>thpack9-41</i>	49	49
<i>thpack9-18</i>	1	1	<i>thpack9-42</i>	6	6
<i>thpack9-19</i>	3	3	<i>thpack9-43</i>	5	5
<i>thpack9-20</i>	3	3	<i>thpack9-44</i>	5	5
<i>thpack9-21</i>	45	45	<i>thpack9-45</i>	4	4
<i>thpack9-22</i>	16	15*	<i>thpack9-46</i>	2	2
<i>thpack9-23</i>	33*	34	<i>thpack9-47</i>	5	5
<i>thpack9-24</i>	9	9			

7.5. Tavlama Benzetimi İle Elde Edilmiş Sonuçlar

Bu bölümde KYP için tavlama benzetimi ile elde edilen sonuçlar verimiştir. Tavlama benzetiminde yerleştirme algoritması olarak önerilen yerleştirme sezgiseli kullanılmıştır. Tavlama benzetiminde sıcaklık (T), iterasyon sayısı (i), soğuma oranı (so) ve kabul oranı (R) için ikişer seviyede toplam on altı deney yapılmıştır.

T	i	so	R
200	20	0,3	0,5
500	100	0,5	0,8

Tavlama benzetimi için iki şekilde sonuç elde edilmiştir. İlk olarak parçaların yükleme sırasını gösteren rassal bir başlangıç çözüm oluşturulmuş

(RBTB) ve parça çeşitlerinin rotasyon bilgilerine göre çözümler elde edilmiştir. Komşuluklar bir parça tipinin altı konumlandırma seçeneğinden birinin rassal olarak değiştirilmesi olarak tanımlanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge (7.14)'te verilmiştir. *thpack9-10*, *thpack9-19*, *thpack9-34* ve *thpack9-44* problemlerinde LES değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 7.14. RBTB ile elde edilen sonuçlar

Test Problemi	LES	RBTB	Test Problemi	LES	RBTB
<i>thpack9-1</i>	26	29	<i>thpack9-25</i>	5	7
<i>thpack9-2</i>	10	17	<i>thpack9-26</i>	3	4
<i>thpack9-3</i>	20	38	<i>thpack9-27</i>	5	7
<i>thpack9-4</i>	27	41	<i>thpack9-28</i>	10	14
<i>thpack9-5</i>	51	77	<i>thpack9-29</i>	17	28
<i>thpack9-6</i>	10	12	<i>thpack9-30</i>	22	35
<i>thpack9-7</i>	16	21	<i>thpack9-31</i>	13	23
<i>thpack9-8</i>	4	6	<i>thpack9-32</i>	4	6
<i>thpack9-9</i>	19	26	<i>thpack9-33</i>	5	6
<i>thpack9-10</i>	55	55*	<i>thpack9-34</i>	5,8	8*
<i>thpack9-11</i>	17	28	<i>thpack9-35</i>	2	4
<i>thpack9-12</i>	53	66	<i>thpack9-36</i>	14	22
<i>thpack9-13</i>	25	38	<i>thpack9-37</i>	23	31
<i>thpack9-14</i>	27	40	<i>thpack9-38</i>	45	50
<i>thpack9-15</i>	11	17	<i>thpack9-39</i>	15	21
<i>thpack9-16</i>	26	39	<i>thpack9-40</i>	9	12
<i>thpack9-17</i>	7	10	<i>thpack9-41</i>	15	22
<i>thpack9-18</i>	1	2	<i>thpack9-42</i>	4	6
<i>thpack9-19</i>	2	2*	<i>thpack9-43</i>	3	4
<i>thpack9-20</i>	2	3	<i>thpack9-44</i>	4	4*
<i>thpack9-21</i>	24	37	<i>thpack9-45</i>	3	4
<i>thpack9-22</i>	9	15	<i>thpack9-46</i>	2	3
<i>thpack9-23</i>	21	26	<i>thpack9-47</i>	3	4
<i>thpack9-24</i>	6	10			

İkinci bir çözüm olarak, GSPEKS'ne göre oluşturulan çözüm tavlama benzetiminin başlangıç çözümü olarak alınmıştır. Bu çözüm parça çeşitlerinin rotasyon bilgilerinin değiştirilmesiyle iyileştirilmeye çalışılmıştır. Sezgisel başlangıçlı tavlama benzetimi (SBTB) ile elde edilen sonuçlar Çizelge (7.15)'te verildiği gibidir. Dokuz test problemi (*) ile gösterilmiş ve bu problemler için LES değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 7.15. SBTB ile elde edilen sonuçlar

Test Problemi	LES	SBTB	Test Problemi	LES	SBTB
<i>thpack9-1</i>	26	27	<i>thpack9-25</i>	5	6
<i>thpack9-2</i>	10	18	<i>thpack9-26</i>	3	4
<i>thpack9-3</i>	20	38	<i>thpack9-27</i>	5	6
<i>thpack9-4</i>	27	29	<i>thpack9-28</i>	10	13
<i>thpack9-5</i>	51	76	<i>thpack9-29</i>	17	23
<i>thpack9-6</i>	10	12	<i>thpack9-30</i>	22	28
<i>thpack9-7</i>	16	16*	<i>thpack9-31</i>	13	15
<i>thpack9-8</i>	4	5	<i>thpack9-32</i>	4	5
<i>thpack9-9</i>	19	19*	<i>thpack9-33</i>	5	5*
<i>thpack9-10</i>	55	55*	<i>thpack9-34</i>	5,8	12
<i>thpack9-11</i>	17	23	<i>thpack9-35</i>	2	3
<i>thpack9-12</i>	53	83	<i>thpack9-36</i>	14	19
<i>thpack9-13</i>	25	42	<i>thpack9-37</i>	23	27
<i>thpack9-14</i>	27	42	<i>thpack9-38</i>	45	57
<i>thpack9-15</i>	11	15	<i>thpack9-39</i>	15	16
<i>thpack9-16</i>	26	30	<i>thpack9-40</i>	9	11
<i>thpack9-17</i>	7	9	<i>thpack9-41</i>	15	22
<i>thpack9-18</i>	1	1*	<i>thpack9-42</i>	4	5
<i>thpack9-19</i>	2	2*	<i>thpack9-43</i>	3	4
<i>thpack9-20</i>	2	3	<i>thpack9-44</i>	4	4*
<i>thpack9-21</i>	24	31	<i>thpack9-45</i>	3	3*
<i>thpack9-22</i>	9	12	<i>thpack9-46</i>	2	2*
<i>thpack9-23</i>	21	23	<i>thpack9-47</i>	3	4
<i>thpack9-24</i>	6	9			

Çizelge (7.16)'da GSPEKS ile elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların girdisini oluşturduğu SBTB'nin sonuçları yer almaktadır. GSPEKS'nde parçaların rotasyonunu dikkate alınmamış ve yerleştirme sezgiseline göre sonuçlar elde edilmiştir. SBTB ile rotasyona izin verilerek (*) ile gösterilen otuz sekiz problemde iyileştirme yapılmıştır.

Çizelge 7.16. GSPEKS sonuçları ve SBTB ile elde edilen sonuçlar

Test Problemi	GSPEKS	SBTB	Test Problemi	LES	SBTB
<i>thpack9-1</i>	53	27*	<i>thpack9-25</i>	7	6*
<i>thpack9-2</i>	18	18	<i>thpack9-26</i>	5	4*
<i>thpack9-3</i>	40	38*	<i>thpack9-27</i>	7	6*
<i>thpack9-4</i>	44	29*	<i>thpack9-28</i>	20	13*
<i>thpack9-5</i>	80	76*	<i>thpack9-29</i>	35	23*
<i>thpack9-6</i>	18	12*	<i>thpack9-30</i>	54	28*
<i>thpack9-7</i>	25	16*	<i>thpack9-31</i>	29	15*
<i>thpack9-8</i>	5	5	<i>thpack9-32</i>	6	5*
<i>thpack9-9</i>	43	19*	<i>thpack9-33</i>	6	5*
<i>thpack9-10</i>	110	55*	<i>thpack9-34</i>	13	12*
<i>thpack9-11</i>	43	23*	<i>thpack9-35</i>	3	3
<i>thpack9-12</i>	68	83	<i>thpack9-36</i>	20	19*
<i>thpack9-13</i>	48	42*	<i>thpack9-37</i>	28	27*
<i>thpack9-14</i>	55	42*	<i>thpack9-38</i>	58	57*
<i>thpack9-15</i>	18	15*	<i>thpack9-39</i>	18	16*
<i>thpack9-16</i>	55	30*	<i>thpack9-40</i>	18	11*
<i>thpack9-17</i>	11	9*	<i>thpack9-41</i>	49	22*
<i>thpack9-18</i>	1	1	<i>thpack9-42</i>	6	5*
<i>thpack9-19</i>	3	2*	<i>thpack9-43</i>	5	4*
<i>thpack9-20</i>	3	3	<i>thpack9-44</i>	5	4*
<i>thpack9-21</i>	45	31*	<i>thpack9-45</i>	4	3*
<i>thpack9-22</i>	16	12*	<i>thpack9-46</i>	2	2
<i>thpack9-23</i>	33	23*	<i>thpack9-47</i>	5	4*
<i>thpack9-24</i>	9	9			

7.6. Çözüm Yöntemleri ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde KYP için önerilen tüm çözüm yöntemleri ve bu yöntemlerle elde edilen sonuçlara bir arada yer verilmiştir. Tüm çözüm yöntemleri ile elde edilen sonuçlar Çizelge (7.17)'de verilmiştir. Çizelge (7.18)'de ise LES ile çözüm yöntemleri ile elde edilen sonuçlar arasındaki uzaklıklar yüzde olarak verilmiştir.

Çizelge 7.17. Çözüm yöntemleri ve elde edilen sonuçlar

Test Problemi	LES	MMTS	RBTB	SBTB	GSPEKS	GRSY
<i>thpack9-1</i>	26	27	29	27	53	53
<i>thpack9-2</i>	10	9**	17	18	18	18
<i>thpack9-3</i>	20	20*	38	38	40	40
<i>thpack9-4</i>	27	29	41	29	44	44
<i>thpack9-5</i>	51	73	77	76	80	80
<i>thpack9-6</i>	10	10*	12	12	18	18
<i>thpack9-7</i>	16	16*	21	16*	25	25
<i>thpack9-8</i>	4	5	6	5	5	5
<i>thpack9-9</i>	19	19*	26	19*	43	43
<i>thpack9-10</i>	55	55*	55*	55*	110	110
<i>thpack9-11</i>	17	18	28	23	43	43
<i>thpack9-12</i>	53	55	66	83	68	68
<i>thpack9-13</i>	25	25*	38	42	48	48
<i>thpack9-14</i>	27	28	40	42	55	55
<i>thpack9-15</i>	11	13	17	15	18	18
<i>thpack9-16</i>	26	24**	39	30	55	55
<i>thpack9-17</i>	7	9	10	9	11	11
<i>thpack9-18</i>	1	2	2	1*	1*	1*
<i>thpack9-19</i>	2	2*	2*	2*	3	3
<i>thpack9-20</i>	2	3	3	3	3	3
<i>thpack9-21</i>	24	23**	37	31	45	45
<i>thpack9-22</i>	9	9*	15	12	16	15
<i>thpack9-23</i>	21	21*	26	23	33	34
<i>thpack9-24</i>	6	6*	10	9	9	9

Çizelge 7.17. Devam : Çözüm yöntemleri ve elde edilen sonuçlar

Test Problemi	LES	MMTS	RBTB	SBTB	GSPEKS	GRSY
<i>thpack9-25</i>	5	5*	7	6	7	6
<i>thpack9-26</i>	3	4	4	4	5	5
<i>thpack9-27</i>	5	5*	7	6	7	7
<i>thpack9-28</i>	10	10*	14	13	20	20
<i>thpack9-29</i>	17	18	28	23	35	35
<i>thpack9-30</i>	22	23	35	28	54	54
<i>thpack9-31</i>	13	14	23	15	29	29
<i>thpack9-32</i>	4	5	6	5	6	6
<i>thpack9-33</i>	5	5*	6	5*	6	6
<i>thpack9-34</i>	5, 8	9	8*	12	13	13
<i>thpack9-35</i>	2	3	4	3	3	3
<i>thpack9-36</i>	14	14*	22	19	20	20
<i>thpack9-37</i>	23	24	31	27	28	28
<i>thpack9-38</i>	45	47	50	57	58	58
<i>thpack9-39</i>	15	15*	21	16	18	19
<i>thpack9-40</i>	9	9*	12	11	18	18
<i>thpack9-41</i>	15	18	22	22	49	49
<i>thpack9-42</i>	4	5	6	5	6	6
<i>thpack9-43</i>	3	3*	4	4	5	5
<i>thpack9-44</i>	4	5	4*	4*	5	5
<i>thpack9-45</i>	3	4	4	3*	4	4
<i>thpack9-46</i>	2	4	3	2*	2*	2*
<i>thpack9-47</i>	3	4	4	4	5	5

Çizelge (7.17)'de KYP için elde edilen sonuçlar verilmiştir. LES değerine ulaşılan problemler (*), daha iyi elde edilen sonuçlar (**) ile gösterilmiştir. Genel olarak en iyi sonucu MMTSY vermiştir. Önerilen yerleştirme sezgiseli, tüm sezgisel yöntemlerin çözümünde ve tavlama benzetiminde yerleştirme algoritması olarak kullanılmıştır. Bu yöntemle de LES değerlerine ulaşılan problemler mevcuttur. GSPEKS ve GRSY ile elde edilen sonuçlar parçaların rotasyonlarına izin verilmediği için iyi sonuçlar vermemiş gibi görünse de, bu yöntemlerle iki test problemi için optimum değere ulaşılmıştır. Ayrıca tavlama benzetiminde rotasyona izin verilerek bu çözümlerin iyileştirilmesi, önerilen sıralama ve yerleştirme sezgisellerinin iyi çözümler oluşturduğunu göstermektedir. Tavlama benzetimi ile de bazı problemlerde LES ulaşılmış olması, tavlama benzetiminin etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Çizelge 7.18. LES ile çözüm yöntemleri sonuçları arasındaki uzaklık

Test Problemi	MMTS(%)	RBTB(%)	SBTB(%)	GSPEKS(%)	GRSY(%)
<i>thpack9-1</i>	3,85	11,54	3,85	103,85	103,85
<i>thpack9-2</i>	-10,00	70,00	80,00	80,00	80,00
<i>thpack9-3</i>	0,00	90,00	90,00	100,00	100,00
<i>thpack9-4</i>	7,41	51,85	7,41	62,96	62,96
<i>thpack9-5</i>	43,14	50,98	49,02	56,86	56,86
<i>thpack9-6</i>	0,00	20,00	20,00	80,00	80,00
<i>thpack9-7</i>	0,00	31,25	0,00	56,25	56,25
<i>thpack9-8</i>	25,00	50,00	25,00	25,00	25,00
<i>thpack9-9</i>	0,00	36,84	0,00	126,32	126,32
<i>thpack9-10</i>	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
<i>thpack9-11</i>	5,88	64,71	35,29	152,94	152,94
<i>thpack9-12</i>	3,77	24,53	56,60	28,30	28,30
<i>thpack9-13</i>	0,00	52,00	68,00	92,00	92,00
<i>thpack9-14</i>	3,70	48,15	55,56	103,70	103,70
<i>thpack9-15</i>	18,18	54,55	36,36	63,64	63,64
<i>thpack9-16</i>	-7,69	50,00	15,38	111,54	111,54
<i>thpack9-17</i>	28,57	42,86	28,57	57,14	57,14
<i>thpack9-18</i>	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
<i>thpack9-19</i>	0,00	0,00	0,00	50,00	50,00
<i>thpack9-20</i>	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
<i>thpack9-21</i>	-4,17	54,17	29,17	87,50	87,50
<i>thpack9-22</i>	0,00	66,67	33,33	77,78	66,67
<i>thpack9-23</i>	0,00	23,81	9,52	57,14	61,90
<i>thpack9-24</i>	0,00	66,67	50,00	50,00	50,00

Çizelge 7.18. Devam : LES ile çözüm yöntemleri sonuçları arasındaki uzaklık

Test Problemi	MMTS(%)	RBTB(%)	SBTB(%)	GSPEKS(%)	GRSY(%)
<i>thpack9-25</i>	0,00	40,00	20,00	40,00	20,00
<i>thpack9-26</i>	33,33	33,33	33,33	66,67	66,67
<i>thpack9-27</i>	0,00	40,00	20,00	40,00	40,00
<i>thpack9-28</i>	0,00	40,00	30,00	100,00	100,00
<i>thpack9-29</i>	5,88	64,71	35,29	105,88	105,88
<i>thpack9-30</i>	4,55	59,09	27,27	145,45	145,45
<i>thpack9-31</i>	7,69	76,92	15,38	123,08	123,08
<i>thpack9-32</i>	25,00	50,00	25,00	50,00	50,00
<i>thpack9-33</i>	0,00	20,00	0,00	20,00	20,00
<i>thpack9-34</i>	12,50	0,00	50,00	62,50	62,50
<i>thpack9-35</i>	50,00	100,00	50,00	50,00	50,00
<i>thpack9-36</i>	0,00	57,14	35,71	42,86	42,86
<i>thpack9-37</i>	4,35	34,78	17,39	21,74	21,74
<i>thpack9-38</i>	4,44	11,11	26,67	28,89	28,89
<i>thpack9-39</i>	0,00	40,00	6,67	20,00	26,67
<i>thpack9-40</i>	0,00	33,33	22,22	100,00	100,00
<i>thpack9-41</i>	20,00	46,67	46,67	226,67	226,67
<i>thpack9-42</i>	25,00	50,00	25,00	50,00	50,00
<i>thpack9-43</i>	0,00	33,33	33,33	66,67	66,67
<i>thpack9-44</i>	25,00	0,00	0,00	25,00	25,00
<i>thpack9-45</i>	33,33	33,33	0,00	33,33	33,33
<i>thpack9-46</i>	100,00	50,00	0,00	0,00	0,00
<i>thpack9-47</i>	33,33	33,33	33,33	66,67	66,67
Ortalama	13,87	43,78	27,58	69,33	68,91

MMTS ile elde edilen sonuçların LES'e olan ortalama uzaklığı Çizelge (7.18)'de görüldüğü üzere % 13,87'dir. En düşük ortalama bu çözüm yöntemiyle elde edilmiştir. SBTB'nin LES'ten ortalama uzaklığı % 27,58, RBTB'nin ise % 43,78'dir. En yüksek uzaklık ise parçaların rotasyonlarına izin verilmeyen GSPEKS ve GRSY yöntemlerindedir.

8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tezde konteyner yükleme ve konteyner seçim problemleri için karma tamsayılı matematiksel modeller, matematiksel model temelli sezgisel çözüm yöntemi ile sezgisel ve metasezgisel çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

KYP için geliştirilen karma tamsayılı matematiksel modellerin literatürdeki Chen ve Wersterlund'tan farkı, konteynerleri bağımsız girdi olarak değil çeşitlerine göre dikkate almasıdır. Aynı zamanda modeller iki amaçlı olarak geliştirilmiş, firenin enküçüklenmesine ek olarak kullanılan konteyner çeşit sayıları da enküçüklenmeye çalışılmıştır. Böylece konteyner çeşit sayısının fazla olmasından kaynaklanan maliyetlerde azalma hedeflenmiştir. KYP için iki amaçlı geliştirilen matematiksel modelleri skalerleştirmek için ağırlıklandırılmış toplam yöntemi ve konik skalerizasyon yöntemi kullanılmıştır. Modellerde parçaların üç boyutta da rotasyonlarına izin verilmiştir. Ancak geliştirilen karma tamsayılı tek ve çok amaçlı matematiksel modeller küçük boyutlu problemlerin çözümünde yeterli olduğu için, büyük problemler için farklı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

KYP için bir amaçlı ve iki amaçlı matematiksel model temelli bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Sezgisel yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada parçalar konteynerlere hacimleri doğrultusunda atanırken, ikinci aşamada parçalar konteynerlere fireyi enküçülecek şekilde yerleştirilmektedir. Atanamayan tüm parçalar için yeni bir küme oluşturularak, sezgisel atanmayan parça kalmayınca kadar devam ettirilmektedir. Parçaların rotasyonuna izin verilen bu yaklaşımda, makul zamanda iyi sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar literatürde yer alan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

KYP için bir yerleştirme ve parçalar için öncelik belirleme sezgiseli geliştirilmiştir. Öncelik belirleme sezgiseli literatürde yer alan bir başka sınıflandırma yöntemi ile karşılaştırılmış ve iyi çözümler verdiği görülmüştür. Ayrıca önerilen yerleştirme sezgiseline göre elde edilen sonuçlar da yine literatürde mevcut olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Son olarak KYP için bir tavlama benzetimi önerilmiştir. Önerilen tavlama benzetiminin literatürden farkı, kullanılan yerleştirme sezgiselinin tez kapsamında geliştirilen yerleştirme sezgiseli olmasıdır. Tavlama benzetiminde parçaların

rotasyonlarına izin verilmiş olup, iki farklı yolla çözümler elde edilmiştir. Bunlar rassal başlangıç oluşturularak elde edilen çözümler ve önerilen öncelik belirleme sezgiseline göre elde edilen çözümlerdir. Tavlama benzetimi aracılığıyla sezgisel yöntemle elde edilen başlangıç çözümler iyileştirilmiştir.

KYP için önerilen tüm çözüm yöntemleri ile elde edilen sonuçlara yer verilmiş ve bu sonuçların literatürdeki en iyi sonuçlara olan uzaklıkları hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Chen C.S., Lee S.M. ve Shen Q.S., An analytical model for the container loading problem, *European Journal of Operational Research*, 80, 1, 68-76, 1965.
- [2] Westerlund, J., Papageorgiou, L. G. ve Westerlund, T., *A MILP model for N-dimensional allocation*, Computer And Chemical Engineering, 31, 1702–1714 ,2007
- [3] Kasimbeyli N., Saraç T. ve Kasimbeyli R., A two-objective mathematical model without cutting patterns for one-dimensional assortment problems, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235, 16, 4663-4674, 2011.
- [4] Dereli, T., ve Das, G.S., A hybrid simulated anealing algorithm or solving multi-objective container-loading problems, *Applied Artificial Intelligent*, 24,5, 463-486, 2010
- [5] George, J. A., Robinson, D.F., A heuristic for packing boxes into a container, *Computers and Operations Research*, 7,3, 147–156 , 1980
- [6] Morabito, R. ve Areneles, M., An AND/OR graph approach to the container loading problem, *International Transactions in Operational Research*, 1,1, 59–73,1994
- [7] Gilmore P.C., Gomory R.E., A linear programming approach to the cutting-stock problem, *Operations Research*, 9, 6, 849-859, 1961.
- [8] Gehring, H. ve Bortfeldt, A., A genetic algorithm for solving the container loading problem, *International Transactions in Operational Research*, 4,5-6, 401–418 ,1997
- [9] Bischoff, E.E. ve Ratcliff, M.S.W., Issues in the development of approaches to container loading, *OMEGA*, 23,4, 377–390 ,1995
- [10] Bischoff, E.E., Janetz, F., Ratcliff, M.S.W., Loading pallets with non-identical items, *European Journal of Operational Research*, 84,3, 681–692,1995
- [11] Eley, M., *A bottleneck assignment approach to the multiple container loading problem*, OR Spectrum, 25,1, 45–60,2003
- [12] Maura, A. ve Oliveira J.F., A biased random key genetic algorithm for 2D and 3D bin packing problems,*International Journal of Production Economics*, 145,2, 500–510,2013
- [13] Gonçalves J.F. ve Resende M.G.C, A biased random key genetic algorithm for 2D and 3D bin packing problems, *International Journal of Production Economics*, 145, 2, 500-510 , 2013.
- [14] Bortfeldt, A. ve Homberger, J., Packing first, routing second—a heuristic for the vehicle routing and loading problem, *Computers and Operations Research*, 40,3, 873–885,2013
- [15] Westerlund, J., Papageorgiou, L. G. ve Westerlund, T., A problem formulation for optimal mixed-sized box packing, *Computer Aided Chemical Engineering*, 20, 913–918 ,2005

- [16] Dyckhoff, H., A typology of cutting and packing problems, *European Journal of Operational Research*, 44, 2, 145–19, 1990
- [17] Washer, G., Haussner, H., Schumann, H., An improved typology of cutting and packing problems, *European Journal of Operational Research*, 183, 3, 1109–1130, 2007
- [18] Bortfeldt, A. ve Washer, G., Constraints in container loading—A state-of-the-art review, *European Journal of Operational Research*, 229,1, 1–20,2013
- [19] Biscoff, E.E. ve Marriott, M.D., A comparative evaluation of heuristics for container loading, *European Journal of Operational Research*, 44,2, 267–276 ,1990
- [20] El-Ghazali Talbi, *METAHEURISTICS From Design to Implementation*, Wiley, New Jersey, 2009.
- [21] Glover, F., Tabu Search: Part I, *ORSA Journal on Computing*, 1,13,196–206 ,1962
- [22] Ehrgott, M., *A Multicriteria Optimization*, Multicriteria Optimization, Springer, Berlin, Heidelberg ,2005
- [23] Gasimov R. N., Characterization of the Benson proper efficiency and scalarization in nonconvex vector optimization, In: M. Koksalan, S. Zionts (eds.) *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium*, Book Series: Lecture Notes in Econom. and Math. Systems, 507, 189-198, 2001.
- [24] Kasimbeyli R., A Nonlinear Cone Separation Theorem and Scalarization in Nonconvex Vector, *SIAM J. on Optimization*, 20, 1591-1619, 2010.
- [25] Kasimbeyli R., Conic scalarization method in multi-objective optimization, *Journal of Global Optimization*, 56, 2, 279-297, 2013.
- [26] Gass, S. ve Saaty, T., The computational algorithm for the parametric objective function, *Naval Res. Logistics Quart.*,2,39,1955
- [27] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Veechi, M.P., Optimization by simulated annealing, *Science*, 220, 4598, 671–680,1983
- [28] Ivancic, N., Mathur, K., Mohanty, B.B., An integerprogramming based heuristic approach to the three-dimensional packing problem, *Journal of Manufacturing and Operations Management*, 2,4, 268–298,1989