

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ BOYUTLU PALET YÜKLEME PROBLEMİNİN
KARIŞIK TAM SAYILI PROGRAMLAMA (MILP) VE
HİBRİT GENETİK ALGORİTMA İLE ÇÖZÜMÜ**

DOKTORA TEZİ

Sena KIR

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Harun Reşit YAZGAN

Şubat 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU PALET YÜKLEME PROBLEMİNİN
KARIŞIK TAM SAYILI PROGRAMLAMA (MILP) VE
HİBRİT GENETİK ALGORİTMA İLE ÇÖZÜMÜ

DOKTORA TEZİ

Sena KIR

Enstitü Anabilim Dalı

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 12/02/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Alpaslan FIĞLALI
Jüri Başkanı



Doç. Dr.
Serol BULKAN
Üye



Prof. Dr.
Cemil ÖZ
Üye



Prof. Dr.
İbrahim ÇİL
Üye



Prof. Dr.
Harun Reşit YAZGAN
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Sena KIR
12.02.2019

TEŞEKKÜR

Akademik hayata adım attığım ilk günden beri bana bilgi ve tecrübeleriyle rehberlik yapan, beni motive eden ve her zaman yanımda olduğuna inandığım kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Harun Reşit YAZGAN’a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Doktora tez çalışmam süresince bana zaman ayırdıkları, beni dinledikleri, değerlendirme ve yorumlarıyla tez çalışmamın gelişme sürecine sağladıkları katkılardan dolayı tez izleme jürimde yer alan Prof. Dr. İbrahim ÇİL ve Prof. Dr. Cemil ÖZ hocalarıma çok teşekkür ederim.

Ayrıca doktora tez çalışmamda ve diğer akademik çalışmalarımda her zaman fikir alışverişi yapabildiğim; manevi desteklerini, kıymetli zamanlarını, bilgi ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen akademisyen arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Elif Elçin GÜNAY, Dr. Öğr. Üyesi Merve CENGİZ TOKLU ve ekip arkadaşlarım Arş. Gör. Furkan YENER ve Arş. Gör. Serap ERCAN CÖMERT’ e de teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca beni her zaman destekleyen sevgili anneme, babama, kardeşime, sevgili eşime ve hayattaki en büyük motivasyon kaynağım oğlum Ahmet Kerem KIR’a çok teşekkür ederim.

Son olarak doktora eğitimim süresince sağlamış olduğu burstan dolayı TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Dairesi Başkanlığı’na teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	4
1.2. Motivasyon	4
1.3. Çalışmanın Literatüre Katkısı	5
BÖLÜM 2.	
PROBLEMİN TANIMI	6
2.1. Konteyner Yükleme Problemleri	6
2.2. Üç Boyutlu Palet Yükleme Problemleri (3B-PYP)	13
2.2.1. Çalışılan üç boyutlu palet yükleme problemi	14
BÖLÜM 3.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	17
3.1. Konteyner Yükleme Problemleri (KYP'ler) ile İlgili Çalışmalar	18
3.1.1. Tekli konteyner yükleme problemleri (TKYP) ile ilgili çalışmalar	20
3.1.2. Kutulama problemleri ile ilgili çalışmalar	25

3.1.3. Çoklu konteyner yükleme problemleri (ÇKYP) ile ilgili çalışmalar	26
3.1.4. Şerit yükleme ve açık boyutlu konteyner yükleme problemleri ile ilgili çalışmalar	27
3.1.5. Konteyner yükleme problemleri (KYP'ler) ile ilgili diğer çalışmalar	29
3.2. Üç Boyutlu Palet Yükleme Problemleri (3B-PYP) ile İlgili Çalışmalar.....	30
3.3. Literatür Araştırmasının Sonucu	33
BÖLÜM 4.	
ÇÖZÜM METODU	36
4.1. Önerilen Çözüm Yöntemi 1- MILP	36
4.1.1. Bir 3B-PYP örneğinin önerilen MILP ile çözümü	42
4.2. Önerilen Çözüm Yöntemi 2- HGA	44
4.2.1. Genetik algoritmalar	45
4.2.2. Önerilen hibrit genetik algoritma (HGA)	54
4.2.3. Bir 3B-PYP örneğinin önerilen HGA ile çözümü	61
BÖLÜM 5.	
SAYISAL ANALİZLER	67
5.1. Problemin Parametrik Analizleri	67
5.2. Önerilen HGA'nın Sınanması.....	73
BÖLÜM 6.	
ÖRNEK OLAY ÇALIŞMASI	80
BÖLÜM 7.	
ÇALIŞMANIN ENDÜSTRİ 4.0'A YANSIMALARI.....	91
BÖLÜM 8.	
SONUÇ	94

KAYNAKLAR	97
EKLER.....	104
ÖZGEÇMİŞ	109



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

3B-PYP	: Üç boyutlu palet yükleme problemi
A-DÇO	: Akıllı dinamik çaprazlama operatörü
AIS	: Artificial immune system- Yapay bağışıklık sistemi
ANOVA	: Analysis of variance- Varyans analizi
AYK	: Aile yardım kolisi
BF	: Benzerlik faktörü
ÇK	: Çadır kolisi
ÇKYP	: Çoklu konteyner yükleme problemi
DASD	: En dip alt sol doldurma
GA	: Genetik algoritma
GK	: Gıda kolisi
HGA	: Hibrit genetik algoritma
HGA-L	: Büyük ölçekli problemler için hibrit genetik algoritma
KYP	: Konteyner yükleme problemi
MILP	: Mixed integer linear programming- Karışık tam sayılı doğrusal programlama
PSO	: Particle swarm optimization- Parçacık sürü eniyileme
PYP	: Palet yükleme problemi
TKYP	: Tekli konteyner yükleme problemi
TMK	: Tıbbi malzeme kolisi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Döndürme şekilleri.....	8
Şekil 4.1. Tablo 4.2'de verilen özet çözüm raporunun görsel ifadesi	44
Şekil 4.2. İkili kodlama yapısı örneği	47
Şekil 4.3. Sekizli kodlama yapısı örneği	47
Şekil 4.4. Onaltılı kodlama yapısı örneği	48
Şekil 4.5. Permütasyon kodlama yapısı örneği	48
Şekil 4.6. Değer kodlama yapısı örneği	48
Şekil 4.7. Stokastik evrensel örnekleme seçim metodu örneği	50
Şekil 4.8. Tek noktalı çaprazlama operatörü örneği	51
Şekil 4.9. İki noktalı çaprazlama operatörü örneği	52
Şekil 4.10. Düzgün çaprazlama operatörü örneği	52
Şekil 4.11. GA veri akış diyagramı	55
Şekil 4.12. Bir A-DÇO örneği.....	57
Şekil 4.13. Benzer nesneleri birleştirme operasyonu örneği.....	59
Şekil 4.14. HGA'nın veri akış diyagramı	60
Şekil 4.15. DASD algoritmasının hareket şeması	61
Şekil 4.16. DASD algoritmasının veri akış diyagramı.....	62
Şekil 4.17. Tablo 4.4'te verilen değerlerin görsel ifadesi.....	66
Şekil 5.1. Palet yükleme oranına göre çözüm zamanı çizelgesi	73

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Bir 3B-PYP örneğine ait veriler	43
Tablo 4.2. Tablo 4.1'de verilen problemin çözüm raporu özeti.....	43
Tablo 4.3. Bir 3B-PYP'ye ait veriler	63
Tablo 4.4. Tablo 4.3'de verilen problemin çözüm raporu özeti.....	63
Tablo 5.1. BR1-BR7 test problemlerinin çözüm değerleri	69
Tablo 5.2. Yedi farklı problem grubunun hacimsel kullanım oranı açısından ANOVA sonucu.....	69
Tablo 5.3. Yedi farklı problem grubunun çözüm zamanı açısından ANOVA sonucu	70
Tablo 5.4. Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin veri setinden elde edilen test problemlerinin önerilen MILP ile çözüm değerleri.....	71
Tablo 5.5. Üç farklı problem grubunun hacimsel kullanım oranı açısından ANOVA sonucu.....	71
Tablo 5.6. Üç farklı problem grubunun çözüm zamanı açısından ANOVA sonucu	72
Tablo 5.7. Problem parametrelerinin optimal çözüm zamanı üzerindeki etkisi.....	73
Tablo 5.8. Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin veri setinden elde edilen test problemlerinin önerilen HGA ve DASD ile çözüm değerleri.....	74
Tablo 5.9. Önerilen HGA ve DASD algoritmasının çözümlerine ait konteyner sayısı değerlerinin ilişkili t testi sonuçları.....	75
Tablo 5.10. Önerilen HGA ve DASD algoritmasının çözümlerine ait hacimsel kullanım oranı değerlerinin ilişkili t testi sonuçları	76
Tablo 5.11. Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin veri setinden elde edilen test problemlerinin önerilen HGA, PSO ve HGA-L ile çözüm değerleri...	76
Tablo 5.12. PSO ve HGA-L algoritmasının çözümlerine ait konteyner içerisindeki boş alan değerlerinin ilişkili t testi sonuçları.....	77

Tablo 5.13. PSO ve önerilen HGA algoritmasının çözümlerine ait konteyner içerisindeki boş alan değerlerinin ilişkili t testi sonuçları	78
Tablo 5.14. HGA-L ve önerilen HGA'nın çözümlerine ait konteyner içerisindeki boş alan değerlerinin ilişkili t testi sonuçları	78
Tablo 6.1. Taşınacak yardım malzemelerinin özellikleri	80
Tablo 6.2. 1-9 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	81
Tablo 6.3. 10 no'lu paletin yerleşim detayları	82
Tablo 6.4. 11-20 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	83
Tablo 6.5. 21-24 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	83
Tablo 6.6. 35 no'lu paletin yerleşim detayları	84
Tablo 6.7. 36-37 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	85
Tablo 6.8. 38 no'lu paletin yerleşim detayları	85
Tablo 6.9. 39 no'lu paletin yerleşim detayları	86
Tablo 6.10. 40-47 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	86
Tablo 6.11. 58-61 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	87
Tablo 6.12. 62 no'lu paletin yerleşim detayları	87
Tablo 6.13. 63-65 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	87
Tablo 6.14. 66 no'lu paletin yerleşim detayları	88
Tablo 6.15. 67-71 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	88
Tablo 6.16. 72-75 no'lu paletlerin yerleşim detayları.....	89

ÖZET

Anahtar kelimeler: Üç boyutlu palet yükleme problemi, konteyner yükleme problemi, karışık tam sayılı doğrusal programlama, hibrit genetik algoritma, akıllı dinamik çaprazlama operatörü

Bu tez çalışmasında, konteyner yükleme problemlerinin (KYP) bir çeşidi olan üç boyutlu palet yükleme problemi (3B-PYP), problemin doğası gereği göz önüne alınması gereken kısıtların yanı sıra, kontrollü döndürme kısıtı, kırılabilirlik kısıtı, yüke dayanım kısıtı ve bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtı gibi ek yükleme kısıtları altında ele alınmıştır.

Ele alınan 3B-PYP'nin optimum çözümü için bir karışık tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, küçük ölçekli 3B-PYP'yi optimize etmek için kullanılabilen fakat müşteri sayısı, nesne sayısı ve palet yükleme oranı gibi problem parametrelerindeki artışlara bağlı olarak büyük ölçekli gerçek hayat problemlerinin optimizasyonu için kabul edilebilir bir sürede cevap verememektedir. Bu sebeple büyük ölçekli problemlerin çözümü için biri yığın oluşturma tabanlı, diğeri yatay katman oluşturma tabanlı olmak üzere iki farklı sezgisel yaklaşım ile hibritlenmiş bir hibrit genetik algoritma (HGA) geliştirilmiştir.

Önerilen HGA'daki yığın oluşturma tabanlı sezgisel yaklaşım, yüklenecek olan nesnelerden en az iki boyutu birbirine eşit olanları genetik algoritma (GA) arama yapısını kullanarak belirler ve bu nesneleri birbiriyle birleştirerek, iki nesneyi de kapsayan yeni bir nesne olarak tanımlar. Bu şekilde yerleştirilecek nesne sayısının azaltılması sağlanmış olur. Birleştirme işlemleri yapılırken GA'daki kromozom uzunlukları bozulabilir. Bu sebepten dolayı literatürdeki mevcut çaprazlama operatörleri kullanılamamaktadır ve akıllı dinamik çaprazlama operatörü (A-DÇO) adı verilen bir çaprazlama operatörü geliştirilmiştir. Önerilen HGA'daki bir diğer sezgisel algoritma da literatürde var olan en dip alt sol doldurma (DASD) algoritmasıdır. Bu algoritmanın adımları sayesinde tüm nesnelerin paletlere nihai yüklemesi yapılır ve tüm nesnelerin paletler üzerindeki koordinatları belirlenir.

Önerilen HGA'nın klasik DASD ile test problemleri üzerinde karşılaştırılması yapılmış ve daha iyi çözümler verdiği istatistiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca önerilen HGA, literatürde var olan bir parçacık sürü eniyileme algoritması (PSO) ve HGA-L adı verilen bir başka HGA ile de test problemleri üzerinde karşılaştırılmıştır. Önerilen HGA'nın bu algoritmalarla da daha iyi sonuçlar verdiği istatistiksel olarak gösterilmiştir. Sonuç olarak, ele alınan 3B-PYP için önerilen HGA, daha iyi sonuçlar vermekte ve özellikle gerçek hayatta robot kolları vasıtası yapılan otomatik paletleme operasyonları için kullanılması önerilmektedir.

SOLVING THE 3D-PALLET LOADING PROBLEM BY A MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING AND A HYBRID GENETIC ALGORITHM

SUMMARY

Keywords: Three-dimensional pallet loading problem, container loading problem, mixed integer linear programming, hybrid genetic algorithm, the intelligent dynamic crossover operator

In this thesis, the three-dimensional pallet loading problem (3D-PLP), which is a kind of container loading problems (CLP), was studied under the constraints as rotation, fragility, load-bearing strength, relative positioning as well as the constraints that should be considered due to the nature of the problem.

A mixed integer linear programming (MILP) model was developed for the optimal solution of the studied 3D-PLP. The developed model can be used to optimize small-scale 3D-PLP. However, due to increase in some problem parameters as the number of customers, the number of objects and the pallet loading rate, it cannot be solved in an acceptable time for large-scale real-life problems. For this reason, a new hybrid genetic algorithm (HGA) was developed for solving large-scale problems. It was hybridized with two different heuristic approaches, one of them is based on a stack-building approach and the other one is based on a layer building approach.

The stack-building approach determines the objects which have at least two equal dimensions by searching structure of genetic algorithm (GA). This operation reduces the number of objects to be placed. The chromosome lengths in the GA may change because of the combining operation. For this reason, existing crossover operators in the literature cannot be employed. And a crossover operator called the intelligent dynamic crossover operator (I-DCO) was developed. Another heuristic approach in the proposed HGA is deepest bottom left fill (DBLF) approach which is available in the literature. Under favor of the steps of DBLF, all objects can be loaded to the pallets and the coordinates of all objects on the pallets are determined.

The proposed HGA was compared with classical DBLF on test problems and it was shown that the proposed HGA produced better solutions statistically. In addition, the proposed HGA was compared with two existing meta-heuristic algorithms on test problems. It was shown that the proposed HGA achieved better results than these algorithms. As a result, the proposed HGA for the 3D-PLP yielded much better results.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Özellikle elektronik iletişimin yaygınlaşmasıyla beraber ithalat ve ihracat, geçmişe göre çok daha popüler hale gelmiştir. Başta ithalat ve ihracat faaliyetleri olmak üzere aslında tüm üretim ve satış faaliyetleri çok ciddi lojistik ve sevkiyat maliyetlerini beraberinde getirmektedir. Deniz Ticaret Odası'nın yayınladığı Deniz Ticareti dergisinin Kasım 2017 sayısında, dünyada harcanan her bir doların yaklaşık %25'inin lojistik faaliyetleri için harcandığına dikkat çekilmektedir. Yapılan araştırmalara göre, dünyada lojistik sektörü hacminin 8 trilyon dolar civarında olduğu belirlenmiş ve gelecek birkaç yıl içerisinde de bu rakamın 10-12 trilyon dolar seviyelerine çıkacağı öngörülmektedir. Ülkemiz lojistik sektörü hacmi ise 50-60 milyar dolar seviyelerinde olup dünya lojistik hacminin yaklaşık %1'ini oluşturmaktadır (Aka, 2017). Ülkemizdeki lojistik sektörünün gayri safi yurtiçi hâsıla içerisindeki payı ise yaklaşık %14'tür ve bunun daha da artırılması için önerilen yeni projeler desteklenmektedir.

Lojistik sektöründeki gelişmeler, birçok problemi de beraberinde getirmektedir. Sektörün özellikle taşımacılık kısmı ele alındığında, iki temel problem tipi göze çarpmaktadır. Bunlardan birincisi araç rotalama problemleri, diğeri de araç (konteyner) yükleme problemleridir. Yakın geçmişte, araç rotalama problemlerinin ele alındığı çok sayıda çalışma karşımıza çıkmaktadır. Bu problemin farklı kısıt/kısıtlar altında (kapasite, mesafe, zaman kısıtları, vs.) matematiksel programlama ile modellenip, çözümleri için de yeni çözüm yaklaşımları geliştirildiği görülmektedir. Araç rotalama problemlerinin literatürde yoğun olarak ele alınmasının bir başka sebebi de, rotalama problemlerinin hayatın her alanında karşımıza çıkmasıdır. Hemen hepimiz motorlu veya motorsuz araçlarımızla hatta yaya olarak, bir yerden başka bir kaç yere ulaşmaya çalıştığımızda bir rotalama problemi ile karşı karşıya kalırız. Bu sebeple belki de lojistik problemleri çatısı altında, insanlığın en sık karşılaştığı problem tipi araç rotalama problemleridir desek yanlış olmaz.

Diğer bir taraftan, her ne kadar araç rotalama problemleri kadar hayatın her alanında karşımıza çıkmasa da, özellikle sevkiyat operasyonlarının ilk adımı olan konteyner yükleme problemleri (KYP'leri) de çözülmesi gereken önemli problemlerdendir. Literatür incelendiğinde KYP'lerin 1990'lardan itibaren giderek artan bir ilgi ile çalışıldığı görülmektedir. Bu ilginin sebebi, önceden bahsedildiği gibi lojistik sektöründe taşımacılığın artması ve dolayısıyla da taşıma operasyonları esnasında ortaya çıkan problemlere çözüm aranması olduğu söylenebilir. Yani KYP'lerin ele alınış amacı teoriden daha ziyade, pratik hayattaki yansımasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, bu tez çalışmasının esin kaynaklarından biri olan indirimli market zincirlerini ele alalım. Hemen herkes bir indirimli market zincirinin herhangi bir şubesine gittiğinde, bir köşede streçli bir palet üzerinde raflara dizilmeyi bekleyen ürünlerin olduğuna denk gelmiştir. Çünkü bu market zincirleri, genellikle satın aldıkları ya da kendi markalarıyla ürettirdikleri ürünleri bölge dağıtım merkezlerinden şubelere, ilgili şubelerin talep bilgilerine göre elleçleyerek, paletler üzerinde sevk eder. Bu sevk işlemi esnasında iki tip yerleştirme problemi ortaya çıkar. Birincisi talep edilen ürünlerin en az sayıda palet ile sevk edilmesi, ikincisi de ürünlerin yerleştirildiği paletlerin, önceden belirlenen rotaya bağlı olarak ilk teslim edilecek paletin en son yüklenmesi gibi birtakım kurallarla araçlara yüklenmesi problemidir. Görüldüğü gibi bu taşıma örneğinde biri üç boyutlu, diğeri ise iki boyutlu olarak ele alınabilecek iki farklı araç yerleştirme ve bir de kapasite kısıtlı araç rotalama problemi karşımıza çıkmaktadır. Bu problemler ne kadar doğru/gerçekçi kısıtlar altında ele alınırsa, elde edilen çözümlerin de pratikte yansıması o kadar uygulanabilir ve değerli olacaktır.

Konteyner/palet yükleme problemlerinin önemiyle ilgili bir başka örnek vermek gerekirse, Türkiye'nin sayılı büyük süt işleme ve süt ürünleri üretim tesislerinden birinde yapılan incelemede, 339 çeşit ürünün çoğunluğu yukarıda bahsedilen büyük market zincirleri bölge dağıtım merkezlerine ve üreticinin kendi distribütörlerine olmak üzere, günde ortalama 150 araçlık (tır) bir sevkiyat ile karşılaşılmıştır. Her tırın özdeşi olduğu ve 33 palet aldığı kabulü ile üretilen 339 çeşit ürünün taleplere uygun olarak, günlük ortalama 4950 adet palete el işçiliği ile yüklendiği gözlenmiştir. Palet yerleştirmede yapılacak en ufak, örneğin %1'lik bir iyileştirme, günlük 150 araçlık sevkiyatı 135'e düşürebilir ki; bu da karayolu taşımacılığında sadece sabit maliyetler

(şoförlü araç kirası) göz önüne alındığında bile günlük sevkiyat maliyetlerinde binlerce liralık maliyet düşüşüne tekabül eder.

Konteyner/palet yükleme problemlerinin çözümleri, genellikle kullanıcıya (yerleştirmeyi yapan kişiye), yerleştirilecek nesnenin referans alınan bir noktasının, konteynerin/paletin X, Y, Z eksenleri üzerindeki koordinatlarını ve nesnenin X, Y, Z eksenlerinin konteynerin X, Y, Z eksenlerinden hangilerine paralel geldiğini (nesnenin konteyner içerisinde hangi pozisyonda durduğunu) gösterir. Bu durum nesne sayısı arttıkça kullanıcı için anlaşılması güç, karmaşık bir hâl alır. Konteyner/palet yükleme problemlerinin çözümlerinin kullanılabilmesinin en pratik yolu robotik yükleme ile mümkündür. Konteyner/paleta yüklenecek olan nesneler sırası ile yerleştirmeyi yapacak olan robot koluna, akan bir bant üzerinde gönderilir. Aynı zamanda bu nesnelerin, konteyner içerisindeki koordinatları ve konteyner/palet içerisindeki duruşları da (problemin çözümü) robot koluna bildirilir. Robot kolu bu yerleştirme bilgilerine göre, önüne gelen nesneleri olması gerektiği gibi döndürerek konteyner/palet içerisinde olması gereken yerlerine yerleştirir. Bu şekilde robotik yüklemenin/paletlemenin örnekleri gerçek hayatta mevcuttur. Robot koluna bildirilen çözüm, ne kadar başarılı bir yerleştirme yapıyorsa o kadar avantaj sağlar. Yani böyle bir sistemde, asıl odaklanılması gereken nokta, konteyner/palet yerleştirmenin başarısıdır.

Lojistik sevkiyat problemini bütünsel olarak ele alırsak yükleme süreci, bitmiş ürün deposundan sevk edilecek ürünlerin toplanıp yükleme/paletleme alanına alınması ile başlayıp, paletlerle yükleme yapılacaksa paletlere yüklenmesi ve ardından (eğer gerekliyse önceden belirlenmiş araç rotalarına göre) paletlerin konteynerlere yüklenmesi ya da ürünlerin paletsiz, direkt olarak konteynerlere yüklenmesi ile sona erecektir. Burada çalışılması gereken problemler; bitmiş ürün deposu tasarımı (tesis planlama), bitmiş ürün deposundan ürünlerin en kısa yolları takip edilerek toplanması (kapasite kısıtlı araç rotalama), sevk edilecek ürünlerin konteynerlere veya paletlere en az boşluk kalacak ya da en az konteyner veya palet gerekecek şekilde yüklenmesi (tekli veya çoklu konteyner/palet yükleme) problemleri olarak sayılabilir. Bunlara ek olarak yüklenen araçların rotalanması problemleri de en önemli sevkiyat

problemlerinden biridir. Bazı durumlarda konteyner/palet yükleme probleminden önce çözülmesi istenen araç rotalama problemlerinin, bazı durumlarda yükleme yapıldıktan sonra, bazı durumlarda ise yükleme ile eş zamanlı olarak çözülmesi de istenebilir. Bütün bu sevkiyat süreci, bütünsel bir problemler zincirinin bir şekilde (uygulamada genellikle tecrübeye dayalı olarak) çözülmesiyle işler. Bu tezin konusu olan üç boyutlu palet yükleme problemi (3B-PYP) de bu sevkiyat zincirin önemli bir halkasını oluşturur.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı KYP'lerin bir türevi olan 3B-PYP'yi ele alarak, sektörün ihtiyacı olan bazı özel kısıtlar altında en uygun çözümü üreterek, sevk edilecek olan ürünlerin en az sayıda palete yüklenerek sevk edilmesini sağlamaktır. Kontrollü döndürme, düşük yoğunluklu nesnelerin kendinden yüksek yoğunluklu nesnelerin üzerine konulması (yük taşıma/yığınlama), kırılabilir nesnelerin üzerine başka nesne konulmaması (kırılabilirlik) ve her bir palet/konteynere tek bir müşterinin ürünlerinin yerleştirilmesi (bağımlı nesnelerin bir arada olması) kısıtları altında ele alınan kutulama problemleri ve/veya 3B-PYP'ler için kullanılabilir.

1.2. Motivasyon

Bu çalışmanın ilk fikrî çıkış noktası saha araştırmaları esnasında karşılaşılan, Türkiye'nin sayılı büyük süt işleme ve süt ürünleri üretim tesislerinden birine ait 3B-PYP'nin yakından incelenmesi ile oluşmuştur. İncelenen firmanın beş üretim tesisinin sadece birinden günde ortalama 150 tır ürün, yaklaşık 4950 adet palet yüklenerek, müşteri taleplerini karşılamak üzere ülkenin çeşitli yerlerine sevk edilmektedir. Burada yaşanan karmaşa ve tecrübeye dayalı el yordamıyla bulunan çözümler, 3B-PYP'nin ne kadar önemli bir problem olduğunun anlaşılmasına, canlı örnek teşkil etmiştir. Daha sonra bu fikir üzerinden devam eden saha araştırmaları da, özellikle de indirim market zincirlerinin bu problemi çok daha farklı boyut ve spesifikasyonlardaki ürünlerle yaşadığının, etkin ve verimli bir çözüme ihtiyaç duyduğunun tespit

edilmesini sağlamıştır. Buradan yola çıkılarak yapılan literatür araştırmalarıyla birlikte bu tezde ele alınan problemin tüm detayları (içeriği, kısıtları) ortaya çıkmıştır.

1.3. Çalışmanın Literatüre Katkısı

Bu çalışmanın literatüre en önemli katkısı ele alınan 3B-PYP'nin çözümü için geliştirilen hibrit genetik algoritmadır (HGA). Çünkü önerilen algoritma ile elde edilen çözümler, test problemleri kullanılarak, genel koşullar altında literatürde son dönemlerde yayınlanmış bir parçacık sürü eniyileme (PSO) algoritması ve bir başka hibrit genetik algoritma (HGA-L) ile karşılaştırılmış ve büyük ölçekli problemler de daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Çalışmanın literatüre bir başka katkısı da önerilen HGA içerisinde literatürde daha önce kullanılmamış bir operatörün geliştirilmiş olmasıdır. Bu operatör diğer sabit noktalı çaprazlama operatörlerinden farklı olarak, çaprazlanacak kromozomların uzunluklarına bakılmaksızın, yan yana gelmesi mümkün olduğunca istenmeyen genlerin tespit edilerek çaprazlanması mantığına dayalı olarak çalışmaktadır.

Son olarak çalışma, kontrollü döndürme kısıtı, kırılgenlik kısıtı, yüke dayanım kısıtı ve bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtı gibi ek yükleme kısıtları altında ele alınan küçük ölçekli 3B-PYP'lerin çözümü için geliştirilen karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli (MILP) ile literatüre katkı sağlamaktadır.

BÖLÜM 2. PROBLEMİN TANIMI

Bu tezde ele alınan problem, temelde KYP'lerin bir türevi olan 3B-PYP'dir. En (W), boy (L) ve yüksekliği (H) bilinen bir konteynere, konteyner boyutlarını aşmayacak ve birbirleriyle çakışmayacak şekilde, en (w_i), boy (l_i) ve yüksekliği (h_i) bilinen en fazla sayıda nesnenin yerleştirildiği, ya da bir konteynerdeki hacimsel kullanım oranının enbüyüklendiği üç boyutlu ortogonal yerleştirme/paketleme problemlerine genel olarak KYP denir.

3B-PYP'nin KYP'den en temel farkı yükleme yapılan aracın dört tarafı kapalı olan bir konteyner değil, palet olmasıdır (Bischoff ve ark., 1995; Arghavani ve Abdou, 1996). Buna istinaden, paletler yüklendikten sonra etrafı streçlendiği için problemin doğası gereği nesneler zemine düşmeye karşı korumalıdır, yani nesnelerin yatay dengede olduğu varsayımı yapılır (Bortfeldt ve Wäscher, 2013).

3B-PYP'de, amaç fonksiyonunun verilen tüm nesnelerin en az sayıdaki paletlere yerleştirilmesi olarak ele alındığı problemler çoklu palet yükleme problemleri olarak sınıflandırılabilir (Terno ve ark., 2000). Amaç fonksiyonundan bağımsız olarak, yerleştirilmesi istenilen nesneler özdeş ise ya da nesne çeşitliliği çok düşükse literatürde buna imalatçı palet yükleme problemleri, nesne çeşitliliği yüksek ise de distribütör palet yükleme problemleri denir (Bischoff ve ark., 1995).

2.1. Konteyner Yükleme Problemleri

Bortfeldt ve Wäscher (2013) KYP'yi "Konteyner yükleme problemleri, üç boyutlu küçük nesnelerin (kargoların) üç boyutlu dikdörtgensel (kübik) büyük objelere (konteynerlere), verilen bir amaç fonksiyonunu optimize eden ve iki temel geometrik olurluluk kuralını sağlayan geometrik atama problemleri olarak yorumlanabilir. Bu

kurallardan biri tüm küçük nesnelerin konteyner içerisinde yer alması, diğeri de küçük nesnelerin çakışmamasıdır.” cümleleriyle tanımlamışlardır.

Bir başka deyişle, genel bir KYP’de en, boy ve yükseklikleri sırasıyla w, l, h olan dikkörtgensel paralel yüzlü konteyner(ler)e yerleştirilmek üzere en, boy ve yükseklikleri sırasıyla w_i, l_i ve h_i olan n tane farklı dikkörtgensel paralel yüzlü nesneler kümesi verilir. Temel amaç, verilen konteynere boyutlarını aşmadan ve nesneleri birbiriyle çakıştırmadan en fazla sayıda nesneyi, en fazla hacimsel kullanım oranı ile ortogonal olarak yerleştirmektir.

Allen (2011) KYP’nin yukarıda verilen temel kısıtları içeren matematiksel programlama modelini sunmuştur. Bu modelde A kümesi $L_0^1, L_0^2, L_0^3 \in R^+$ sırasıyla en, boy ve yüksekliği ifade eden büyük nesneler kümesi; N nesne sayısı ve $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ olmak üzere B kümesi de $L_i^1, L_i^2, L_i^3 \in R^+$ sırasıyla en, boy ve yüksekliği ifaden küçük nesneler kümesidir. $x_i^1, x_i^2, x_i^3 \in R \geq 0$ küçük nesnelerin büyük nesneler içerisindeki en sol alt köşe koordinatlarını ve $X_i \in \{0,1\}$ küçük nesnelerin yerleştirilip yerleştirilmediklerini gösterir.

Denklem 2.1 nesnelerin hacimlerini, Denklem 2.2 çakışma ve Denklem 2.3 nesnelerin yerleştirilme durumunu göstermek üzere;

$$W_i = \prod_{j=1}^3 L_i^j \quad (2.1)$$

$$\text{çakışma}(k, i, j) = \begin{cases} 1 & x_i^k < x_j^k + L_j^k \text{ ve } x_j^k < x_i^k + L_i^k \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\text{yerleştirilmemiş}(k, i) = \begin{cases} 1 & x_i^k < 0 \text{ veya } x_i^k + L_i^k > L_0^k \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.3)$$

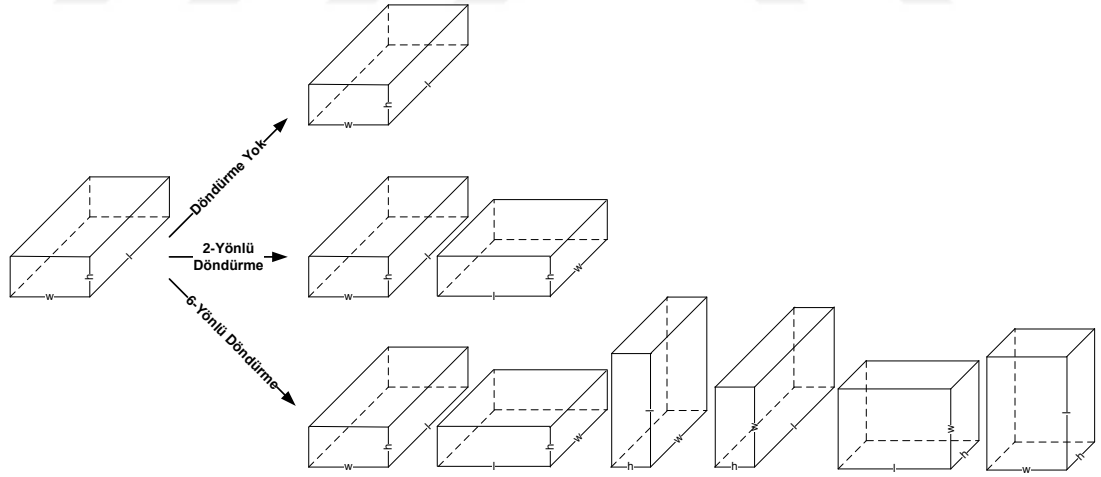
$$\text{En büyük} \quad \sum_{i=1}^N X_i W_i \quad (2.4)$$

$$X_i \prod_{k=1}^3 \text{çakışma}(k, i, j) = 0 \quad \forall 1 \leq i < j \leq N \quad (2.5)$$

$$X_i \sum_{k=1}^3 \text{yerleştirilmemiş}(k, i) = 0 \quad \forall 1 \leq i \leq N \quad (2.6)$$

Denklem 2.4 yerleştirilen nesnelerin toplam hacmini enbüyükleyen amaç fonksiyonudur. Denklem 2.5 yerleştirilen küçük nesnelerin çakışmamasını sağlar. Denklem 2.6 her bir küçük nesnenin büyük nesnenin (konteynerin) sınırları içerisinde yerleştirilmesini sağlar.

Bu temel kısıtların dışında birçok farklı kısıt ve özellikler de probleme eklenebilir. Örneğin; kontrollü döndürme kısıtı bunlardan biridir. Bazı nesnelerin döndürülmesine izin verilmeyebilir ya da sadece 2-yönlü (sadece z eksenini üzerinde) döndürmeye ya da 6-yönlü (tüm eksenlerde) döndürmeye izin verilebilir. Bu durum Şekil 2.1.'deki görselde anlatılmaktadır. Bu tezde ele alınan problemde, kontrollü döndürme kısıtı göz önünde bulundurulmuştur. Yani her bir nesnenin döndürülüp döndürülemeyeceği, döndürülebilirse 2-yönlü mü, yoksa 6-yönlü mü döndürülebileceği bilgileri göz önüne alınarak çözülmüştür. Literatürde sıkça rastlanan diğer kısıtlar ve açıklamaları şöyledir:



Şekil 2.1. Döndürme şekilleri

Maksimum ağırlık kısıtı (Weight limit constraint), her bir konteynerin izin verilen veya taşıyabileceği en fazla yük kapasitesi olarak tanımlanabilir (Terno ve ark., 2000; Bortfeldt ve Gehring, 2001; Chan ve ark., 2006; Lau ve ark., 2009; Liu ve ark., 2011; Zúñiga ve ark., 2011; Lim ve ark., 2013; Costa ve Captivo, 2016; Paquay ve ark., 2018).

Yüke dayanım veya yığınlama kısıtında (Load-bearing strength or stacking constraint), ürünler yerleştirilirken nesnelerin yoğunluğu göz önünde bulundurulur. Böylece daha yoğun bir nesne, daha düşük yoğunluğa sahip bir başka nesnenin üzerine yerleştirilemez (Arghavani ve Abdou, 1996; Abdou ve Elmasry, 1999; Abdou ve Elmasry, 2000; Bortfeldt ve Gehring, 2001; Junqueira ve ark., 2012; Jamrus ve Chien, 2016).

Yük dengesi/dağılımı kısıtı (Load balance or weight distribution constraint), konteyner veya palet içerisindeki yükün (yerleştirilen nesne ağırlıklarının) tabana mümkün olduğunca eşit olacak şekilde dağılmasının göz önüne alınmasıdır. Konteynerin yüklendiği araçların aks yerlerine göre dağılmasına dikkat edilmesi de bu kısıt altında değerlendirilebilir (Terno ve ark., 2000; Bortfeldt ve Gehring, 2001; Lim ve ark., 2003; Yeung ve Tang, 2005; Chan ve ark., 2006; Lau ve ark., 2009; Liu ve ark., 2011; Lim ve ark., 2013; Moon ve Nguyen, 2014; Costa ve Captivo, 2016; Trivella ve Pisinger, 2016; Paquay ve ark., 2016; Paquay ve ark., 2018).

Kırılganlık kısıtı (Fragility constraint), yüke dayanım kısıtının bir benzeridir. Bazı nesnelerin yüke dayanımı çok çok az olabilir ve bu nesnelerin en üste konulup desteklenmesi de gerekebilir. Kırılgan olarak tanımlanan nesnelerin üzerine başka nesne yerleştirilmesi istenmez (Paquay ve ark., 2016).

Denge kısıtı (Stability constraint), araç hareket ederken nesnelerin zarar görmemesi için sabit durması gerekmektedir. Pratikte çeşitli destek parçaları, köpük parçaları ya da özellikle paletlerin streçlenmesi ile nesneler desteklenebilir. Bunun dışında nesnelerin ağırlık merkezlerinin havada asılı olmaması ya da başka bir nesnenin üst yüzeyi tarafından desteklenmesi nesnelerin dengede olmalarını sağlar. Dikey (statik) denge, araç hareketsiz iken nesnenin konteynerin zeminine düşmesini engeller (Bortfeldt ve Gehring, 2001; Liu ve ark., 2011; Ramos ve ark., 2016b; Costa ve Captivo, 2016). Yatay (dinamik) denge kısıtı da, araç hareketli iken nesnenin X ve Y koordinatlarında sabit durmasını sağlar (Bischoff and Ratcliff, 1995a).

Destek kısıtı (Support constraint), konteyner veya palet tabanına yerleştirilmeyen nesnelerin yan yüzeylerinin diğer nesneler tarafından yerleştirilmesinin istendiği durumdur. Problemlerde kısmi destek ya da tam destek olarak dikkate alınması istenebilir (Fanslau ve Bortfeldt, 2009; Zhang ve ark., 2012; Zhu ve ark., 2012; Zhu ve Lim, 2012; Wang ve ark., 2013; Sheng ve ark., 2014; Elhedhli ve ark., 2017; Paquay ve ark., 2018).

Yükleme önceliği kısıtları (Loading priority constraints), tüm nesnelerin konteynere veya palete sığmadığı durumlarda hangisinin yüklenip, hangisinin geride bırakılacağı bu kısıta göre belirlenir (Bischoff and Ratcliff, 1995a). Bunun dışında son kullanma tarihine göre öncelik verilmesi (Ren ve ark., 2011), ya da ilk teslim edilecek öncelikli kargoların konteynerin ön tarafına yerleştirilmesi de yükleme önceliği kısıtı altında karşılaşılan durumlardandır (Jamrus ve Chien, 2016).

Giyotinlenebilme kısıtı (Guillotine cutting/guillotineable constraint), göz önüne alındığında yükleme ve boşaltma işlemlerinin kolaylaştırılması amacıyla, konteyner veya palet yüzeylerine paralel kesikler dizisi elde edilebilecek şekilde yerleştirme yapılır (Fanslau ve Bortfeldt, 2009; Sheng ve ark., 2014).

Bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtı, farklı kurallara göre farklı isimlerle belirtilse de temelde hep aynı mantık vardır. Havayolu taşımacılığında, bir yolcunun tüm bagajının yolcunun biletinin olduğu uçağa yüklenmesi (Chan ve ark., 2006), ya da bir müşterinin ürünlerinin tamamının aynı konteynere yüklenmesi gibi farklı şekillerde ifade edilebilir (Sheng ve ark., 2017; Huang ve ark., 2016). Hepsinin temelinde nesnelerle yerleştirilecek yer arasında, yolcu bagajı-uçak, müşteri siparişi-konteyner gibi bağlantıların kurulması mantığı vardır.

Çoklu aktarma kısıtı (Multi-drop constraint), bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtına benzetilebilir. Birbirine yakın yerlere teslim edilecek nesneler, yükün büyük bir kısmının boşaltılmasını ve yeniden yüklenmesini önlemek için dağıtım sırasına göre birbirine yakın yerlere yerleştirilir (Bischoff ve Ratcliff, 1995a; Junqueira ve ark., 2012).

İstenmeyen yükleme kısıtı (Separation of items within a container constraint), bazı nesnelerin aynı konteynere ya da bir arada yüklenmesinin yasakladığı durumların göz önüne alınmasıdır (Eley, 2003). Örneğin, gıda maddelerinin temizlik maddeleri ya da kimyasallarla birlikte aynı yerde olması istenmeyebilir.

KYP'lerin, ele alınış biçimlerine göre farklılık içermesinden ya da amaç fonksiyonlarına göre farklı sınıflarda ve farklı kısıtlar altında incelenmesinden bağımsız olarak, yerleştirilecek nesne çeşitliliğine göre homojen, zayıf heterojen, heterojen, güçlü heterojen gibi alt sınıflarda da değerlendirilmektedir. KYP'ler ve onun çeşitleri literatürde NP-Zor olarak sınıflandırılmaktadır (Martello ve ark. 2000).

Literatürde KYP'ler, Dyckhoff (1990)'un tipolojisine göre girdi enküçüklenmesi ya da çıktı enbüyüklenmesi olarak iki grupta incelenir:

Girdi enküçüklenmesi problem tipinde, yerleştirilecek olan küçük nesneler kümesindeki tüm öğeler, büyük nesneler (konteynerler) kümesindeki bir dizi öğeye atanır. Büyük nesneler kümesindeki öğeler, tüm küçük nesneleri barındırmak için yeterlidir ve tüm küçük nesneler en az sayıdaki büyük nesnelere atanmalıdır. Küçük nesneler için bir seçim problemi söz konusu değildir (Wäscher ve ark, 2007).

Çıktı enbüyüklenmesi problem tipinde de, bir dizi küçük nesnenin, büyük nesneler kümesinin tüm öğelerini barındırmak için yeterli olmadığı bir dizi büyük nesneye atamasını ifade eder. Tüm büyük nesneler kullanılmalıdır, diğer bir deyişle; büyük nesnelerle ilgili seçim sorunu yoktur. Tüm büyük nesnelere en fazla sayıdaki küçük nesneler atanmalıdır (Wäscher ve ark, 2007).

Literatürdeki bu temel ayrıştırmanın yanı sıra KYP'ler amaç fonksiyonuna, yerleştirilecek nesne veya konteyner çeşitliliğine göre tekli konteyner yükleme, kutulama, şerit yükleme, çoklu konteyner yükleme, sırt çantası yükleme ve palet yükleme problemleri olarak temel sınıflara da ayrılabilir. Bu sınıfların içerisinde de nesne ve konteyner çeşitliliğinin az olmasından çok olmasına; yani homojen, zayıf heterojen, heterojen, güçlü heterojen gibi özelliklere göre de alt sınıflar mevcuttur. Bu

tez çalışmasında, literatürdeki çalışmalar sadece temel sınıflandırmalara göre ve şöyle incelenmiştir:

- Tekli konteyner yükleme problemleri-TKYP (Single container loading problems): Boyutları bilinen bir konteynere, boyutları bilinen nesnelerin en fazla hacimsel kullanımı sağlayacak şekilde yerleştirilmesini amaçlayan problemlerdir. Bu problemler, çıktının en büyüklendiği problemlerdendir.
- Kutulama problemleri (Bin-packing problems): KYP'ler, tüm nesnelerin en az sayıda konteynere yerleştirilmesi amacı ile ele alındığı zaman kutuluma problemleri olarak ifade edilmektedir (Pisinger, 2002). Bu problemler, girdinin en küçüklendiği problemlerdendir.
- Şerit yükleme problemleri (Strip-packing problems): Bu tip problemlerde, nesnelerin yükleneceği konteynerin genellikle eni ve yüksekliği belirli bir değer, boyu ise sınırsız kabul edilir. Amaç, yüklenmesi istenen tüm nesneleri en düşük boydaki konteynere yüklemektir (Bortfeldt ve Mack, 2007). Bu problemler, girdinin en küçüklendiği problemlerdendir.
- Çoklu konteyner yükleme problemleri-ÇKYP (Multi-container loading problems): Kutulama problemlerinden en önemli farkı, ürünlerin yerleştirileceği konteynerlerin özdeş olmamasıdır. Tüm nesnelerin farklı boyutlardaki konteynerlere en az sayıda konteyner ihtiyaç duyulacak şekilde yerleştirilmesi amaçlanır (Pisinger, 2002). Bu problemler, girdinin en küçüklendiği problemlerdendir.
- Sırt çantası yükleme problemleri (Knapsack loading problems): Tek bir konteynere, çok farklı boyutlardaki çeşitli nesnelerden en yüksek miktarda yerleştirmenin amaçlandığı problemlerdir (Bortfeldt ve Wäscher, 2013). Yerleştirilecek nesnelerin çeşitliliğine göre güçlü heterojen, zayıf heterojen gibi alt türleri de vardır. Bu problemler de çıktının en büyüklendiği problemlerdendir.

2.2. Üç Boyutlu Palet Yükleme Problemleri (3B-PYP)

3B-PYP'ler KYP'lerin bir çeşidi olduğu için, KYP'lerde dikkate alınan hemen hemen bütün kısıtlar 3B-PYP'lerde de dikkate alınabilir. Buna istisna olarak, paletlerin etrafı streçle desteklendiğinden dolayı problemin doğası gereği yerleştirilen nesnelerin yatay dengede olması söylenebilir. Dolayısıyla KYP'ler alt başlığında ifade edilen diğer bütün kısıtlar 3B-PYP'ler için de göz önüne alınabilir.

Literatürde, KYP'ler amaç fonksiyonundan bağımsız olarak nesne çeşitliliğine göre homojen, zayıf heterojen, heterojen, güçlü heterojen gibi alt sınıflarda da değerlendirilmektedir. Bu durum 3B-PYP'ler incelenirken iki başlık altında sınıflandırma yapılarak göz önüne alınmaktadır:

- İmalatçıların palet yükleme problemleri
- Distribütörlerin palet yükleme problemleri

Bu iki sınıflandırmadaki en temel farklılık imalatçıların paletlere yükleyeceği ürün çeşitliliğinin distribütörlerden daha az olduğu varsayımının yapılmasıdır. Üç boyutlu palet yükleme problemleri konusunda literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, sadece optimizasyon yapılan çalışmaların genel olarak 'imalatçıların palet yükleme problemleri' sınıfına giren problemleri çalıştıkları görülmektedir. Bu çalışmalarda benzer olarak, problemlerdeki palet ebadının özdeş olduğu ve çoğunlukla da sadece dikey (Z) ekseninde (2-yönlü) döndürme yapıldığı da tespit edilmiştir.

Özellikle matematiksel programlama kullanılarak yapılan çözümlerde sipariş sayısı, siparişlerdeki ürün adedi, paletlerin ebadı ve döndürülme şekli çözüm zamanını direkt olarak etkilemektedir. Bu yüzden sipariş sayısı ve siparişlerdeki ürün adedine müdahale edilemediği durum düşünüldüğünde standart palet ebadı ile sadece dikey ekseninde döndürme yapılarak çözüm aranmasının, çözüm süresini kısaltma amaçlı uygulandığını düşündürmektedir. Buna benzer olarak sezgisel ve meta-sezgisel yöntemlerin kullanıldığı çalışmalarda da problemin aynı şekilde ele alınması, çözüm

uzayını daraltıp, en iyi çözüme erişme zamanını azaltabileceği ve/veya çözüm kalitesinin artmasında etkili olabileceğini düşündürmektedir.

Literatürde 3B-PYP'lerin çözümünde kullanılan yöntemlerin büyük bir çoğunluğunu sezgisel veya meta-sezgisel yöntemler oluşturmaktadır. Bunun sebebi problemin karmaşıklık sınıfının NP-Zor olmasıdır (Terno ve ark., 2000). Matematiksel programlama yönteminin ele alındığı çalışmalar, sezgisel veya meta-sezgisel yöntemlerin kullanıldığı çalışmalara temel oluşturmaktadır. Fakat çoğunlukla da büyük boyutlu problemlerin çözümlerini içermemektedirler. Bu çalışmalar incelendiğinde sadece modeli tanımlayıcı ve doğrulayıcı örnekler görülmektedir.

2.2.1. Çalışılan üç boyutlu palet yükleme problemi

Bu tezde ele alınan 3B-PYP'nin bazı kısıtları çalışmayı literatürdeki diğer çalışmalardan farklılaştırmaktadır. Bu kısıtlar gerekçeleriyle birlikte şöyle açıklanabilir:

- Bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtı: Ele alınan problemde göz önüne alınan her palete tek bir müşteriye ait ürünlerin yüklenmesi olarak tanımlanabilen kısıt, KYP'lerin ele alındığı çalışmalarda nadiren rastlanan bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtına benzemektedir. Her bir palete sadece tek bir müşteriye ait ürünler yerleştirilir. Bu kısıtın ele alınmasının sebebi; gerçek hayatta müşterilerin genellikle ürünlerini teslim alırken, ürünlerin yerleştirildiği paletlerde sadece kendi sipariş ettikleri ürünlerin bulunmasını talep etmeleridir. Aksi halde ürünlerin müşterilere teslimi aşamasında paletlerin streçleri bozularak ve bazen de paletsiz olarak teslimatın yapılması durumları oluşabilir. Bu durumlar, hem müşterinin ürünleri depolaması açısından, hem de araç içerisinde teslim edilmeyi bekleyen diğer ürünlerin hasarsız bir şekilde taşınması açısından problem yaratabilir. Araç içerisinde streçi bozulmuş bir paleti taşımak, yatay dengeyi bozarak o paletteki ürünlerin devrilip zarar görmesine neden olabilir. Bunu engellemek için teslimat aşamasında streçi bozulan her paleti, yeniden yola çıkmadan

streçlemek gerekir. Bu durum özellikle de zaman kaybına neden olacaktır. Tüm problemleri ortadan kaldırmak için, hem müşteri memnuniyeti hem de sevkiyat güvenliği açısından, her bir palete sadece bir müşteriye sevk edilecek ürünlerin yerleştirilmesi istenen bir durumdur. Müşterinin siparişleri bir paleti doldurmasa bile, müşteri memnuniyetinin ön planda tutulması nedeniyle bir sonraki sipariş bekletilmeksizin sevkiyatın yapılması istenmektedir.

- Kontrollü döndürme kısıtı: Konteyner yükleme ve 3B-PYP'lerin ele alındığı çalışmalarda, kontrollü döndürme kısıtı, bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtına nazaran daha sık ele alınmaktadır. Bu tezde ele alınan 3B-PYP'de paletlere yerleştirilecek bazı ürünler, X, Y ve Z eksenleri etrafında (6-yönlü) döndürülebilmektedir. Buna ek olarak, bazı hassas ürünler için sadece dikey eksen (2-yönlü) döndürülebilme kısıtı da söz konusudur. Şöyle ki; elektronik cihazlar, sıvı ürünler vb. ürünler yüklenirken yan yatırılarak yüklendiklerinde hasar görebilirler. Belirtilen bu tip ürünlerin sadece dikey (Z) ekseninde, yani XY-düzleminde döndürülebilmeleri istenir.
- Kırılmalık kısıtı: Bu kısıt da literatürde az sayıda çalışmada ele alınan bir kısıttır. Kırılmalık olarak tanımlanan nesnelerin üzerine başka nesne konulmayacak şekilde ya da en üste yerleştirilmesini sağlar. Buna en güzel örnek cam eşyalar için verilebilir.
- Yüke dayanım veya yığılma kısıtı: Bu kısıt da literatürde az sayıda çalışmada ele alınan bir diğer kısıttır. Paletlere yerleştirilecek nesnelerin yoğunluklarına bakılarak, bir nesnenin üzerine kendinden daha yoğun bir başka nesne yerleştirilmemesini sağlar. Burada yoğunluğun dikkate alınmasının nedeni, yukarı yerleştirilen nesnenin altındaki nesneye uyguladığı gücün taban alanına oranından, yani uyguladığı Denklem 2.7'de ifade edilen basma gerilmesinin formülünden ileri gelmektedir.

$$\text{Basma Gerilmesi} = \frac{\text{yoğunluk} \times \text{en} \times \text{boy} \times \text{yükseklik} \times \text{yerçekimi kuvveti}}{\text{en} \times \text{boy}} \quad (2.7)$$

Bu tezde ele alınan, 3B-PYP çoğunlukla problemin doğası gereği göz önüne alınması gereken veya literatürde sıklıkla göz önüne alınan şu kısıtları da içermektedir:

- Verilen tüm nesnelerin yerleştirilmesi kısıtı: Çoklu palet yükleme, kutulama ya da ÇKYP’lerde ele alınan temel kısıttır.
- Nesnelerin birbirine çakıştırılmadan yerleştirilmesi kısıtı: Fiziksel yerleştirme kısıtı olarak da bilinmektedir. Tüm üç boyutlu yükleme problemlerinde aynı şekilde ele alınır.
- Nesnelerin, verilen palet boyutlarını aşmayacak şekilde yerleştirilmesi kısıtı: Açık boyutlu yükleme problemleri hariç diğer tüm yükleme problemlerinde, şerit yükleme problemlerinde de kısmi olarak ele alınır.
- Ortogonal yerleştirme kısıtı: Nesnelerin her bir ekseninin, paletin her bir eksenine paralel olacak şekilde yerleştirilmesini ifade eder.

Ele alınan 3B-PYP, verilen tüm nesnelerin en az sayıda palet kullanılacak şekilde yerleştirilmesi amacını dikkate alır. Kullanılan paletler özdeş olmasına rağmen problem bu amaç fonksiyonu sebebiyle çoklu palet yükleme problemleri sınıfında yer alır. Ele alınan sayısal örneğin (nesne boyutu verilerinin) niteliğine göre, yerleştirilecek nesne çeşitliliğinin yüksek olduğu durumlarda distribütör palet yükleme problemleri, tam tersi örnekler de imalatçı palet yükleme problemleri sınıfında yer alır.

BÖLÜM 3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tezin konusu olan 3B-PYP, literatürde daha sık karşılaşılan KYP’lerin bir türüdür ve bu problemler temelde yapısal olarak birbirinin aynısı kabul edilir. Dyckhoff (1990) literatürde, stok kesimi veya kesim hurdası (cutting stock or trim loss) problemleri, kutu veya şerit paketleme (bin or strip packing) problemleri, araç, palet veya KYP, yerleştirme problemleri, sırt çantası problemleri vs. gibi isimlerle ifade edilmiş olan problemlerin hepsinin aslında kesme ve paketleme (cutting and packing) problemlerinin farklı isimleri olduğunu ifade etmiştir. Junqueira ve Morabito (2013) de, literatürde geçen konteyner paketleme problemleri (container packing problems), üç boyutlu sırt çantası problemleri (three-dimensional knapsack problems), TKYP, 3B-PYP, üç boyutlu paletleme problemleri (three-dimensional palletization problems), üç boyutlu kesme problemleri (three-dimensional cutting problems) vs. gibi isimlerle tabir edilen problemlerinin hepsinin aynı problemi işaret ettiğini ifade etmişlerdir. Bu problemlerin en temel ortak yanı, bir grup kutunun uzayda çakışmayacak şekilde bir konteynere en fazla hacmi doldurarak veya en fazla hacim kullanım oranını sağlayarak üç boyutlu yerleştirme modelinin (şablonunun) bulunmaya çalışılmasıdır.

Literatür araştırması yapılırken, bu farklı isim karmaşası çalışmaların içeriğinin doğru anlaşılması bakımından ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu tezde, ifadeler kullanılırken söz konusu karmaşadan arındırılmak maksadıyla hususi gayret gösterilmiştir. Literatürde geçen “container packing, rectangular packing, container loading, cargo loading” terimleri konteyner yükleme olarak, “bin packing” terimi de kutulama olarak tabir edilmiştir. Bunun dışında probleme ait özel bir kısıt ya da durum varsa ayrıca ifade edilmiştir.

KYP’ler ve 3B-PYP’ler, sadece konteyner ebatları ile palet ebatlarının farklı olmasından dolayı veya duruma özgü yerleştirme kısıtlarından dolayı literatürde farklı

çalışmalara konu olmuşlardır. Yapılan literatür araştırması sonucunda genel olarak çalışmaların, KYP başlığı altında yoğunlaştığı görölmektedir. Buna istinaden bu bölümde literatür araştırması, KYP'ler ve 3B-PYP'ler olmak üzere iki ana başlık altında verilecektir.

3.1. Konteyner Yükleme Problemleri (KYP'ler) ile İlgili alışmalar

Literatürdeki KYP'leri ele alan çalışmaları, amaç fonksiyonu, yerleştirilecek nesne çeşitliliği, konteyner çeşitliliği gibi özelliklerine bakarak, TKYP, kutulama problemleri, KYP, şerit yükleme problemleri, açık boyutlu KYP'ler gibi alt sınıflara ayırarak inceleyebiliriz.

TKYP'lerde genellikle amaç fonksiyonu, tek bir konteynere mümkün olan en fazla sayıda nesnenin yerleştirilmesi olarak belirlenir. Kutulama problemlerinde ise amaç fonksiyonu, verilen tüm nesnelerin en az sayıda özdeş konteyner kullanılarak yerleştirilmesi olarak belirlenir. KYP'lerin kutuluma problemlerinden tek farkı genellikle konteynerlerin özdeş değil, çeşitli olmasıdır. Bu problem tipinde dikdörtgensel konteynerlerin haricinde özellikle hava taşımacılığı uygulamalarında farklı kesik paralel yüzlü (truncated parallelepiped) şekillere sahip konteynerlerin de çalışmalara konu olduğu görölebilir. şerit yükleme problem tiplerinde konteynerin en, boy ya da yükseklik gibi bir kenarının sınırsız olduğu varsayımı yapılarak, bu kenarın uzunluğunun enküçüklenmesi amaçlanır. Açık boyutlu problemlerde de bu durum konteynere ait tüm kenarlar için geçerlidir.

Bu başlık altında incelenen KYP'leri ele alan çalışmalar, amaçlarının yanı sıra mümkün olduğu kadar benzer veya tamamlayıcı kısıtlarına göre de gruplandırılarak incelenecektir.

Matematiksel programlama modelleri, bir problemin ya da daha genellemek gerekirse bir sistemin temel bileşenlerini ve bu bileşenlerin birbirleriyle olan ilişkilerini ortaya çıkararak, sistemin davranışını inceleyip yorumlamada kullanılır. Buna göre, bir problemi literatürde araştırırken öncelikle matematiksel programlama modellerini

incelemek yanlış olmaz. Bu tezin literatür araştırmasında da, KYP'lerin ele alındığı ve matematiksel programlama modellerinin geliştirildiği çalışmalara öncelik verilmiştir.

KYP'lerin en genel formu ilk olarak Chen ve ark. (1995) tarafından matematiksel programlama ile modellenmiştir. Bu model, TKYP'lerde kullanılabileceği gibi, temelde birden fazla konteyner yüklemeye, kutulama ve farklı konteyner ebatlarını da dikkate almaya müsaade ettiği için ÇKYP'lerde de kullanılabilir.

Junqueira ve ark. (2012) TKYP'lerin çözümü için dikey ve yatay kargo dengesi (cargo stability), çoklu aktarma (multi-drop) ve yüke dayanım (load-bearing) kısıtlarını da dikkate alarak, birbirinden farklı MILP modelleri geliştirmişlerdir.

Moon ve Nguyen (2014) TKYP'yi yük dengesi (weight balance) kısıtıyla ele alarak alt ve üst sınırlarıyla birlikte bir MILP modeli sunmuşlardır. Daha sonra Trivella ve Pisinger (2016) yük dengesi (load balance) kısıtının yanı sıra problemi, küçük ölçekli kutulama problemi olarak ele almışlar ve çözümü için de yine bir MILP modeli önermişlerdir.

Li ve Zang (2015) da ÇKYP'yi ele almışlar ve Chen ve ark. (1995)'nin sunduğu MILP modeline çok benzer bir model sunmuşlardır.

Huang ve ark. (2016) bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtı kapsamında bir müşteriye ait ürünlerin tamamının aynı konteynere yüklenmesinin dikkate alındığı şerit yükleme problemlerinde toplam yükleme alanının uzunluğunu en küçükmek için bir MILP modeli önermişlerdir.

Paquay ve ark. (2016) ÇKYP'yi ele alan çalışmalardaki konteyner şekillerinden çok farklı olarak hava taşımacılığında tercih edilen kesik paralel yüzlü şekle sahip ve farklı ebatlardaki konteynerleri ele almışlardır. Kargo dengesi, kırılabilirlik ve yük dengesi kısıtlarını da dikkate alan bir MILP geliştirmişlerdir.

Li ve ark. (2003) KYP'yi tamamen açık boyutlu (open dimensional) olarak ele almışlar, çözüm için gerekli en az hacme sahip konteyner bulmayı amaçlayan, Chen ve ark. (1995)'nin geliştirdiği modele benzer fakat 0-1 tam sayılı değişkenleri indirgenmiş bir matematiksel programlama modeli önermişlerdir. Bunun sebebini de 0-1 tam sayılı değişkenlerin hesaplama zorluğu oluşturması olarak açıklamışlardır. Ayrıca, önerdikleri modeli, alt problemlere ayrıştırarak çözen bir dağıtık işlem algoritması (distributed computation algorithm) önermişlerdir.

Bir başka tamamen açık boyutlu konteyner yükleme problemini ele alan Huang ve Hwang (2018)'in çalışmalarında da çözüm için bir MILP modeli sunulmuştur. Bu çalışmada Li ve ark. (2003)'nin önerdiği modeldeki 'n' yerleştirilecek nesne sayısı olmak üzere $\frac{3}{2}n(n-1) + 9n$ tane olan 0-1 tam sayılı değişken sayısını, $\frac{3}{2}n(n-1) + 4n$ 'e düşürerek çözüm zamanı avantajı sağlamaya çalışmışlardır.

KYP'leri ve onun çeşitleri literatürde NP-Zor olarak sınıflandırılmaktadır (Martello ve ark., 2000). KYP'lerin çözümü için önerilen matematiksel programlama modelleri, büyük ölçekli gerçek hayat problemlerini çözmek için elverişli değildir. Çünkü yerleştirilecek nesne sayısı arttığında, değişken ve kısıt sayıları da karesel (n nesne sayısı olacak şekilde n^2) olarak artacaktır. Bu sebepten dolayı, büyük ölçekli gerçek hayat problemlerinin çözümü için sezgisel, meta-sezgisel ve hibrit yaklaşımlar üzerine literatürde sayıca daha fazla çalışma mevcuttur.

3.1.1. Tekli konteyner yükleme problemleri (TKYP) ile ilgili çalışmalar

TKYP başlığı altında, tek bir konteynere en fazla sayıda nesnenin yüklenmesini amaçlayan ya da bir başka deyişle bir konteynerin içerisine en fazla nesnenin sığdırılmasına bağlı olarak hacimsel kullanım oranını enbüyüklemeyi amaçlayan çalışmalar incelenmiştir. Bu problemler içerisinde yüksek çeşitlilikte/heterojenlikte nesnenin yerleştirilmesi durumunu içeren problemler, literatürde sırt çantası yükleme problemleri olarak diğerlerinden ayrılmaktadır. Sırt çantası problemlerini ele alan çalışmalar da yine bu başlık altında incelenmiştir.

Lin ve ark. (1993) hafif nesnelerin sadece kendinden ağır olanların üzerine konulduğu ve tüm nesnelerin döndürülmeden yerleştirildiği TKYP'lerin çözümü için tavlama benzetimi algoritması ile güçlendirilmiş bir tür katman oluşturma (layer building) yaklaşımı olan SMILE algoritması ile genetik algoritmayı (GA) hibritlemişlerdir.

Bischoff ve Ratcliff (1995a) KYP'lerin ele alındığı çalışmaların pratikte karşılaşılan durumlardan sadece bir kısmına uygulanabileceğini ve gerçekte yeterli metodolojinin bulunmadığı birçok senaryo olduğunu detaylı olarak tartışmışlardır. Buna ek olarak, yemek dağıtım örneği üzerinden, denge kısıtlı problemlerin çözümü için ve yine aynı örnek üzerinden, çoklu aktarma yapıldığı durumların çözümü için duvar oluşturma (wall building) yaklaşımı tabanlı iki farklı prosedür önermişlerdir.

Bortfeldt ve Gehring (2001) TKYP'leri, dikey ve yatay eksen de dengeli olma, ağırlık ve yığılma kısıtlarını da gözeterek ele almışlar, çözüm için açgözlü arama algoritması tabanlı çalışan bir nesil oluşturma operatörüne sahip bir HGA geliştirmişlerdir.

Lim ve ark. (2003) nesnelerin istenilen durumda döndürülerek, istenilmeyen durumda döndürülmeden yerleştirildiği kontrollü döndürme ve denge kısıtlarına dikkat edilen TKYP'lerin çözümü için ileriye arama (look-ahead) stratejisi ile geliştirilmiş çok yönlü yerleştirme (multi-faced build up) prosedürünü sunmuşlardır.

Lim ve ark. (2005) TKYP'leri nesne seçimi, alan seçimi, nesne döndürme ve alt problemler için yeni alanların oluşturulması şeklinde dört farklı parçaya ayırarak ele almışlardır. Yerleştirilecek nesne çeşitliliği bakımından homojen ve heterojen problemlerin çözümü için de farklı sezgisel yaklaşımlar kullanmışlardır.

Huang ve He (2007) TKYP'lerin çözümü için en büyük göçertme derecesi (largest caving degree) yaklaşımı adını verdikleri nesnelerin, birbirlerine mümkün mertebe yakın yerleştirilmesini sağlayan bir yerleştirme prosedürü geliştirmişlerdir.

Parreño ve ark. (2008) denge kısıtı altında ele alınan TKYP'lerin çözümü için blok oluşturma (block building) tabanlı bir açgözlü rassal adaptif arama algoritması (greedy randomized adaptive search algorithm) geliştirmişlerdir.

Peng ve ark. (2009) literatürde 'bu yön yukarı' (this way up) kısıtı olarak da adlandırılan 2-yönlü döndürme kısıtı ile kontrollü döndürmenin ve opsiyonel olarak denge kısıtının dikkate alındığı TKYP'leri incelemişler ve olurlu çözümlerin farklı bir sezgisel algoritma ile oluşturulduğu hibrit bir tavlama benzetimi algoritması geliştirmişlerdir. Gonçaves ve Resende (2012)'de benzer şekilde kontrollü döndürme ve (opsiyonel olmayan) denge kısıtları altındaki TKYP'lerin çözümü için çoklu popülasyon eğilimli rassal anahtar (multi population biased random key) GA'yı özgün bir yerleştirme prosedürü ile hibritleyerek homojen ve heterojen konteyner yükleme problemlerini çözdüklerini ifade etmişlerdir. Araya ve Riff (2014)'de Peng ve ark. (2009) ile aynı kısıtlar altındaki TKYP'lerin çözümü için dal-sınır algoritmasının bir çeşidi olan ışın arama (beam search) stratejisi tabanlı özgün bir blok oluşturma yaklaşımı önermişlerdir.

Fanslau ve Bortfeldt (2009) opsiyonel tam destek veya desteksiz olma kısıtı ile her iki durum için de giyotinlenebilme kısıtının olduğu TKYP'lerin çözümü için blok oluşturma yaklaşımı ve ağaç arama tabanlı iki farklı konsepti birlikte içeren bir sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Sheng ve ark. (2014) da opsiyonel olmayan tam destek kısıtını, kontrollü döndürme ve giyontinlenebilme (guillotine cutting) kısıtlarıyla birlikte göz önüne alarak, TKYP'lerin çözümü için duvar oluşturma yaklaşımı tabanlı bir ikili ağaç araması (binary tree search) sezgiseli geliştirmişlerdir.

Chien ve ark. (2009) TKYP'leri standart haliyle ele alarak verimli bir yükleme modeli oluşturacak sezgisel bir prosedür geliştirmişlerdir.

Dereli ve Daş (2010a), hem ağırlık hem de hacimsel kullanım oranının enbüyüklenmesinin birlikte sağlanmaya çalışıldığı iki amaçlı TKYP'lerin çözümü için tavlama benzetimi algoritması tabanlı hibrit bir yaklaşımı literatüre kazandırmışlardır.

Dereli ve Daş (2010b) bu yön yukarı kısıtının dikkate alındığı TKYP'leri ele alarak, grafik kullanıcı ara yüzü ve benzetim ile desteklenen bir hibrit arı algoritmasından faydalanılan kullanıcı dostu bir konteyner yükleme destek sistemi geliştirdiklerini ifade etmişlerdir.

He ve Huang (2010) TKYP'ler için katman oluşturma yaklaşımı sınıfına giren, etkin ve hızlı cevap verebilen bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Parreño ve ark. (2010) da değişken komşuluk arama prosedürü tabanlı yeni bir sezgisel algoritmayı literatüre kazandırmışlardır. Geliştirdikleri algoritmada basit değişiklikler yaparak denge kısıtlı problemlerin çözümü için de kullanılabilir hale getirmişlerdir.

He ve Huang (2011), TKYP'ler için 2007 yılında geliştirdikleri göçertme derecesi yaklaşımını ilerleterek sabit derece yaklaşımını (fixed degree approach) geliştirmişler ve diğerinden daha iyi sonuç aldıklarını ifade etmişlerdir.

Liu ve ark. (2011) kontrollü döndürme, denge, ağırlık ve yük dağılımı kısıtlarını içeren TKYP'lerin çözümü için sezgisel bir yerleştirme algoritması ile hibritlenmiş bir tabu arama algoritması önermişlerdir.

Kang ve ark. (2012) TKYP'leri kontrollü döndürme kısıtı altında ele almış, çözümü için Karabulut ve İnceoğlu'nun (2004) literatüre kazandırdığı en dip alt sol doldurma (deepest bottom left fill) yaklaşımını geliştirmişler ve bu yerleştirme yaklaşımını GA ile hibritleyerek daha iyi sonuç elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Zhang ve ark. (2012) TKYP'lerin çözümü için kontrollü döndürme ve destek kısıtlarını da göz önüne alan çoklu katman arama tabanlı bir blok oluşturma sezgiseli geliştirmişlerdir.

Zhu ve Lim (2012) TKYP'leri tam destek kısıtını göz önüne alarak çözen ve bir tür blok oluşturma algoritması olan yinelemeli açgözlü ileri ağaç arama (iterative-doubling greedy-lookahead tree search) algoritmasını önermişlerdir. Wang ve ark. (2013), TKYP'leri Zhu ve Lim (2012)'in ele aldığı tam destek kısıtına ek olarak

öncelik sıralarına göre yerleştirme kısıtını da eklemişler ve çözüm için çok yönlü kısmî ışın arama (multi-round partial beam search) yöntemini geliştirmişlerdir.

Lim ve ark. (2013) TKYP'lerde ağırlık kısıtını diğer çalışmalardan biraz daha farklı olarak aksa bağlı ağırlık kısıtı şeklinde ele almışlardır. Bu kısıt kullanılacak olan aracın aks sayısına ve yerlerine göre farklılık göstermektedir. Çözüm için bir açgözlü rassal adaptif arama (greedy randomized adaptive search) ile bir duvar oluşturma algoritmasını, Chen ve ark. (1995)'nin önerdikleri matematiksel programlama modelinin kısıtlarına uyarlayarak birlikte kullanmışlardır.

Moon ve Nguyen (2014) TKYP'leri yük dengesi kısıtıyla ele alarak sundukları MILP'e ek olarak, en dip alt sol doldurma (DASD) algoritması, açgözlü arama stratejisi ve GA'yı hibritleyerek yeni bir HGA geliştirmişlerdir.

Zheng ve ark. (2015) TKYP'lerin çözümü için çoklu popülasyon stratejisi ve bulanık mantık kontrolörü içeren çok amaçlı bir rassal anahtar (multi-objective biased random key) GA geliştirmişlerdir.

Ramos ve ark. (2016a) sabit denge kısıtının dikkate alındığı TKYP'lerin çözümü için boşlukları kontrol eden maksimal uzay temsili (maximal-spaces representation) prosedürü ile bu boşlukları dolduran katman oluşturma stratejisi ile hibritlenmiş çoklu popülasyon eğilimli bir rassal anahtar (multi-population biased random-key) GA geliştirmişlerdir. Ramos ve ark. (2016b) aynı problemi fiziksel yükleme sırası kısıtını da ekleyerek ele aldıklarında ise çözüm için dengeli bir yerleşim sağlayan, sabit denge algoritması (static stability algorithm) ve yerleştirme sırasını düzenleyen fiziksel yükleme dizilimi algoritması (physical packing sequence algorithm) adlı iki farklı sezgisel yöntem önermişlerdir.

Araya ve ark. (2017) TKYP'leri kontrollü döndürme ve denge kısıtları altında dikkate alan, yerleştirilecek olan nesnelerin sıralanmasına, yani bir sonraki yüklenecek nesnenin seçimine odaklanan bir blok oluşturma sezgiseli geliştirmişlerdir.

Sheng ve ark. (2017) da TKYP'leri, Ren ve ark. (2011)'nin dikkate aldığı gönderi önceliği kriterini dikkate alarak ağaç tipi arama tabanlı bir açgözlü sezgisel algoritma önerdikleri çalışmalarındaki gibi, yerleştireceği ürünlerin son kullanma tarihlerine göre öncelik sırası gözeterek ele almıştır. Yani son kullanma tarihi yaklaşan ürünlere yükleme sırasında öncelik vermişlerdir. Bunun yanı sıra Huang ve ark. (2016)'nın çalışmasında ele aldıkları tek bir siparişe ya da müşteriye ait olan ürünlerin konteynere bir arada yerleştirilmesi kısıtını da dikkate almışlardır. Çözüm için ilk adımda yerleştirilecek nesne sırasının tavlama benzetimi algoritmasıyla belirlendiği, ikinci adımda yerleştirmenin bir ağaç arama prosedürü ile yapıldığı bir sezgisel algoritma önerilmiştir.

3.1.2. Kutulama problemleri ile ilgili çalışmalar

Kutulama problemleri başlığı altında amaç fonksiyonu, verilen tüm nesnelerin en az sayıda özdeş konteynere yerleştirilmesi olan konteyner yükleme problemlerini ele alan çalışmalar incelenmiştir.

Pimpawat ve Chaiyaratana (2001) kutulama problemlerini ele alarak çözümü için yükleme sırasını daha küçük dizilere ayırarak sıralayan sezgisel bir kuralla birlikte kullanılan bir yardımcı eş-evrimsel GA (cooperative co-evolutionary genetic algorithm) sunmuşlardır.

Almeida ve Figueiredo (2010) kutulama problemlerinin çözümü için, kutu için köşe noktaları ve köşe noktası için kutu olarak adlandırdıkları iki sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Bunun yanı sıra, nesnelerin döndürülmesine müsaade edilmeyen heterojen problemler için doğrusal olmayan iki kriterli bir matematiksel programlama modeli de önermişlerdir.

Gonçalves ve Resende (2013), 2012'deki çalışmalarında kontrollü döndürme ve (opsiyonel olmayan) denge kısıtları altındaki TKYP'lerin çözümü için sundukları yerleştirme prosedürünü özgün bir eğilimli rassal anahtar GA ile hibritleştirip iki ve üç boyutlu kutulama problemlerini çözmüşlerdir.

Hifi ve ark. (2014) problemin çözümü için biri diğerinin genişletilmiş versiyonu olan ve tam sayılı doğrusal programlama tabanlı iki farklı hibrit açgözlü sezgisel (hybrid greedy heuristics) algoritma önermişlerdir.

Trivella ve Pisinger (2016) yük dengeli kutulama problemlerinin çözümü için sundukları MILP'in yanı sıra, büyük ölçekli problemler için de çok seviyeli yerel arama sezgiseli önermişlerdir. Costa ve Captivo (2016) da yük dengesi kısıtına ek olarak kontrollü döndürme ve ağırlık kısıtlarını da dikkate alarak bir gerçek hayat örneğinin çözümü için bir köşe seçim stratejisi içeren katman oluşturma tabanlı bir sezgisel algoritma önermişlerdir.

Mahvash ve ark. (2018), Chen ve ark. (1995)'nin matematiksel programlama modelini kutulama problemlerinin çözümü için genişletmişler ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için sütun üretme yaklaşımı tabanlı bir sezgisel algoritmanın çözüm sağladığı bir küme ayrışımı formülasyonu (set-partitioning formulation) önermişlerdir.

3.1.3. Çoklu konteyner yükleme problemleri (ÇKYP) ile ilgili çalışmalar

ÇKYP başlığı altında, kutulama problemlerinde de olduğu gibi amaç fonksiyonu verilen tüm nesnelerin en az sayıda, fakat özdeş olmayan konteynerlere yüklenmesi olan KYP'leri ele alan çalışmalar incelenmiştir.

Che ve ark. (2011) ÇKYP'leri ele alarak Eley (2003) tarafından sunulan tam sayılı doğrusal programlama (ILP) modelini genişletmiş, paketlenen kutularını yüzdesini kontrol eden yeni bir parametre eklemişlerdir. ILP modeli, çözüm ararken alt çözümlerin hızlıca elde edilebilmesi için içerisinde üç farklı sezgisel strateji ile birlikte çalışmaktadır.

Zhu ve ark. (2012) ÇKYP'leri tam destek kısıtı altında çözebilmek için bir model sütun üretme algoritması (prototype column generation algorithm) geliştirmişlerdir.

Li ve Zang (2015) ÇKYP'lerin çözümü için sunduğu MILP'e ek olarak aynı problemin çözümü için hibrit bir türevsel evrim algoritması da önermişlerdir.

Feng ve ark. (2015) biri küçük diğeri ise büyük ölçekli ÇKYP'lerin çözümü için, en geniş sol boş alana ilk sıradaki nesnenin atanması (the largest left space first item assignment) stratejisi ve en dip alt sol doldurma algoritması ile hibritlenmiş iki HGA geliştirmişlerdir.

Wei ve ark. (2015) ÇKYP'leri ele alarak, çözümü için hedef odaklı arama (goal-driven search) ile model sütun üretme algoritmasının (prototype column generation) birlikte kullanıldığı bir yaklaşım önermişlerdir.

Toffolo ve ark. (2017) kontrollü döndürme kısıtları altında ÇKYP'leri ele almışlar ve bir gerçek hayat örneğinin çözümü için ayrıştırma yaklaşımı (decomposition approach) içeren çok fazlı sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

Paquay ve ark. (2018) dikdörtgensel nesnelerin, yine Paquay ve ark. (2016)'nın da ele aldıkları hava taşımacılığında kullanılan kesik paralel yüzlü şekle sahip ve farklı ebatlardaki konteynerleri kontrollü döndürme kısıtı, destek kısıtı, ağırlık ve ağırlık dengesi kısıtlarının dikkate alındığı ÇKYP'lerin çözümü için iki fazlı sezgisel bir algoritma önermişlerdir.

3.1.4. Şerit yükleme ve açık boyutlu konteyner yükleme problemleri ile ilgili çalışmalar

Şerit yükleme problemleri, genellikle konteynerin eni ve yüksekliğinin sınırlandırılmış, boyunun ise sınırlandırılmamış olduğu KYP'ler olarak karşımıza çıkar. Bu problemlerde amaç, tüm nesnelerin yüklenebileceği konteynerin boyunu enküçükmektir. Açık boyutlu KYP'ler ise konteynerin hiçbir boyutunun sınırlandırılmadığı ve amacın yine tüm nesnelerin yüklenebileceği konteynerin tüm boyutlarını en küçükmektir. Bu iki problem tipi, ele alış biçimlerindeki benzerliklerinden dolayı aynı kategoride incelenmiştir.

Faina (2000) nesnelerin her yöne döndürülmesine müsaade edildiği ve başka bir kısıtlamanın olmadığı durumdaki üç boyutlu şerit yükleme problemlerini ele almıştır. Çözüm uzayını daraltmak için bir geometrik model kullanmış ve daha sonra tavlama benzetimi tabanlı bir global optimizasyon algoritması ile problemi optimum sonucu garantileyecek şekilde çözmüştür.

Karabulut ve İnceoğlu (2004) eni ve yüksekliği sabit olan ama boyu sınırsız kabul edilip, boy değerinin enküçüklenmeye çalışıldığı şerit yerleştirme, problemlerini ele alarak, literatürde sıklıkla karşımıza çıkan DASD algoritması ile hibritlendiği bir HGA önermişlerdir.

Yeung ve Tang (2005) dengeli yükleme yapmayı garanti eden, alt sol köşe yaklaşımı (lowest left corner approach) olarak adlandırdıkları bir yerleştirme yaklaşımı ile bir GA'yı hibritleyerek konteyner yüksekliğinin enküçüklediği şerit yükleme problemlerine çözüm önermişlerdir. Geliştirdikleri sezgisel alt sol köşe yaklaşımı Karabulut ve İnceoğlu (2004)'nın DASD algoritmasının başlangıç adımı ile benzetmekle birlikte, dengeli yükleme kısıtı sebebiyle devam eden yerleştirme adımları açısından farklılık göstermektedir.

Bortfeldt ve Mack (2007) şerit yerleştirme problemlerinin çözümü için dal-sınır algoritmasından türetilmiş, katman oluşturma tabanlı bir sezgisel algoritma önermişlerdir.

Wu ve ark. (2010) konteyner yüksekliğinin yüklenen nesnelere göre ayarlanabildiği şerit yükleme problemlerini ele almışlar, Chen ve ark. (1995)'nin geliştirdikleri MILP modelini modifiye ederek sunmuşlardır. Gerçek hayat problemlerinin çözümü için de özel bir yığın oluşturma (batch bin packing) algoritmasıyla birlikte kullanılan bir GA geliştirilmiştir.

Wei ve ark. (2012) kontrollü döndürme kısıtı altındaki üç boyutlu şerit yerleştirme problemlerinin çözümü için referans uzunluklu uç nokta sezgiseli tabanlı bir tür blok oluşturma algoritması geliştirmişlerdir.

Huang ve ark. (2016) bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtı kapsamında bir müşteriye ait ürünlerin tamamının aynı konteynere yüklenmesinin dikkate alındığı büyük ölçekli şerit yükleme problemleri için konteyner yüksekliğini enküçükleyen sezgisel bir yerleştirme prosedürü önermişlerdir.

3.1.5. Konteyner yükleme problemleri (KYP'ler) ile ilgili diğer çalışmalar

Literatürde küçük ve orta büyüklükteki işletmelerin az sayıda ürün sevk ettiği ve araçların genellikle doldurulamadığı durumlardaki KYP'lere düşük kullanımlı konteyner yükleme (less-than container loading) problemleri denilmektedir. Jamrus ve Chien (2016) bu problemi ele almış ve kontrollü döndürme, yığınlama, denge ve öncelikli yükleme gibi gerçek hayatta sıklıkla karşımıza çıkan kısıtları göz önüne alarak çözüm yapan bir genişletilmiş öncelik tabanlı (extended priority-based) HGA geliştirmişlerdir.

Ek olarak Kang ve ark. (2010) çalışmalarında, bu tezde ele alınan sınıflandırmalar içerisinde TKYP ve kutulama problemlerinin ikisini de incelemişlerdir. TKYP'lerin çözümü için blok düzenleme, blok değerlendirme ve blok yerine koyma olarak adlandırdıkları üç farklı blok oluşturma stratejisinden oluşan bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Kutulama problemleri için ise, TKYP'lerde önerilen sezgisel algoritma çalıştırılarak birden çok konteyner için çözümler elde etmişler ve bu çözümlere bazı iyileştirme prosedürlerinin uygulanmasını önermişlerdir.

Literatürde iki ve/veya üç boyutlu KYP başlıkları altında yapılan çalışmaların kritik edildiği literatür araştırma makaleleri de mevcuttur. Wäscher ve ark. (2007), Dyckhoff'un 1990 yılında kesme ve yükleme problemleri için sunduğu tipolojiden yola çıkarak, bir, iki ve üç boyutlu kesme ve yükleme problemlerine ait geliştirilmiş bir tipoloji sunmuşlardır. Sundukları sınıflandırmaya ve kriterlere göre, 1987 yılından 2007 yılına kadar literatüre sunulmuş çalışmaları değerlendirmişlerdir. Bortfeldt ve Wascher (2013) KYP'leri, ele aldıkları kısıtlara göre sınıflandırmış ve ele alınan kısıtların çözüm yöntemlerine olan etkilerini değerlendirmişlerdir. Zhao ve ark. (2016) da literatürde var olan üç boyutlu kesme ve yükleme problemleriyle ilgili çalışmaları,

geliştirilen ve önerilen yöntemler ile çözüm stratejilerine odaklanarak değerlendirmişlerdir.

3.2. Üç Boyutlu Palet Yükleme Problemleri (3B-PYP) ile İlgili Çalışmalar

3B-PYP'lerin KYP'lerden yapısal olarak ayrılamadığı daha önce de ifade edilmişti. Ancak bu tezde incelenen asıl problemin olması ve literatürde bu şekilde de incelenmesi nedeniyle, 3B-PYP'lerin literatürü, KYP'lerin literatüründen farklı bir başlık altında sunulmuştur.

Palet yükleme problemini geçmişe dönük olarak incelediğimizde ilk olarak üç boyutlu olarak incelenmesi 1990'larda gerçekleşmiştir. Dowsland (1991) mevcut literatürdeki iki boyutlu problemler için geliştirilen sezgisel algoritmaların genişletilerek üç boyutlu palet yükleme problemleri için kullanılmasının sonuçlarını araştırmış ve denge kısıtları gibi bazı kısıtların, çözümü çok fazla karmaşıktırdığını tespit etmiştir. Daha sonra da üç boyutlu problemler için bir tür duvar oluşturma yaklaşımı ileri sürmüştür.

Abdou ve Yang (1994) denge kısıtı altında 3B-PYP'yi ele almışlar ve çözümü için aynı yükseklikteki nesneleri bir arada gruplayan, palet kullanım oranı ile dengeyi enbüyükleyecek çok amaçlı bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Ayrıca nesnelerin boyutları, ağırlığı, kontrollü döndürme kısıtları, yoğunluğu ve elverişliliği gibi faktörlerin çözüme etkisini tartışmışlardır.

Palet yükleme problemleri ele alınan nesnelerin boyutlarının çeşitliliği göz önüne alınarak KYP'lerdeki gibi homojen veya heterojen olarak nitelendirilmekten ziyade imalatçı palet yükleme problemleri ve distribütör palet yükleme problemleri olarak nitelendirilir. Aslında imalatçı palet yükleme problemleri, nesnelerin homojen olduğunu ya da nesne çeşitliliğinin çok az olduğunu, distribütör palet yükleme problemleri de nesnelerin heterojen olduğunu ya da nesne çeşitliliğinin çok olduğunu ifade eder. Bischoff ve Ratcliff (1995b) de distribütör palet yükleme problemlerini ele alarak, problemin çözümü için bir açgözlü arama prosedürü önermişlerdir. Bischoff ve

ark. (1995) yine distribütör palet yükleme problemlerinin denge kısıtı altında çözümünü için bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Abdou ve Yang (1995) yükseklikleri aynı olan farklı boyutlardaki nesnelerin özdeş paletlere denge kısıtı altında ve sadece 2-yönlü döndürülerek yerleştirilmesini sağlayan iki amaçlı bir ILP modeli sunmuşlardır.

Arghavani ve Abdou (1996) farklı boyutlardaki nesnelerin çeşitli paletlere nesnelerin 2-yönlü döndürülecek şekilde katman oluşturma ya da yığılma şeklinde yerleştirildiği 3B-PYP'nin tam sayılı programlama modelini sunmuşlardır. Abdou ve Arghavani (1997) yine sadece 2-yönlü döndürülebilen nesnelerin yığılma şeklinde özdeş paletlere yerleştirildiği iki farklı amaca hizmet eden etkileşimli iki ILP modeli önermişlerdir. Bu prosedürlerden ilki, paletin doldurulan taban alanını enbüyüklerken, diğeri de ilk prosedürden üretilen her bir alt alandaki yığılma sütunlarını enbüyüklemektedir.

Liu ve Hsiao (1997) aynı nesnelerin bir palete yüklenmesini sağlayan ve bu esnada denge ve kullanım oranını enbüyükleyen beş aşamalı bir algoritma önermişlerdir.

Abdou ve Elmasry (1999) düşük heterojenlikteki, sadece 2-yönlü döndürülebilen nesnelerin yığılma yapılarak yerleştirildiği problem tipleri için sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu çalışmada palet kullanım oranının enbüyüklenmesinin yanı sıra diğer çalışmalardan farklı olarak robotik yüklemeler göz önüne alınmış, yarı mamul stoklarının ve paletleme süresinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Abdou ve Elmasry (2000) ele aldıkları probleme daha sonra talebi ve denge kısıtlarını da ekleyerek çözüm yöntemini de bunlara göre geliştirmişlerdir.

Terno ve ark. (2000) yükleme ve boşaltma işlemlerinde zaman kazandıran önemli bir kısıt olan bağlantılı nesnelerin bir arada bulunması, denge, yük dağılımı ve ağırlık kısıtları altındaki distribütör palet yükleme problemlerinin çözümü için katman odaklı (layer-wise) bir yerleştirme stratejisi geliştirmişlerdir.

Chan ve ark. (2006) hava taşımacılığında kullanılan kesik paralel yüzlü vb. şekilli farklı paletlere üç boyutlu yerleştirme yapılırken, kontrollü döndürme kısıtı, ağırlık kısıtı, yük dengesi kısıtı, bağlantılı nesnelerin bir arada bulunması kısıtı kapsamında aynı bilet numarasına ait nesnelerin bir arada konulmasını dikkate almışlar ve iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. Birinci aşamada ağırlık ve hacim gözetilerek kargo maliyetini enküçükleyen bir doğrusal programlama modeli çalışmaktadır. İkinci aşamada ise, diğer tüm kısıtları dikkate alarak çözüm yapan sezgisel bir algoritma, birinci aşamadaki alt sınırdan en küçük sapma ile çözüm sağlamaktadır. Lau ve ark. (2009) da yine hava taşımacılığında kullanılan dikdörtgensel paletlerdeki ağırlık ve yük dengesi kısıtlarını da dikkate alarak, kâr enbüyüklemesi gibi diğer çalışmalardan farklı bir amaca hizmet eden bir doğrusal olmayan matematiksel programlama modeli sunmuşlardır. Bunun yanı sıra büyük ölçekli problemlerin çözümü için kâr tabanlı yükleme adımı verdikleri bir sezgisel algoritma ile GA'yı hibritlemişlerdir.

Zúñiga ve ark. (2011), Abdou ve Yang (1995), Arghavani ve Abdou (1996), Abdou ve Arghavani, (1997) çalışmalarındaki gibi yine sadece 2-yönlü döndürülebilen nesnelerin ağırlık ve denge kısıtları altında lojistik maliyetlerini enküçülecek şekilde paletlere yüklenmesi için ayrık olaylı sistem yaklaşımını (discrete event system approach) önermişlerdir. Ayrıca bu yaklaşımda palet yükleme problemlerini endüstriyel bağlamla bütünleştirmek için renkli petri net (coloured petri net formalism) de kullanılmıştır.

Sheng ve ark. (2016) literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, bir konteynere hem farklı ebatlardaki paletlerin hem de paletlerden geriye kalan boşluklara kutuların yerleştirildiği konteyner ve palet yükleme problemlerini birlikte ele almışlardır. Çözüm için konteyner içerisindeki paletleri ağaç arama alt algoritması ile paletlerden geriye kalan küçük boşluklara da kutuların yerleştirilmesini sağlayan bir açgözlü arama alt algoritmasından oluşan bir sezgisel algoritma önermişlerdir.

Sorensen ve ark. (2016) da diğer çalışmalardan farklı olarak, distribütör palet yükleme problemlerinde çözüm zamanına etki eden, problemin karmaşıklık parametrelerini

araştırmışlardır. Sonuç olarak kutuların boyutlarının, küçük ve büyük kutuların sayısının ve yerleştirilen kutularla paletlerin hacimleri arasındaki oranların da karmaşıklığı etkileyebileceğini göstermiş, problemin karmaşıklığının sadece çokluğa bağlı olmadığına dikkat çekmişlerdir.

Piyachayawat ve Mungwattana (2017) ışık ve aydınlatma sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikanın farklı ebatlardaki nesnelerin farklı ebatlardaki paletlere yerleştirildiği distribütör palet yükleme problemleri sınıfında yer alan problemini ele almışlardır. Çözüm için türevsel evrim algoritması ve GA tabanlı bir çözüm algoritması önermişlerdir.

Elhedhli ve ark. (2017) açık boyutlu palet yükleme problemlerinin çözümü için, bir MILP modeli önermişler ve yerleştirilen nesnelerin bir arada bulunmasını ve destekli olmasını sağlamak için de dilimleme yaklaşımı (slicing approach) olarak adlandırılan bir tür katman oluşturma tabanlı sezgisel bir algoritma önermişlerdir.

Literatür araştırma makalesi olarak, Silva ve ark. (2016) son 50 yıla ait iki ve üç boyutlu imalatçı palet yükleme problemlerinin çalışıldığı yayınları ele alarak, onları problemlerin çözümü için geliştirilen ve önerilen yöntemlere ve çözüm stratejilerine odaklanarak değerlendirmişlerdir.

3.3. Literatür Araştırmasının Sonucu

3B-PYP anahtar kelimesi çerçevesinde literatür araştırması yapıldığında oldukça az çalışma ile karşılaşmıştır. 3B-PYP'nin KYP ile teknik açıdan çok benzer olması nedeniyle (Junqueira ve Morabito, 2013) literatür araştırması, KYP anahtar kelimesine genişletilmiştir. Bu anahtar kelime altında yine 3B-PYP'ye ve KYP'ye oldukça benzer yapıda olan üç boyutlu kesme ve yükleme problemlerini (Dyckhoff, 1990) ele alan çalışmalar da incelenmiştir. Yapılan geniş çaplı literatür araştırmasında, kontrollü döndürme, maksimum ağırlık, yük dengesi, denge, destek, yüke dayanım, yükleme önceliği, giyotinlenebilme vb. gibi gerçek hayat koşullarından esinlenen kısıtların farklı farklı çalışmalara konu olması dikkat çekmiştir. Bu tez çalışmasında,

literatürdeki çalışmaların dikkate alınan kısıtlar bakımından incelenmesi sonrasında elde edilen bilgilerden ve yapılan saha araştırması sonucu indirimli market zincirlerinin palet yükleme problemlerindeki kurallarından yola çıkılarak, literatürdeki çalışmalardan farklı kısıtlar bir arada ele alınmıştır. Bu kısıtlar, kontrollü döndürme, yüke dayanım, kırılmalık (kırılmal nesnelerin üzerine başka nesne konulmaması) ve bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtı kapsamında her bir palete tek bir müşterinin ürünlerinin yerleştirilmesi olarak ifade edilebilir. Literatürde diğerlerinden farklı kısıtları ele alan (standart problemin dışına çıkan) çalışmalarda, genellikle MILP ya da NLP modellerinin önerilmesi dikkat çekmiştir. Buna istinaden, bu tez çalışmasında ele alınan kısıtlar altında, küçük ölçekli problemlerin çözümü için bir MILP modeli sunulmuştur.

Matematiksel programlama modeli sunulan çalışmaların bazılarında, önerilen modellere ek olarak büyük ölçekli problemlerin çözümü için sezgisel, meta-sezgisel veya hibrit yöntemler de sunulmuştur (bkz. Abdou ve Arghavani, 1997; Li ve ark., 2003; Lau ve ark., 2009; Almeida ve Figueiredo, 2010; Wu ve ark., 2010; Che ve ark., 2011; Moon ve Nguyen, 2014; Li ve Zang, 2015; Huang ve ark., 2016; Trivella ve Pisinger, 2016; Elhedhli ve ark., 2017; Mahvash ve ark., 2018). Bu tezde de aynı yaklaşım takip edilerek, ele alınan kısıtlar altındaki büyük ölçekli problemlerin çözümü için bir HGA geliştirilmiştir.

Literatürde karşılaşılan meta-sezgisel çözüm yöntemleri içerisinde GA'nın sıklıkla görülmesi de dikkat çekmiştir (bkz. Lin ve ark., 1993; Bortfeldt ve Gehring, 2001; Pimpawat ve Chaiyaratana, 2001; Karabulut ve İnceoğlu, 2004; Yeung ve Tang, 2005; Lau ve ark., 2009; Wu ve ark., 2010; Gonçaves ve Resende, 2012; Kang ve ark., 2012; Gonçaves ve Resende, 2013; Moon ve Nguyen, 2014; Feng ve ark., 2015; Zheng ve ark., 2015; Jamrus ve Chien, 2016; Ramos ve ark., 2016a; Piyachayawat ve Mungwattana, 2017). Bunun sebebi GA'nın diğer sezgisel veya meta-sezgisel yöntemlerle uyumlu çalışmaya müsait olması, yani adaptif olmasıdır (Kang ve ark., 2012; Gonçaves ve Resende, 2012).

Bu tez çalışmasında önerilen HGA, GA'nın bir yığın oluşturma ve bir katman oluşturma tabanlı iki sezgisel algoritma ile hibritlenmesinden oluşmaktadır.



BÖLÜM 4. ÇÖZÜM METODU

Ele alınan 3B-PYP'nin çözümü için, kontrollü döndürme, yüke dayanım, kırılabilirlik, bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtları altında öncelikle bir MILP önerilmiştir. Önerilen bu MILP büyük ölçekli problemlerin çözümünü kabul edilebilir bir zaman içerisinde yapamadığından problemin çözümü için biri yığın oluşturma tabanlı, diğeri yatay katman oluşturma tabanlı olmak üzere iki farklı sezgisel algoritma ile hibritlenmiş bir HGA geliştirilmiştir.

Bu bölümde öncelikle önerilen MILP'in detayları verilecektir. Ardından genel anlamda GA anlatılacak ve geliştirilen HGA'nın detayları verilecektir.

4.1. Önerilen Çözüm Yöntemi 1- MILP

KYP ve 3B-PYP ile ilgili literatürde var olan matematiksel programlama çalışmalarından 'Literatür Araştırması' başlığı altında bahsedilmiştir. Bu çalışmaların bazılarında, temel üç boyutlu fiziksel yükleme kısıtları (Chen ve ark., 1995, Li ve Zang 2015), bazılarında ise bu kısıtlara ek olarak kontrollü döndürme, yük dengesi, yüke dayanım, kargo dengesi, kırılabilirlik, vb. kısıtlar (Abdou ve Yang 1995, Arghavani ve Abdou 1996, Junqueira ve ark., 2012, Moon ve Nguyen 2014, Trivella ve Pisinger 2016) da göz önüne alınmıştır. Literatürdeki çalışmalara katkı olarak bu tez çalışmasında, temel üç boyutlu fiziksel yükleme kısıtlarına ek; kontrollü döndürme, yüke dayanım, bağlantılı nesnelerin bir arada olması ve kırılabilirlik kısıtlarının birlikte ele alındığı küçük ölçekli üç boyutlu palet yükleme problemlerinin çözümü için bir MILP modeli önerilmiştir. Geliştirilen modele veri olarak girilmesi gereken parametreler ve anlamları şöyledir:

nc: müşteri sayısı

no: sipariş sayısı

np: palet sayısı

L: paletin boyu

W: paletin eni

H: paletin yüksekliği

P_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin eni

Q_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin boyu

R_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin yüksekliği

V_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin hacmi

M_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin kütlesi

D_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin yoğunluğu

$OS_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{i'ninci müşterinin k'ninci siparişi 2 – yönlü döndürülmeli ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

$Fr_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{i'ninci müşterinin k'ninci siparişi kırılğan ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

Flb: Paletlerin doluluk alt limiti

M: Yeterince büyük bir sayı

Geliştirilen modelde hem sürekli, hem de ikili (0-1 tam sayılı) değişkenler mevcuttur.

Bu değişkenler ve anlamları şöyledir:

X_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin sol alt noktasının X eksenindeki yeri

Y_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin sol alt noktasının Y eksenindeki yeri

Z_{ik} : i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin sol alt noktasının Z eksenindeki yeri

$N_{iu} = \begin{cases} 1 & \text{u'nuncu palet i'ninci müşteri için kullanılıyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

$\alpha_{x_{ik}} = \begin{cases} 1 & \text{i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin eni paletin x eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

$\alpha_{y_{ik}} = \begin{cases} 1 & \text{i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin eni paletin y eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

$\alpha_{z_{ik}} = \begin{cases} 1 & \text{i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin eni paletin z eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

$\beta_{x_{ik}} = \begin{cases} 1 & \text{i'ninci müşterinin k'ninci siparişinin boyu paletin x eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

$$\beta_{y_{ik}} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişinin boyu paletin } y \text{ eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$\beta_{z_{ik}} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişinin boyu paletin } z \text{ eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$\theta_{x_{ik}} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişinin yüksekliği paletin } x \text{ eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$\theta_{y_{ik}} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişinin yüksekliği paletin } y \text{ eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$\theta_{z_{ik}} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişinin yüksekliği paletin } z \text{ eksenine paralel ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$A_{ikt} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişi } t'ninci \text{ siparişinin solunda ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$B_{ikt} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişi } t'ninci \text{ siparişinin sağında ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$C_{ikt} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişi } t'ninci \text{ siparişinin arkasında ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$D_{ikt} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişi } t'ninci \text{ siparişinin önünde ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$E_{ikt} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişi } t'ninci \text{ siparişinin altında ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$F_{ikt} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişi } t'ninci \text{ siparişinin üzerinde ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$Y_{iku} = \begin{cases} 1 & i'ninci \text{ müşteri'nin } k'ninci \text{ siparişi } u'nuncu \text{ palette ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$EMPTY_p_u = \begin{cases} 1 & u'nuncu \text{ paletin hacimsel kullanım oranı belirlenen orandan az ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Önerilen MILP'in amaç fonksiyonu ve kısıt denklemleri şöyledir:

$$Enaz \quad \sum_{i=1}^{nc} \sum_{u=1}^{np} N_{iu} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1, yani amaç fonksiyonu, tanımlanan kısıtlara uygun olarak yükleme yapılırken mümkün olan enaz sayıda palet kullanılmasını sağlamaktadır.

$$\alpha_{x_{ik}} + \alpha_{y_{ik}} + \beta_{x_{ik}} + \beta_{y_{ik}} + \theta_{z_{ik}} \leq 3 + (1 - OS_{ik})M \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no \quad (4.2)$$

$$\alpha_{x_{ik}} + \alpha_{y_{ik}} + \beta_{x_{ik}} + \beta_{y_{ik}} + \theta_{z_{ik}} \geq 3 + (OS_{ik} - 1)M \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no \quad (4.3)$$

Denklem 4.2 ve 4.3, X-Y-Z eksenlerinde (6-yönlü) döndürülmesi istenmeyen nesnelerin, sadece Z eksenini etrafında (2-yönlü) döndürülmesini sağlamaktadır.

$$V_{ik} - P_{ik}Q_{ik}R_{ik} = 0 \quad i=1,\dots,nc; k=1,\dots,no \quad (4.4)$$

Denklem 4.4, tüm nesnelerin hacimlerinin hesaplanmasını sağlamaktadır.

$$D_{ik} - (M_{ik}/V_{ik}) = 0 \quad i=1,\dots,nc; k=1,\dots,no \quad (4.5)$$

Denklem 4.5 tüm nesnelerin yoğunluklarının hesaplanmasını sağlamaktadır.

$$D_{ik}(P_{ik}\alpha_{zik} + Q_{ik}\beta_{zik} + R_{ik}\theta_{zik}) - D_{it}(P_{it}\alpha_{zit} + Q_{it}\beta_{zit} + R_{it}\theta_{zit}) > M(E_{ikt} + F_{itk} - 1) \\ i=1,\dots,nc; k=1,\dots,no; t=1,\dots,no; k; k \neq t \quad (4.6)$$

$$D_{it}(P_{it}\alpha_{zit} + Q_{it}\beta_{zit} + R_{it}\theta_{zit}) - D_{ik}(P_{ik}\alpha_{zik} + Q_{ik}\beta_{zik} + R_{ik}\theta_{zik}) > M(E_{itk} + F_{ikt} - 1) \\ i=1,\dots,nc; k=1,\dots,no; t=1,\dots,no; k; k \neq t \quad (4.7)$$

Denklem 4.6 ve 4.7, bir nesnenin üzerinde kendi yoğunluğundan daha büyük bir yoğunluğa sahip bir başka nesnenin yerleştirilmesinin engellenmesini sağlamaktadır. (yüke dayanım kısıtı)

$$Fr_{ik} \leq (1 - E_{ikt})M \quad i=1,\dots,nc; k=1,\dots,no; t=1,\dots,no; k; k \neq t \quad (4.8)$$

$$Fr_{it} \leq (1 - F_{ikt})M \quad i=1,\dots,nc; k=1,\dots,no; t=1,\dots,no; k; k \neq t \quad (4.9)$$

Denklem 4.8 ve 4.9, kırılabilir nesnelerin en üste konmasını veya üzerine başka bir nesne konulmamasını sağlamaktadır. Eğer bu kısıt denklemleri Denklem 4.6 ve 4.7 kısıt denklemleriyle ifade edilen yüke dayanım kısıtı ile çakışıyor ise, kırılabilir ürünler yeni bir palete yerleştirilir.

$$X_{ik} + P_{ik}\alpha_{xik} + Q_{ik}\beta_{xik} + R_{ik}\theta_{xik} \leq X_{it} + (1 - A_{ikt})M \\ i=1,\dots,nc; k=1,\dots,(no-1); t=2,\dots,no; k < t \quad (4.10)$$

$$X_{it} + P_{it}\alpha x_{it} + Q_{it}\beta x_{it} + R_{it}\theta x_{it} \leq X_{ik} + (1 - B_{ikt})M$$

$$i=1,\dots,nc; k=1,\dots,(no-1); t=2,\dots,no; k < t \quad (4.11)$$

$$Y_{ik} + Q_{ik}\beta y_{ik} + P_{ik}\alpha y_{ik} + R_{ik}\theta y_{ik} \leq Y_{it} + (1 - C_{ikt})M$$

$$i=1,\dots,nc; k=1,\dots,(no-1); t=2,\dots,no; k < t \quad (4.12)$$

$$Y_{it} + Q_{it}\beta y_{it} + P_{it}\alpha y_{it} + R_{ik}\theta y_{it} \leq Y_{ik} + (1 - D_{ikt})M$$

$$i=1,\dots,nc; k=1,\dots,(no-1); t=2,\dots,no; k < t \quad (4.13)$$

$$Z_{ik} + R_{ik}\theta z_{ik} + Q_{ik}\beta z_{ik} + P_{ik}\alpha z_{ik} \leq Z_{it} + (1 - E_{ikt})M$$

$$i=1,\dots,nc; k=1,\dots,(no-1); t=2,\dots,no; k < t \quad (4.14)$$

$$Z_{it} + R_{it}\theta z_{it} + Q_{it}\beta z_{it} + P_{it}\alpha z_{it} \leq Z_{ik} + (1 - F_{ikt})M$$

$$i=1,\dots,nc; k=1,\dots,(no-1); t=2,\dots,no; k < t \quad (4.15)$$

Denklem 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15, nesnelerin birbirleriyle çakışmadan yüklenmelerini sağlamaktadır.

$$A_{ikt} + B_{ikt} + C_{ikt} + D_{ikt} + E_{ikt} + F_{ikt} \geq \gamma_{iku} + \gamma_{itu} - 1$$

$$i=1,\dots,nc; u=1,\dots,np; k=1,\dots,(no-1); t=2,\dots,no; k < t \quad (4.16)$$

Denklem 4.16, bir müşteriye ait iki nesne aynı palete yerleştirilirse bunların üst üste çakışmadan yüklenmelerini sağlamaktadır.

$$\sum_{u=1}^{np} \gamma_{iku} = 1$$

$$i=1,\dots,nc; k=1,\dots,no \quad (4.17)$$

Denklem 4.17, bir müşteriye ait bir nesnenin sadece tek bir palete yerleştirilmesini sağlamaktadır.

$$\sum_{k=1}^{no} \gamma_{iku} \leq MN_{iu}$$

$$i=1,\dots,nc; u=1,\dots,np \quad (4.18)$$

Denklem 4.18, bir müşteriye ait bir nesne herhangi bir palete yerleştirildiyse bu paletin kullanılan paletler içersine dâhil edilmesini sağlamaktadır.

$$\sum_{i=1}^{nc} \gamma_{iku} \leq 1 \quad k=1, \dots, no; u=1, \dots, np \quad (4.19)$$

Denklem 4.19, her bir palete sadece tek bir müşteriye ait nesnelerin yerleştirilmesini sağlar.

$$X_{ik} + P_{ik}\alpha x_{ik} + Q_{ik}\beta x_{ik} + R_{ik}\theta x_{ik} \leq L + (1 - \gamma_{iku})M \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no; u=1, \dots, np \quad (4.20)$$

$$Y_{ik} + Q_{ik}\beta y_{ik} + P_{ik}\alpha y_{ik} + R_{ik}\theta y_{ik} \leq W + (1 - \gamma_{iku})M \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no; u=1, \dots, np \quad (4.21)$$

$$Z_{ik} + R_{ik}\theta z_{ik} + Q_{ik}\beta z_{ik} + P_{ik}\alpha z_{ik} \leq H + (1 - \gamma_{iku})M \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no; u=1, \dots, np \quad (4.22)$$

Denklem 4.20, 4.21 ve 4.22, bir palete yerleştirilen nesnelerin paletin fiziksel sınırlarını aşmamasını sağlamaktadır.

$$\alpha x_{ik} + \alpha y_{ik} + \alpha z_{ik} = 1 \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no \quad (4.23)$$

$$\beta x_{ik} + \beta y_{ik} + \beta z_{ik} = 1 \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no \quad (4.24)$$

$$\theta x_{ik} + \theta y_{ik} + \theta z_{ik} = 1 \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no \quad (4.25)$$

$$\alpha x_{ik} + \beta x_{ik} + \theta x_{ik} = 1 \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no \quad (4.26)$$

$$\alpha y_{ik} + \beta y_{ik} + \theta y_{ik} = 1 \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no \quad (4.27)$$

$$\alpha z_{ik} + \beta z_{ik} + \theta z_{ik} = 1 \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no \quad (4.28)$$

Denklem 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 ve 4.28, bir palete yerleştirilen nesnelerin tek bir eksenlerinin, paletin tek bir eksenine paralel olmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{i=1}^{nc} \sum_{k=1}^{no} \sum_{u=1}^{np} P_{ik} Q_{ik} R_{ik} \gamma_{iku} \geq \text{Flb}(\text{LWH}) - M(\text{EMPTY}P_u) \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no; u=1, \dots, np \quad (4.29)$$

$$\sum_{i=1}^{nc} \sum_{k=1}^{no} \sum_{u=1}^{np} P_{ik} Q_{ik} R_{ik} \gamma_{iku} \leq \text{Flb}(\text{LWH}) - M(\text{EMPTY}P_u - 1) \quad i=1, \dots, nc; k=1, \dots, no; u=1, \dots, np \quad (4.30)$$

Denklem 4.29 ve 4.30, yerleştirme işlemine etkisi olmaksızın ürünlerin paletlere yüklenme durumlarını göz önüne alarak, paletlerdeki hacimsel kullanım oranı önceden belirlenen Flb değerinden daha düşük olması halinde, $\text{EMPTY}P_u$ değişkeninin 1 değerini almasını sağlayarak, düşük doluluğa sahip paletlerin izlenebilmesine olanak sağlar.

Serbest değişkenler ve ikili (0-1 tam sayılı) değişkenler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$X_{ik}, X_{it}, Y_{ik}, Y_{it}, Z_{ik}, Z_{it} \geq 0$$

$$\alpha_{x_{ik}}, \alpha_{y_{ik}}, \alpha_{z_{ik}}, \beta_{x_{ik}}, \beta_{y_{ik}}, \beta_{z_{ik}}, \theta_{x_{ik}}, \theta_{y_{ik}}, \theta_{z_{ik}}, A_{ikt}, B_{ikt}, C_{ikt}, D_{ikt}, E_{ikt}, F_{ikt}, \gamma_{iku}, N_{iu}, OS_{ik}, \text{EMPTY}P_u \in \{0,1\}$$

4.1.1. Bir 3B-PYP örneğinin önerilen MILP ile çözümü

Önerilen MILP'in işleyişi temel bir örnek üzerinde gösterilebilir. Bunun için ağırlık, en, boy ve yükseklik bilgileri ile kontrollü döndürme ve kırılabilirlik özellikleri verilen 10 tane nesne ele alınmıştır. Nesnelere ait bu veriler Tablo 4.1.'de görülmektedir. Nesnelerin yerleştirileceği standart palet(ler)in boyutları da 80x120x120 cm ve hacmi 1.152.000 cm³'tür. Verilen nesnelerin toplam hacmi de 693.000 cm³'tür. Hacimsel olarak bakıldığında verilen nesnelerin bir palete sığması halinde palette %60,2'lik bir hacimsel kullanım oranı olması beklenir.

Tablo 4.1.'de verilen problemin, önerilen MILP kullanılarak standart dal-sınır algoritması ile çözüm yapılmıştır ve çözüm raporu da Tablo 4.2.'de özetlenmiştir. Bu

özet raporda yüke dayanım kısıtının sağlandığını ifade edebilmek için nesnelerin yoğunlukları verilmiştir.

Tablo 4.1. Bir 3B-PYP örneğine ait veriler

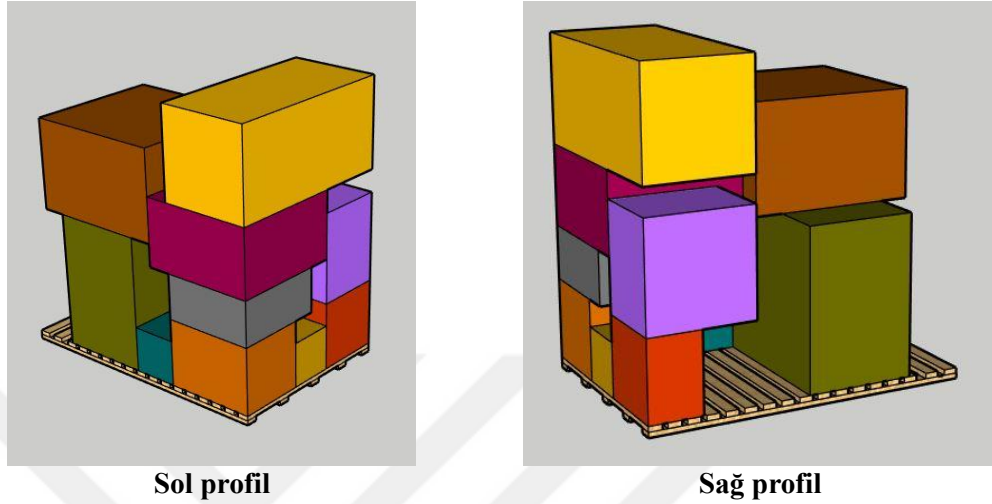
Nesne No	En (cm)	Boy (cm)	Yükseklik (cm)	Ağırlık (kg)	Kontrollü Döndürme	Kırılmalık (0/1)
1	80	60	40	4	6-yönlü	0
2	40	40	30	4	6-yönlü	0
3	30	20	20	5	2-yönlü	0
4	40	40	20	4	2-yönlü	0
5	80	40	40	8	6-yönlü	0
6	60	60	40	6	6-yönlü	0
7	20	20	20	3	6-yönlü	1
8	20	30	30	4	6-yönlü	0
9	30	40	30	5	6-yönlü	0
10	50	50	30	5	2-yönlü	0

Bunun yanı sıra nesnelerin sol alt köşeleri referans noktası olarak ele alınmış ve bu referans noktalarının paletin üzerinde olduğu kabul edilen koordinat eksenlerindeki yeri verilmiştir. Ayrıca yerleştirme yapılırken nesnelerin nasıl durduğu bilgisi de önemlidir. Bunun için nesnelerin yerleştirileceği esnada en, boy ve yüksekliklerinin değeri de verilmiştir. Örneğin; 1 no'lu nesnenin, problem çözülmeden önce 80x60x40 (en x boy x yükseklik) şeklinde dururken, yerleştirileceği esnada 80x40x60 şeklinde durması gerektiği görülmektedir. Yani nesnenin yerleştirme esnasında X ekseninde 90 derece döndürülmesi söz konusudur. Diğer tüm nesneler için de aynı duruş bilgileri verilmiştir.

Tablo 4.2. Tablo 4.1'de verilen problemin çözüm raporu özeti

Nesne No	Yoğunluk Değeri (kg/cm ³)	Koordinatları			Nesnenin Duruşuna Göre		
		X	Y	Z	En (cm)	Boy (cm)	Yükseklik (cm)
1	0,208x10 ⁻³	0	60	0	80	40	60
2	0,833x10 ⁻⁴	50	0	30	30	40	40
3	0,417x10 ⁻³	30	0	0	20	30	20
4	0,125x10 ⁻³	0	0	30	40	40	20
5	0,625x10 ⁻⁴	0	0	80	80	40	40
6	0,417x10 ⁻⁴	0	50	60	60	60	40
7	0,375x10 ⁻³	0	40	0	20	20	20
8	0,222x10 ⁻³	50	0	0	30	20	30
9	0,139x10 ⁻³	0	0	0	30	40	30
10	0,667x10 ⁻⁴	0	0	50	50	50	30

Tablo 4.2.'de verilen özet çözüm raporunun üç boyutlu görseli de Şekil 4.1.'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere tüm nesneler tek bir palete yerleştirilmiştir. Şekilde paletin sol ve sağ görünüşleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Tablo 4.2'de verilen özet çözüm raporunun görsel ifadesi

4.2. Önerilen Çözüm Yöntemi 2- HGA

Büyük ölçekli 3B-PYP'leri, önerilen MILP ile standart dal-sınır algoritması kullanılarak kabul edilebilir bir süre içerisinde çözülememiştir. Karşılaşılan bu durum, problemin çözümü için yeni bir çözüm yöntemi araştırılmasına sebep olmuştur. Yapılan literatür araştırması sonucu elde edilen bilgilere göre, çözüm yöntemi için doğadan esinlenilmiş algoritmalarından biri olan ve uyarlanabilme özelliğinden dolayı sıklıkla tercih edilen GA'lar tercih edilmiştir. 3B-PYP'nin nihai çözümü için GA'ların işleçleri yeterli olmadığından, önerilen HGA literatürde yığın oluşturma algoritmaları sınıfında yer alan bir sezgisel algoritma ve katman oluşturma algoritmaları sınıfında yer alan ve DASD algoritması olarak adlandırılmış bir diğer sezgisel yaklaşım ile bir GA'nın hibritlenmesiyle geliştirilmiştir.

Bu başlık altında öncelikle genel olarak GA'lar anlatılacak, daha sonra önerilen HGA'nın nasıl kullanıldığı ve diğer sezgisel algoritmalar ile nasıl hibritlendiği anlatılacaktır.

4.2.1. Genetik algoritmalar

GA kavramsal olarak ilk defa 1967 yılında Bagley'in doktora tezinde yer almıştır. Daha sonra teorik olarak temelleri 1970'lerde John Holland başta olmak üzere Michigan Üniversitesi'ndeki meslektaşları ve öğrencileri ile birlikte atılmıştır. Temel olarak GA'lar, doğal evrimde gözlemlenen bazı süreçleri taklit etmek için ortaya atılmıştır. Darwinci 'en güçlü olanın yaşamını sürdürmesi' ilkesini açıkça taşıyan GA'lar, temeli doğal seçim ve doğal genetiğin mekaniği üzerine kurulu bir arama algoritması türüdür. Bu ilkeye göre, ortam koşullarına uyumlu özellikleri taşıyan bireyler, özelliklerini bir sonraki nesillere aktarabilirken, taşımayan bireylerin özellikleri nesiller geçtikçe gen havuzundan silinir. GA'ların temel çalışma mantığı da bu ilkeye paralel olduğundan, uygunluk değeri daha iyi olan kromozomlar çoğalarak aramaya yön verir.

GA'lar, normal optimizasyon ve arama algoritmalarından temel anlamda farklıdır. Bu temel farklılıklardan biri, GA'ların parametrelerin kendilerinden ziyade, parametre kümesinin özel bir kodlama şeması ile çalışmasından kaynaklanır. Bir diğer temel farklılık da GA'ların, tek bir ilgi noktasından ziyade bir dizi popülasyonu araştırmasından kaynaklanır. GA'lar, türev gibi diğer yardımcı bilgiler yerine sonuç bilgilerini kullanır ve yalnızca amaç fonksiyonuna gereksinim duyarlar. GA'lar deterministik kurallara göre değil, olasılık kurallarına göre çalışırlar (Tang, 2004).

GA'lar çözüm uzayının tamamını değil bir kısmını taradıklarından kısa sürede ve arama işlemini 'en güçlü olanın yaşamını sürdürmesi' ilkesine paralel olarak yaptıklarından etkin bir çözüm elde edebilirler. Tarama işlemi esnasında bir popülasyondaki bütün çözümleri aynı anda incelediklerinden diğer sezgisel yöntemlerdeki gibi yerel en iyi çözümlere takılmazlar. GA'lar bu güçlü yönlerinden dolayı daha çok, polinom zamanda çözilemeyen birçok problemin çözümü için tercih edilirler. Özellikle üretim çizelgeleme, gezgin satıcı, tesis yerleşim problemleri, vb. büyük ölçekli kombinatoriyel optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılması bu bahsedilen arama özelliklerinin sonucudur. Bunların dışında GA'lar sağlık alanında (örneğin meme kanseri teşhisinde), mühendislik uygulamalarında

(elektrik, makina, inşaat, üretim, havacılık, robotik, vb.), makine zekâsı, uzman sistemler, şebeke tasarımı ve rotalama, kablolu ve kablosuz iletişim ağları, vb. konularındaki problemleri çözmek için de tercih edilir (Sivenandam ve Deepa, 2008).

4.2.1.1. Genetik algoritmalarla ilgili temel kavramlar

GA'lar doğadan esinlenildiğinden, kullanılan terminoloji büyük ölçüde genetik biliminin terminolojisi ile ilişkilidir. Bu terminolojideki temel kavramlar şöyledir:

Gen ve alel gen: Gen, bir bireyin karakteristik özelliklerini taşıyan en küçük temel kalıtım birimidir. Bir bireydeki herhangi bir karakteristik özelliği oluşturan genlerden biri anneden diğeri de babadan gelir. Aynı karakteristik özelliğe etki eden iki veya daha fazla genlerden her birine “Alel Gen” adı verilir. GA'larda gen kavramı, bir çözümdeki en küçük bilgi taşıyan birim olarak düşünülebilir.

Kromozom: Kromozom, bir ya da daha fazla genin bir araya gelmesiyle oluşan ve kalıtsal özelliklerin belirlenmesi için üzerinde gerekli tüm bilgiyi taşıyan genetik yapıdır. GA'lardaki kromozomların her biri, problemin olası bir çözümünü göstermektedir. GA'larda işlemler kromozomlar üzerinde yapıldığı için kromozom tanımları çok iyi ifade edilmelidir.

Popülasyon (Topluluk): Kromozomlardan oluşan kümeye ya da topluluğa popülasyon denir. GA'larda bir popülasyon, alternatif çözüm kümesini temsil eder. GA'ların işlemleri sayesinde popülasyonda farklı karakterler ortaya çıkar ve popülasyondaki gen havuzuna yeni karakterleri temsil eden kromozomlar eklenir.

Uygunluk fonksiyonu: Bir popülasyondan bir sonraki popülasyona aktarılabacak olan bireylerin değerlendirilmesi bir uygunluk fonksiyonu ile sağlanır. Bir kromozomun uygunluk fonksiyonu değeri, ilgili kromozomun (çözümün) başarı ölçüsü olarak da düşünülebilir. GA'ların Darwin'in ‘en güçlü olanın yaşamını sürdürmesi’ ilkesine göre hareket ettiğini düşünürsek, buradaki ‘en güçlü olan’ kavramının belirlenmesi uygunluk fonksiyonu ile sağlanmaktadır. Yani amaç, her bir popülasyonda uygunluk

değerleri bir önceki popülasyondakilerden daha iyi olan kromozomların yer almasını sağlamaktır. Uygunluk fonksiyonu problemin çözümüne yön veren en önemli unsurdur. Bu nedenle problem iyi tahlil edilerek belirlenmelidir. Ayrıca GA’larda uygunluk fonksiyon değerleri negatif olmamalıdır.

4.2.1.2. Genetik algoritmalarda kodlama

Bir problemi GA’larla çözmeye başlarken ilk olarak kromozomların hangi kodlama türünde kodlanacağını belirlemek gerekmektedir. Kodlama türü, bir kromozomun taşınması gereken bilgiye ve dolayısıyla problemin yapısına bağlı olarak belirlenir. GA’larda kullanılan kodlama türleri şöyledir:

İkili kodlama: Bu kodlama yönteminde, kromozomlardaki her bir gen 0 veya 1 karakterleriyle gösterilir. Örneğin, Şekil 4.2.’de bir sırt çantası probleminin bir GA çözümü için oluşturulan iki kromozom örneği görülmektedir. Bu örnekten; bir sırt çantasına konulabilecek 10 farklı nesneden verilen iki ayrı kromozomda (çözümde) sırasıyla bu nesnelerin hangilerinin yer alıp almadığı anlayabiliriz.

Kromozom 1	1000110001
Kromozom 2	1110000011

Şekil 4.2. İkili kodlama yapısı örneği

Sekizli kodlama: Bu kodlama yönteminde genler sekizli sayılarla (0-7) temsil edilir (Sivanandam ve Deepa, 2008). Şekil 4.3.’te bir sekizli kodlama örneği mevcuttur.

Kromozom 1	34561240
Kromozom 2	43743261

Şekil 4.3. Sekizli kodlama yapısı örneği

Onaltılı kodlama: Bu kodlama yönteminde onaltılı sayılardan oluşan (0-9, A-F) dize kullanılır (Sivanandam ve Deepa, 2008). Şekil 4.4.'te bir onaltılı kodlama örneği mevcuttur.

Kromozom 1	7CA3
Kromozom 2	5AEB

Şekil 4.4. Onaltılı kodlama yapısı örneği

Permütasyon kodlama: Bu kodlama yöntemi genellikle sıralamanın önemli olduğu gezgin satıcı, çizelgeleme vb. problemlerde tercih edilir. Kromozomlardaki her bir gen bir rakam ile temsil edilir. Farklı kromozomlarda bu rakamların dizilişleri değişir. Örneğin; Şekil 4.5.'de bir gezgin satıcı probleminin GA çözümü için oluşturulan iki kromozom örneği görülmektedir. Bu örnekten; ziyaret edilecek sekiz farklı noktanın iki ayrı kromozomda (çözümde) hangi sırayla ziyaret edileceğini anlayabiliriz.

Kromozom 1	23146857
Kromozom 2	13247865

Şekil 4.5. Permütasyon kodlama yapısı örneği

Değer kodlama: Bu kodlama yönteminde kromozomlardaki her bir genin reel sayılar, metin ya da nesnelerle ifade edilmesi söz konusudur. Şekil 4.6.'da farklı değer kodlama örnekleri görülmektedir.

Kromozom 1	1,23 0,14 8,90 10,75
Kromozom 2	AGCC AATG TTGC
Kromozom 3	ileri sağ sol geri
Kromozom 4	    

Şekil 4.6. Değer kodlama yapısı örneği

Ağaç kodlama: Bu kodlama yöntemi çoğunlukla genetik programlama için program ifadelerini geliştirmek için kullanılır. Her kromozom, bir programlama dilinin işlevleri ve komutları gibi bazı nesnelerin bir ağacıdır (Sivanandam ve Deepa, 2008).

4.2.1.3. Genetik algoritmaların operatörleri

Bir problemi GA'larla çözmeye başlarken kromozomların kodlama türünü belirledikten sonra, çözüme devam edebilmek için üç temel operatör kullanılır. Bunlar; seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleridir.

Seçim operatörü, yeni kromozomların (çözümlerin) oluşması için genetik bilgi alışverişinin sağlanacağı ebeveynlerin tespiti için kullanılır. Seçilen ebeveynler karakterlerini sonraki popülasyonlara aktarabilirler. GA'larda kullanılan farklı seçim operatörleri mevcuttur. Bunlar şöyledir:

Rulet tekeri seçimi: Rulet tekeri seçim metodu kromozomların seçiminin uygunluk oranına göre yapılmasını sağlar. Şöyle ki; kromozomların uygunluk fonksiyonları toplanır ve her bir kromozomun uygunluğu bu toplama bölünerek her bir kromozom için 0-1 arasında bir oran elde edilir. Üretilen bir rassal sayı hangi kromozomun kümülatif seçim ihtimalinden küçükse o kromozom seçilir (Mitchell, 1999).

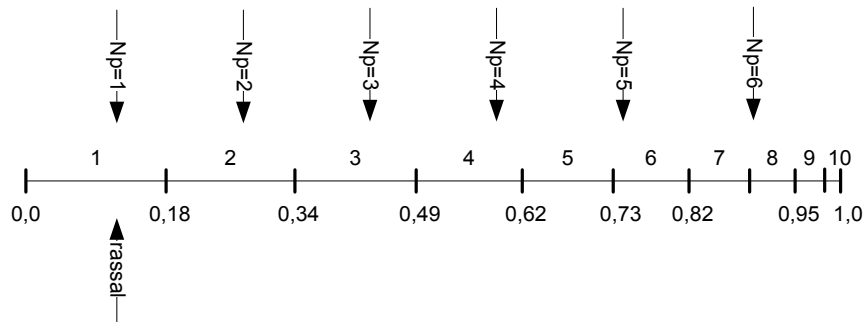
Rassal seçim: Rassal seçim tekniği popülasyondan rasgele bir ebeveyn seçer.

Sıralama seçimi: Rulet tekeri seçim metodunda bir kromozomun uygunluk oranı %90 ise rulet tekerinin %90'ını kaplar ve diğer kromozomların seçilmek için çok az şansı vardır. Sıralama seçiminde ise, kromozomlar uygunluklarına göre sıralanır ve her kromozom sırasına göre bir uygunluk değeri alır. En kötüsü uygunluk 1, en iyisi uygunluk N'dir. Buna göre seçim iki şekilde yapılabilir. Birincisinde, rasgele bir çift kromozom seçilir. Rasgele 0 ile 1 arasında R gibi rasgele bir sayı üretilir. $R < r$ ise ilk kromozom ebeveyn olarak kullanılır. $R \geq r$ ise ikinci kromozom ebeveyn olarak kullanılır. Bu işlem, ikinci ebeveyni seçmek için tekrarlanır. r değeri bu yönteme ait bir parametredir. İkinci yöntemde de, rasgele iki kromozom seçilir. En yüksek

değerlendirmeye sahip birey ebeveyn olur. İkinci bir ebeveyn bulmak için aynı kural tekrarlanır (Sivanandam ve Deepa, 2008).

Turnuva seçimi: Turnuva seçim metodu da sıralama seçim metodu gibi sıralamaya dayalıdır. Popülasyondan t tane kromozom rassal olarak seçilir ve içlerinden uygunluk değeri yüksek olan kromozom, karakteri yeni popülasyona aktarılacak üzere ebeveyn olarak seçilir. İstenen popülasyon büyüklüğü tamamlanana kadar işleme devam edilir. Burada t 'nin değerinin belirlenmesi önemlidir. $t=n$ olarak seçilirse yeni popülasyondaki bütün kromozomlar bir önceki popülasyondaki en yüksek uygunluk değerine sahip kromozomların karakteristiğini taşır. $t=1$ olarak seçilirse de turnuva seçimi rassal seçime dönüşür (Koç, 2007).

Stokastik evrensel örnekleme: Stokastik evrensel örnekleme metodu rulet tekeri seçim metoduna benzemekle beraber daha adil bir seçim yapar. Popülasyondaki kromozomlar 0-1 arasındaki bir doğru üzerinde nispi uygunluk değerlerine göre sıralanır. Popülasyondan kaç kromozom seçileceği (N_p) belirlenir. Doğru üzerine nispi uygunluk değerlerine göre yerleştirilen kromozomlar N_p tane işaretçinin birbirine eşit $1/N_p$ aralıkta yerleştirilmesi sonucu seçilir. Şekil 4.7.'de göre 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10 kromozomlarından $N_p=6$ tanesi 1-2-3-4-6-8 şeklinde seçilmiştir (Sivanandam ve Deepa, 2008).



Şekil 4.7. Stokastik evrensel örnekleme seçim metodu örneği

Seçkinlik (Elitizm): En iyi kromozom veya en iyi kromozoma en yakın birkaç kromozom gelecek popülasyona değiştirilmeden aktarılır. Geri kalan kromozomlar diğer yöntemlerle işleme tabi tutularak yeni popülasyona aktarılır. Bu sayede en iyi

çözümler genetik operatörler sonucu değiştirilmemiş ve hiçbir zaman kaybedilmemiş olur. Bu sayede GA'nın performansı önemli ölçüde artar.

Çaprazlama operatöründe seçilen ebeveyn kromozomlar arasındaki gen alışverişi, yani çaprazlama sonucu yeni (yavru) kromozomlar elde edilir. Bu operatör sayesinde, kromozomlar arasında genetik bilgi paylaşımı yapılır ve farklı genetik bilgilerin bir araya getirilerek yeni karakteristik oluşması sağlanır. Seçim operatörleri gibi GA'ların arama stratejisini belirleyen bir operatördür. Problem tiplerine, kodlama yapısına göre farklı çaprazlama operatörleri kullanılabilir. Literatürde, tek noktalı çaprazlama, iki noktalı çaprazlama, çok noktalı çaprazlama, pozisyona dayalı çaprazlama, sıraya dayalı çaprazlama, karışık çaprazlama, düzgün (uniform) çaprazlama, kısmi çaprazlama, çevrim çaprazlama, sıralı çaprazlama gibi birçok çaprazlama türü mevcuttur. Bunlardan literatürde en sık karşılaşılanlar şöyle açıklanmıştır:

Tek noktalı çaprazlama operatörü: En temel çaprazlama operatörüdür. Seçilen iki kromozom belirli tek bir noktadan ikiye bölünerek, noktanın sağ ve sol tarafında kalan genler karşılıklı değiş tokuş edilmesiyle çaprazlama gerçekleştirilir. Şekil 4.8.'de, bir tek noktalı çaprazlama örneği verilmiştir.

Ebeveyn 1	1000110001
Ebeveyn 2	1110000011
Çocuk 1	1000110011
Çocuk 2	1110000001

Şekil 4.8. Tek noktalı çaprazlama operatörü örneği

İki noktalı çaprazlama operatörü: Tek noktalı çaprazlamadan farkı iki çaprazlama noktasının olmasıdır. Seçilen iki kromozom, belirli iki noktadan üçe bölünerek ortada kalan genlerin karşılıklı değiş tokuş edilmesiyle çaprazlama gerçekleştirilir. Şekil 4.9.'da bir iki noktalı çaprazlama örneği verilmiştir.

Ebeveyn 1	1000110001
Ebeveyn 2	1110000011
Çocuk 1	1000000001
Çocuk 2	1110110011

Şekil 4.9. İki noktalı çaprazlama operatörü örneği

Çok noktalı çaprazlama operatörü: Tek ve iki noktalı çaprazlamaya benzer şekilde seçilen iki kromozom N tane çaprazlama noktasından N+1 bölüme ayrılarak bu bölümlerin karşılıklı değiş tokuş edilmesiyle çaprazlama gerçekleştirilir. N=1 olduğunda tek noktalı, N=2 olduğunda da iki noktalı çaprazlamaya dönüşür.

Düzgün çaprazlama operatörü: N noktalı çaprazlama operatörlerinden tamamen farklı bir yapısı vardır. Öncelikle seçilen kromozomlara ek olarak, ‘maske’ olarak adlandırılan ve uzunluğu diğer kromozomlarla aynı olacak şekilde iki kodlama yapısına sahip rasgele bir kromozom oluşturulur. Genetik çaprazlama ile oluşturulacak ilk yavru için maske kromozomunda ‘1’ değerini alan genler ilk kromozomdaki genin, ‘0’ değerini alan genler ikinci kromozomdaki genin kopyalanacağını ifade eder. İkinci yavru için de durum tam tersidir. Şekil 4.10.’da bir düzgün çaprazlama örneği verilmiştir.

Ebeveyn 1	AGCCTAGTTA
Ebeveyn 2	ACCCTTGAAG
Maske	1101010100
Çocuk 1	AGCCTAGTAG
Çocuk 2	ACCCTTGATA

Şekil 4.10. Düzgün çaprazlama operatörü örneği

Mutasyon operatörü ise genetik çeşitliliği artırmak ve arama esnasında en iyi yerel çözümlere takılmayı engellemek için çaprazlama operasyonundan sonra tercih edilir.

Literatürdeki sıkça karşılan mutasyon operatörleri kromozomun belirli elemanlarında yer değiştirme, tersine çevirme, karıştırma, tersine sıralama, vb. operasyonlardır:

Tersine çevirme: Genellikle ikili kodlamada tercih edilir. Mutasyona uğrayacak kromozomdaki belirlenen genler tersi değerine çevrilir. İkili kodlamada genin değeri ‘1’ ise ‘0’a, ‘0’ ise ‘1’e dönüştürülerek mutasyon operasyonu gerçekleştirilir.

Yer değiştirme: Mutasyona uğrayacak kromozomun belirlenen genlerinin yer değiştirilmesi ile mutasyon operasyonu gerçekleştirilir.

Karıştırma: Mutasyona uğrayacak kromozomun belirlenen gen dizisinin sırası karıştırılarak mutasyon operasyonu gerçekleştirilir.

Ters sıralama: Karıştırmadan farklı olarak mutasyona uğrayacak kromozomun belirlenen gen dizisi mevcut dizilimin tam tersi olacak şekilde yeniden sıralanarak mutasyon operasyonu gerçekleştirilir.

4.2.1.4. Genetik algoritma parametreleri

GA’ların performansı algoritma parametrelerinden ciddi şekilde etkilenebilir. Hatta belirli problemler için sadece bu parametrelerin belirlenmesi için araştırmalar yapılmıştır. GA’ların performansını belirleyen bu parametreler; popülasyon büyüklüğü, çaprazlama olasılığı, mutasyon olasılığı olarak sayılabilir.

Popülasyon büyüklüğü, bir popülasyondaki kromozomların sayısı popülasyon büyüklüğünü gösterir. Popülasyon büyüklüğü az olduğunda genetik çeşitlilik de az olacağından ve mevcut popülasyonun arama uzayını temsili yetersiz kalacağından GA’nın performansı düşük olacaktır. Diğer bir taraftan da popülasyon büyüklüğü ne kadar fazla ise genetik çeşitlilik aynı oranda fazla olacaktır. Genetik çeşitliliğin fazla olması en uygun çözüm değerinin elde edilmesi için her ne kadar istenen bir durum olsa da (tam kombinatoryel problemlerde tüm kombinasyonlara bakılması gibi) çözüm

zamanını ciddi oranda etkileyebileceğinden bu parametrenin amaca uygun bir şekilde belirlenmesi önemlidir.

Çaprazlama olasılığı, kromozomların çaprazlama operasyonuna tabi tutulup tutulmayacağını belirler. Başka bir deyişle çaprazlama operasyonunun ne sıklıkla tekrarlanacağını belirler. Çaprazlama olasılığı yüksek olduğunda, çaprazlama operasyonu fazla olacağından mevcut popülasyon hızlı bir şekilde değişir. Tam tersi çaprazlama olasılığı düşük olduğunda da GA'nın arama hızı düşük olur. Çünkü çaprazlama olmadığında yavrular ebeveynlerin kopyaları olur.

Mutasyon olasılığı, mutasyon operasyonunun ne sıklıkla tekrarlanacağını belirler. Mutasyon operasyonu genellikle aramanın yerel en iyi çözümlere takılmasını engellediği için tercih edilir ve olasılığının sıfırdan büyük olması istenir. Fakat gereğinden fazla gerçekleşen bir mutasyon, aramanın rassal aramaya dönüşmesine sebep olabilir.

4.2.1.5. Genetik algoritmalarda durdurma kriteri

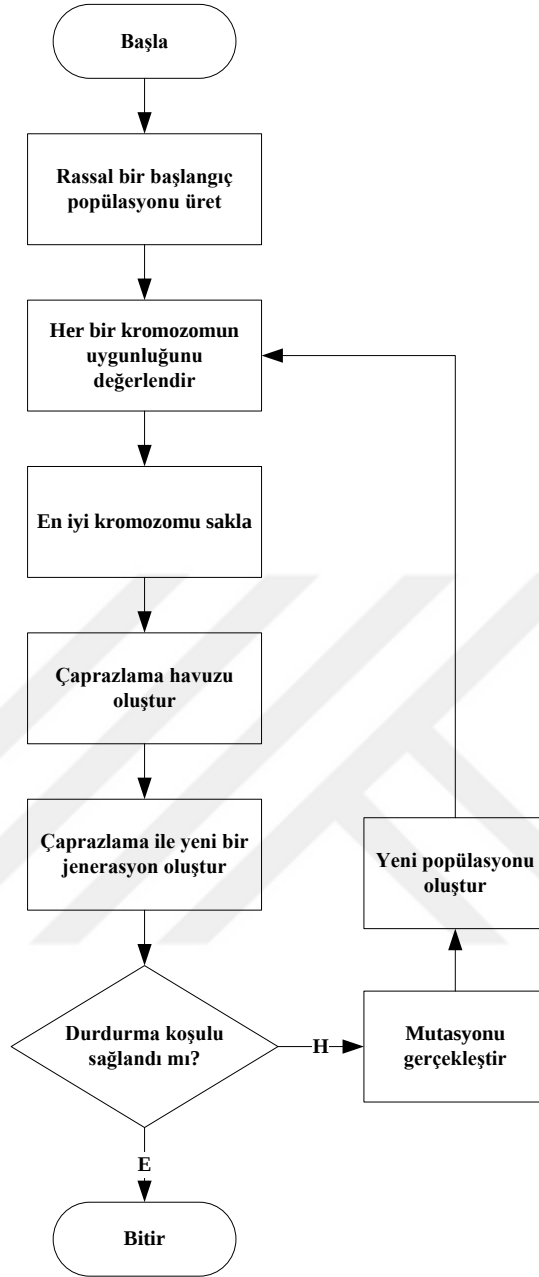
GA'larda arama işlemini sonlandıracak en çok iterasyon sayısı, geçen süre, uygunluk fonksiyonun değişmeme sayısı, vb. gibi bir kriter mutlaka vardır.

4.2.1.6. Genetik algortmada işlem adımları

Bir GA'nın veri akış diyagramı Şekil 4.11.'de (Sivanandam ve Deepa, 2008) verilmiştir.

4.2.2. Önerilen hibrit genetik algoritma (HGA)

Önerilen HGA'nın kodlama yapısı, çaprazlama operatörü, mutasyon operatörü, seçim metodu ve algoritma parametreleri ile ilgili detaylı bilgiler aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.11. GA veri akış diyagramı

4.2.2.1. Kodlama yapısı

Kodlama yapısı olarak permütasyon kodlama tercih edilmiştir. Her bir gen, bir müşteriye ait bir nesneyi temsil etmektedir. Bu genler, nesnenin numarası ile adlandırılırken içerisinde nesnenin en, boy ve yükseklik bilgileri ile birlikte 2 veya 6-yönlü döndürülebilme özelliği, ağırlığı ve kırılabilirlik özelliğine dair bilgileri de taşımaktadır.

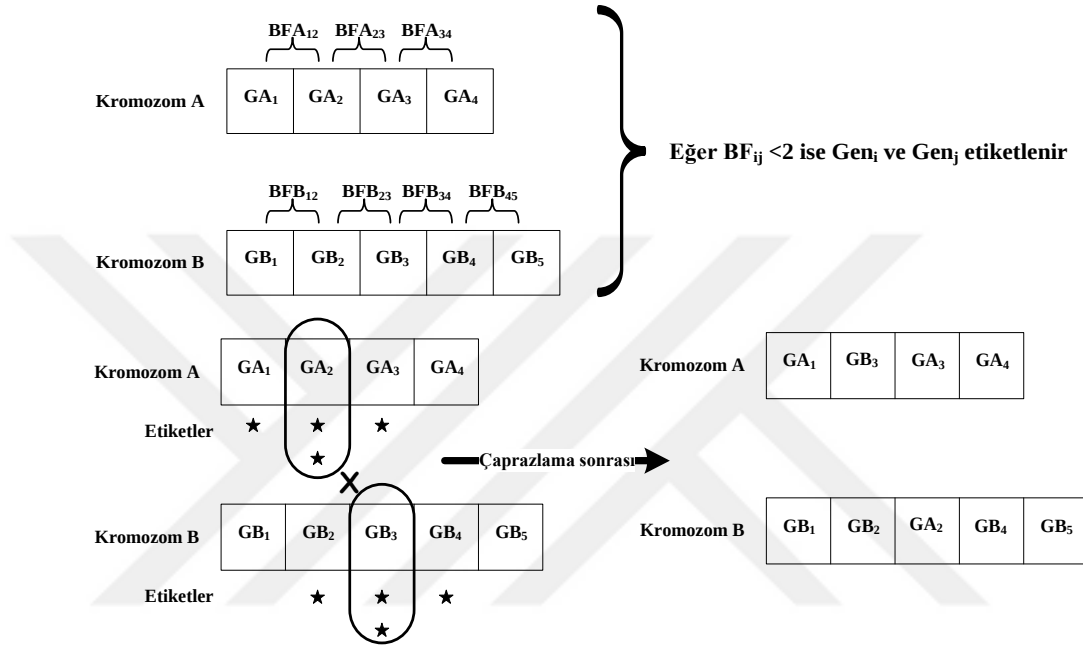
4.2.2.2. Çaprazlama operatörü

Önerilen HGA yığın oluşturma tabanlı bir sezgisel algoritma ile hibritlendiğinden, bir kromozom içerisinde birbiri ile benzer boyutlardaki nesnelerin bilgilerini taşıyan komşu genler birleştirilebilmektedir. Bu operasyon da kromozom uzunluklarını değiştirebilmektedir. Literatürdeki mevcut çaprazlama operatörleri, eşit uzunluktaki kromozomları çaprazlamakta kullanılmaktadır. Bu sebeple önerilen HGA'da daha farklı bir çaprazlama operatörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple yeni bir çaprazlama operatörü geliştirilmiştir. Bu operatör 'Akıllı Dinamik Çaprazlama Operatörü (A-DÇO)' olarak adlandırılmıştır.

A-DÇO, benzerlik faktörü (BF) olarak adlandırılan bir parametreye göre çalışmaktadır. BF, bir genin içerdiği en, boy ve yükseklik bilgilerinin komşu genin içerdiği en, boy ve yükseklik bilgileriyle benzerliğine göre değer alır. Örneğin, ele alınan iki komşu gendeki en, boy ve yükseklik bilgilerinden bir tanesi birbiri ile aynı ise (eğer bu nesneler 6-yönlü döndürülebiliyorsa en, boy ve yükseklik bilgilerine sıra gözetmeksizin bakılabilir) bu iki komşu gene ait BF değeri bir olarak hesaplanır. A-DÇO, BF değerleri ikiden küçük olan genleri etiketler. Karşılıklı çaprazlanacak olan kromozomlardaki birden fazla etikete sahip olan genlerin sırası ile yerlerini değiştirerek çaprazlama operasyonunu gerçekleştirir. Çaprazlanacak iki kromozomdaki birden fazla etiketlenmiş gen sayısı birbirine eşit değilse, az sayıdaki birden fazla etiketlenmiş gen dikkate alınarak çaprazlama yapılır. Diğerleri çaprazlanmaz.

Önerilen HGA'nın hibritlendiği yığın oluşturma tabanlı sezgisel algoritma için bir kromozomdaki ikili komşu genlerde bilgileri taşınan nesnelerin boyutlarının benzer olması istenen bir durumdur. Bu şekilde benzer olan komşu genler birleştirilerek yığın yerleştirmeler yapılır. A-DÇO, bir kromozomdaki her iki komşusu ile benzerliği olmayan genleri belirleyip onları diğer kromozomdaki aynı durumdaki bir başka gen ile değiştirerek bu benzerliği artırmayı hedefler.

A-DÇO'nun bir örnek üzerinde şematik gösterimi Şekil 4.12.'deki gibidir. Görüldüğü gibi örnekte biri dört, diğeri de beş gene sahip iki kromozom çaprazlanmaktadır. Komşu genlerin BF'lerine bakılmış ve $BF < 2$ kuralına göre etiketleme yapılmıştır. Her iki kromozomda da birer tane çift etiketli gen tespit edilmiştir ve bunlar çaprazlanmıştır.



Şekil 4.12. Bir A-DÇO örneği

4.2.2.3. Mutasyon operatörü

Permütasyon kodlamada çaprazlama operasyonundan sonra kromozomların yapıları bozulabilmektedir. Gen değiş tokuşu yapıldıktan sonra bir kromozomda aynı bilgiyi taşıyan iki gen bulunabilirken, olması gereken bir gen de olmayabilmektedir. Bu durum istenmediğinden dolayı zorunlu bir değişikliğe, düzenlemeye ihtiyaç duyulabilir. Bu değişiklik mutasyon operasyonu ile sağlanabilir. Önerilen algorithma çaprazlama operasyonu sonrasında her bir kromozom kontrol edilerek tekrarlayan genlerin ikincisi silinerek yerine olması gereken ama olmayan bir gen eklenerek bütünlük tekrar sağlanır. Buna zorunlu mutasyon da denilebilir. Bu mutasyon operasyonu ihtiyaç duyulmadığı sürece gerçekleştirilmez.

4.2.2.4. Seçim metodu

Çaprazlama ve mutasyon operasyonları gerçekleştirildikten sonra BF'ler yeniden hesaplanır. Eğer bir kromozomda hiçbir BF değeri iki veya daha büyük olan ikili komşu gen yoksa o kromozom elenir ve karakteristiklerini bir sonraki popülasyona aktarabilmek için seçilemez.

4.2.2.5. Önerilen HGA'nın seçilen parametreleri

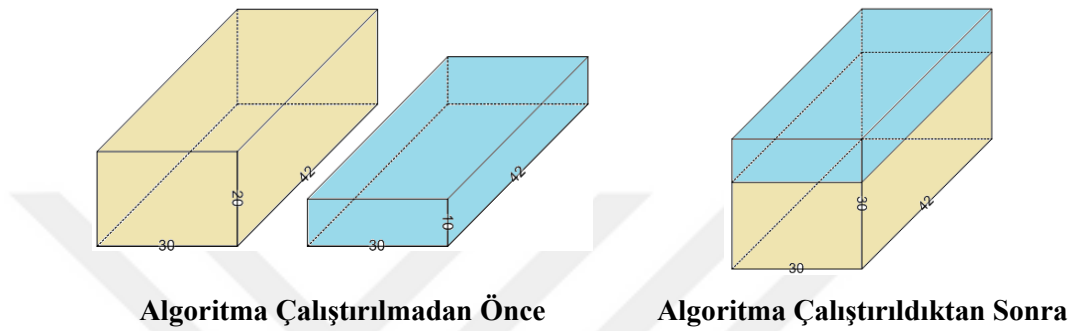
GA'nın parametrelerinin belirlenmesi başlı başına bir araştırma konusudur. Gonçalves ve Resende (2012) çalışmalarında KYP'lerin çözümü için GA kullanmış ve GA parametrelerinin belirlenmesi ile ilgili araştırmalar yapmıştır. Bu tezde de önerilen HGA için Gonçalves ve Resende (2012)'nin önerdikleri GA parametreleri referans alınmıştır. Buna göre; popülasyon büyüklüğü, 20x yerleştirilecek nesne sayısı, çaprazlama olasılığı %70, durdurma kriteri 500 iterasyon olarak belirlenmiştir. Uygunluk fonksiyonu ise hacimsel kullanım oranı olarak seçilmiştir. Bunun sebebi de, önerilen HGA'nın test edileceği literatür test problemlerinde amaç fonksiyonunun hacimsel kullanım oranının enbüyüklenmesi olmasıdır.

4.2.2.6. Sezgisel algoritma 1- Yığın oluşturma yaklaşımı

Önerilen HGA'nın klasik GA'nın iki farklı yerleştirme sezgiseli ile hibritlenmesi ile oluştuğundan daha önce bahsedilmişti. HGA'nın adımlarına göre ilk sırada olan yükleme sezgiseli yığın oluşturma tabanlı bir yaklaşımdır. Bu sezgisel algoritma, HGA'nın içerisinde çaprazlama ve mutasyon operasyonlarından hemen sonra çalışır.

Çaprazlama ve mutasyon operasyonlarından sonra kromozomlardaki tüm iki komşu genlere ait BF'ler yeniden hesaplanır. İki komşu gene ait BF değeri 2 veya daha büyükse bu iki genin sembolize ettiği nesneler birleştirilir. Birleştirme işlemi yapılırken, iki nesne aynı olan en, boy veya yükseklik ölçülerinden ikisi çıkışacak şekilde, üst üste veya yan yana getirilir. Üçüncü boyutlar da toplanarak yeni nesnenin en, boy ve yükseklik değeri belirlenir.

Şekil 4.13.'te söz konusu operasyonun görsel bir örneği verilmiştir. Buna göre; (30, 42, 20) ebadında bir nesne ile (30, 42, 10) ebadında bir nesne birleştirilirken en (30) ve boy (42) ölçüleri çakışacak şekilde üst üste yerleştirilir. Üçüncü boyut olan yükseklik değerleri (20 ve 10) toplanarak yeni nesnenin ebatı (30, 42, 30) olarak belirlenir. Bu işlem kırılğan özellikteki nesneler için yapılmaz. Ayrıca, burada gerekirse ve nesnenin özellikleri müsaade ediyorsa döndürme de yapılabilir.



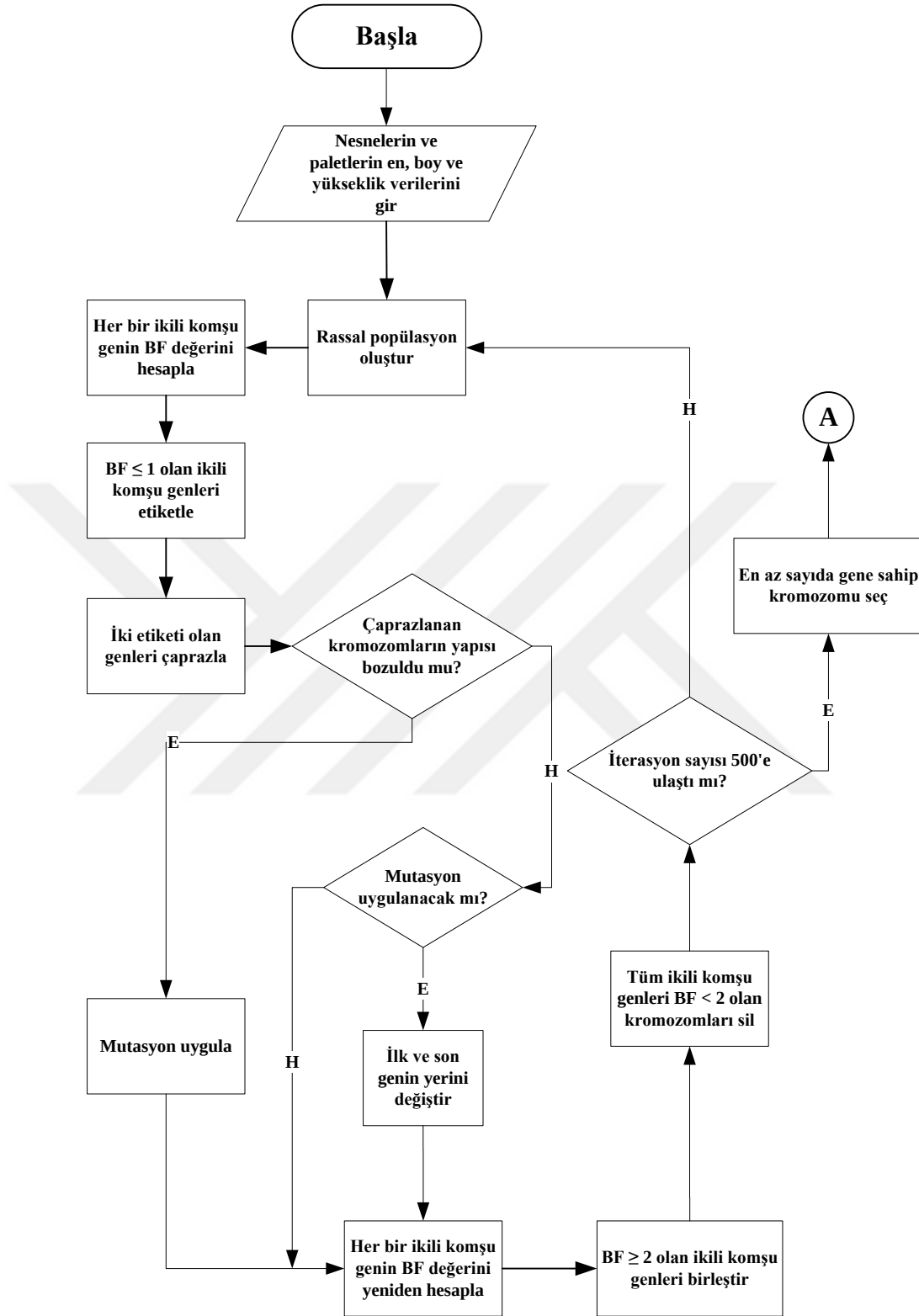
Şekil 4.13. Benzer nesneleri birleştirme operasyonu örneği

Önerilen HGA'nın nihai yerleştirme işlemine kadar olan bölümünün veri akış diyagramı Şekil 4.14.'te verilmiştir.

4.2.2.7. Sezgisel algoritma 2- En dip sol alt yerleştirme algoritması

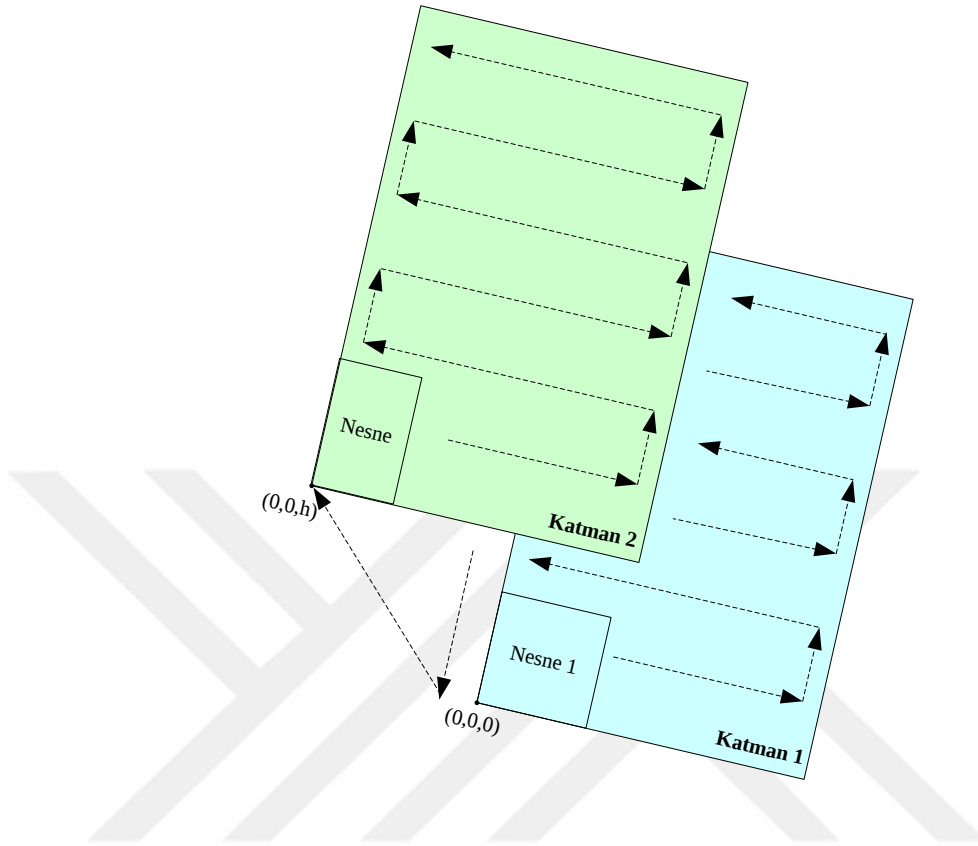
Önerilen HGA ile Şekil 4.14.'teki veri akış diyagramında da ifade edilen adımlar tamamlandıktan sonra bir nihai yerleştirme sonucuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için Karabulut ve İnceoğlu'nun (2004) geliştirdiği DASD sezgisel algoritması referans alınmıştır.

En dip sol alt yerleştirme algoritması, her nesneyi ilk izin verilen en dipteki alt sol doldurma konumuna yerleştirmeye dayanmaktadır. Buna göre ilk nesnenin, en dipteki alt sol nokta yani (0, 0, 0) koordinatlarına yerleştirilmesiyle işe başlanır. Sonraki yerleşimler sağa ve geriye doğru devam eder. Böylece hareketler önce ende, daha sonra boyda ve sonra yükseklikte yapılır.



Şekil 4.14. HGA'nın veri akış diyagramı

Bu algoritma yatay katman oluşturma yaklaşımı tabanlı sezgisel bir algoritmadır. Sözlü anlatılan yerleştirme işleminin hareket şeması Şekil 4.15.'te verilmiştir.



Şekil 4.15. DASD algoritmasının hareket şeması

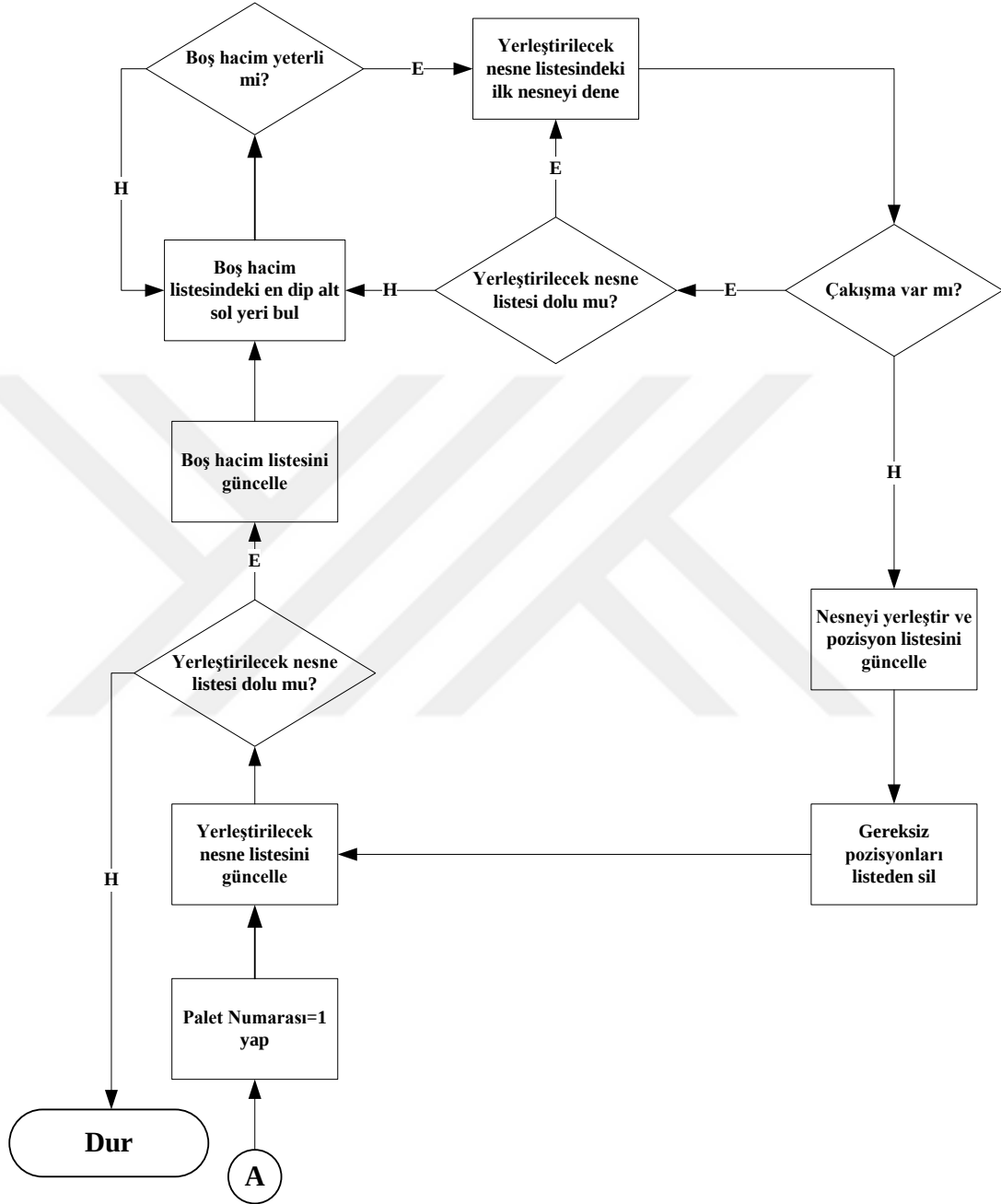
Önerilen HGA'nın tüm iterasyonları tamamlandıktan sonra elde edilen en az sayıda gene sahip olan kromozomu ele alan DASD algoritması Şekil 4.16.'da verilen veri akış diyagramındaki adımlara göre çalışır.

4.2.3. Bir 3B-PYP örneğinin önerilen HGA ile çözümü

Önerilen HGA'nın işleyişi temel bir örnek üzerinde gösterilebilir. Bunun için ağırlık, en, boy ve yükseklik bilgileri ile döndürme ve kırılma özellikleri verilen 10 farklı çeşit ve toplamda yerleştirilecek 93 tane nesneden oluşan bir sipariş ele alınmıştır. Nesnelere ait bu veriler Tablo 4.3.'te görülmektedir.

Nesnelerin yerleştirileceği standart palet(ler)in boyutları da 80x120x120 cm ve hacmi 1.152.000 cm³'tür. Verilen nesnelerin toplam hacmi de 3.712.000 cm³'tür. Hacimsel

olarak bakıldığında verilen nesnelerin en az dört palete yerleştirilmesi beklenir. Çünkü hacimsel kullanım oranı %322,22'dir.



Şekil 4.16. DASD algoritmasının veri akış diyagramı

Tablo 4.3. Bir 3B-PYP'ye ait veriler

Nesne Çeşidi	Nesne Sayısı	En (cm)	Boy (cm)	Yükseklik (cm)	Toplam Hacim (cm ³)	Kontrollü Döndürme	Kırılgenlik (0/1)	Ağırlık (kg)
1	20	10	10	10	20000	6-yönlü	0	1
2	20	20	20	10	80000	6-yönlü	0	2,2
3	12	30	20	10	72000	6-yönlü	0	2,5
4	9	40	40	40	576000	6-yönlü	0	4
5	6	50	40	40	480000	2-yönlü	0	4,3
6	10	60	20	20	240000	6-yönlü	0	5,1
7	2	40	50	40	160000	6-yönlü	0	5,4
8	4	50	50	50	500000	6-yönlü	0	5,5
9	4	30	60	60	432000	2-yönlü	1	4
10	6	80	60	40	1152000	6-yönlü	0	12
Toplam	93	-	-	-	3712000	-	-	-

Ele alınan problem önerilen HGA ile bir sn'den kısa bir sürede çözülmüştür ve çözüm raporu Tablo 4.4.'te özetlenmiştir. Bu tabloda önce 93 tane nesneye ait özet veriler görülmektedir. Önerilen HGA, benzer nesneleri birleştirdiği gibi bazı nesnelerin boyutları değişmiş, bazıları da tablodan silinmiştir. Başlangıçtaki 93 tane nesne 47 taneye düşmüştür.

Birleştirme (yığın yerleştirme) sonucu oluşan yeni nesneler tekrar baştan numaralandırılmış ve duruş şekillerine göre boyutları güncellenmiştir. Daha sonra bu nesnelerin ön sol alt noktaları referans noktası olarak alınmış ve bu referans noktalarının paletin üzerinde yerleştirildikleri koordinatlar verilmiştir. Ayrıca verilen nesneler dört palete yerleştirildiği için hangi nesnenin hangi palette olduğu bilgisi de tabloda yer almaktadır.

Tablo 4.4. Tablo 4.3'te verilen problemin çözüm raporu özeti

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	10	10	10	1'	10	20	10	0	0	0	1
2	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
3	10	10	10	2'	10	20	10	10	0	0	1
4	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
5	10	10	10	3'	10	20	10	20	0	0	1
6	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
7	10	10	10	4'	10	20	10	30	0	0	1
8	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
9	10	10	10	5'	10	20	10	40	0	0	1
10	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
11	10	10	10	6'	10	20	10	50	0	0	1

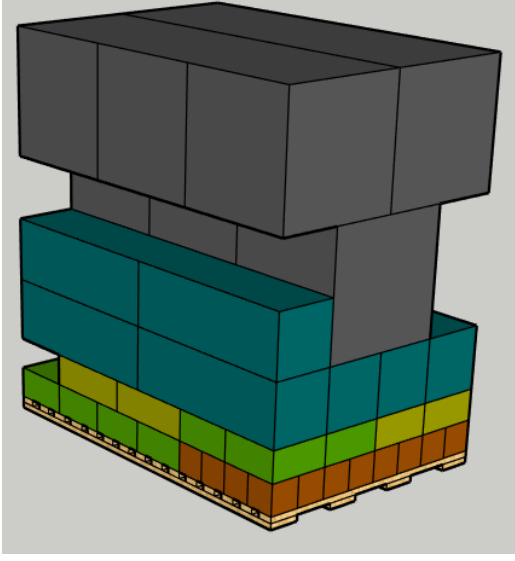
Tablo 4.4. (Devamı)

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
12	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
13	10	10	10	7'	10	20	10	60	0	0	1
14	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
15	10	10	10	8'	10	20	10	70	0	0	1
16	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
17	10	10	10	9'	10	20	10	0	20	0	1
18	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
19	10	10	10	10'	10	20	10	10	20	0	1
20	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	1
21	20	20	10	11'	20	40	10	20	20	0	1
22	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
23	20	20	10	12'	20	40	10	40	20	0	1
24	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
25	20	20	10	13'	20	40	10	60	20	0	1
26	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
27	20	20	10	14'	20	40	10	0	40	0	1
28	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
29	20	20	10	15'	20	40	10	20	40	0	1
30	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
31	20	20	10	16'	20	40	10	40	40	0	1
32	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
33	20	20	10	17'	20	40	10	60	40	0	1
34	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
35	20	20	10	18'	20	40	10	0	80	0	1
36	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
37	20	20	10	19'	20	40	10	0	0	10	1
38	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
39	20	20	10	20'	20	40	10	20	0	10	1
40	20	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
41	30	20	10	21'	20	60	10	40	0	10	1
42	30	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
43	30	20	10	22'	20	60	10	60	0	10	1
44	30	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
45	30	20	10	23'	20	60	10	0	40	10	1
46	30	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
47	30	20	10	24'	20	60	10	20	40	10	1
48	30	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
49	30	20	10	25'	20	60	10	40	40	10	1
50	30	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
51	30	20	10	26'	20	60	10	60	40	10	1
52	30	20	10	-	-	-	-	-	-	-	1
53	40	40	40	27'	40	120	40	20	0	40	1
54	40	40	40	-	-	-	-	-	-	-	1
55	40	40	40	-	-	-	-	-	-	-	1
56	40	40	40	28'	40	120	40	0	0	80	1
57	40	40	40	-	-	-	-	-	-	-	1
58	40	40	40	-	-	-	-	-	-	-	1
59	40	40	40	29'	40	120	40	40	0	80	1
60	40	40	40	-	-	-	-	-	-	-	1
61	40	40	40	-	-	-	-	-	-	-	1
62	50	40	40	30'	80	50	40	0	0	0	3
63	50	40	40	-	-	-	-	-	-	-	3
64	50	40	40	31'	80	50	40	0	50	0	3

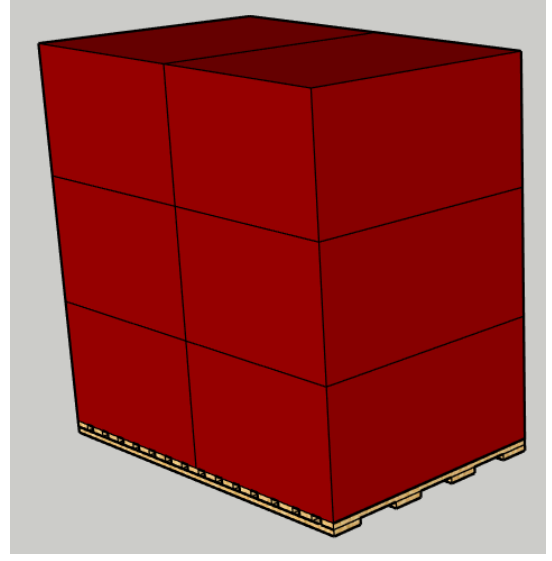
Tablo 4.4. (Devamı)

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
65	50	40	40	-	-	-	-	-	-	-	3
66	50	40	40	32'	80	50	40	0	0	40	3
67	50	40	40	-	-	-	-	-	-	-	3
68	60	20	20	33'	20	120	20	0	0	20	1
69	60	20	20	-	-	-	-	-	-	-	1
70	60	20	20	34'	20	120	20	20	0	20	1
71	60	20	20	-	-	-	-	-	-	-	1
72	60	20	20	35'	20	120	20	40	0	20	1
73	60	20	20	-	-	-	-	-	-	-	1
74	60	20	20	36'	20	120	20	60	0	20	1
75	60	20	20	-	-	-	-	-	-	-	1
76	60	20	20	37'	20	120	20	0	0	40	1
77	60	20	20	-	-	-	-	-	-	-	1
78	40	50	40	38'	80	50	40	0	0	80	3
79	40	50	40	-	-	-	-	-	-	-	3
80	50	50	50	39'	50	100	50	0	0	0	4
81	50	50	50	-	-	-	-	-	-	-	4
82	50	50	50	40'	50	100	50	0	0	50	4
83	50	50	50	-	-	-	-	-	-	-	4
84	30	60	60	41'	30	60	60	0	50	40	3
85	30	60	60	42'	30	60	60	30	50	40	3
86	30	60	60	43'	30	60	60	50	0	0	4
87	30	60	60	44'	30	60	60	50	60	0	4
88	80	60	40	45'	80	120	40	0	0	0	2
89	80	60	40	-	-	-	-	-	-	-	2
90	80	60	40	46'	80	120	40	0	0	40	2
91	80	60	40	-	-	-	-	-	-	-	2
92	80	60	40	47'	80	120	40	0	0	80	2
93	80	60	40	-	-	-	-	-	-	-	2

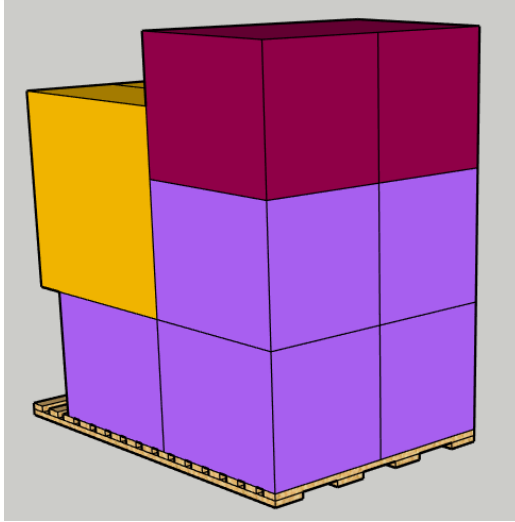
Tablo 4.4.'te verilen özet çözüm raporunun üç boyutlu görseli de Şekil 4.17.'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere tüm nesneler dört palete yerleştirilmiştir. Şekilde paletlerin sol görünüşleri verilmiştir.



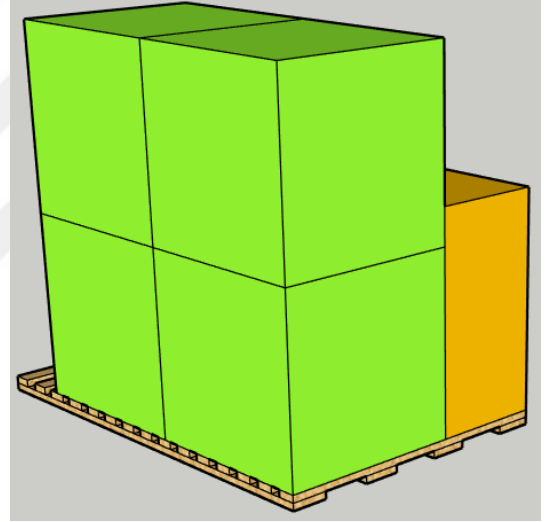
Palet No 1 Sol profil



Palet No 2 Sol profil



Palet No 3 Sol profil



Palet No 4 Sol profil

Şekil 4.17. Tablo 4.4'te verilen değerlerin görsel ifadesi

BÖLÜM 5. SAYISAL ANALİZLER

Bu bölümde, problem parametrelerinin çözüm değerleri ve çözüm zamanı üzerindeki etkileri araştırılmış ve önerilen HGA'nın test problemleri kullanılarak literatürde mevcut diğer çözüm yöntemleri ile karşılaştırmaları sunulmuştur.

5.1. Problemin Parametrik Analizleri

Bu tez çalışmasında ele alınan 3B-PYP'nin NP-Zor karmaşıklık sınıfında olduğu daha önceden de ifade edilmişti. Bu karmaşıklık sınıfındaki büyük ölçekli problemleri optimize etmek için dal-sınır algoritması gibi standart algoritmalar kullanıldığı takdirde genellikle sonlu zamanda cevap alınamamaktadır. Bu nedenle, optimizasyon için ayrıştırma algoritmaları ya da yaklaşık çözümler elde edebilmek için sezgisel veya meta-sezgisel algoritmalar tercih edilmektedir.

Önerilen MILP büyük ölçekli problemlerin çözümü için kullanıldığında sonlu zamanda çözüm elde edilememiştir. Dolayısıyla aynı şekilde büyük ölçekli problem çözme tekniklerine ihtiyaç duyulmuştur ve bir meta-sezgisel algoritma geliştirilmesine karar verilmiştir. Bu aşamada, geliştirilecek olan meta-sezgisel algoritmaya yön vermesi açısından problemin parametrelerindeki değişimin çözüme olan etkileri test edilmiştir.

Ele alınan 3B-PYP'nin parametreleri; müşteri sayısı, yerleştirilecek nesne sayısı ve paletlerle nesnelerin boyutlarıdır. Bunlara ek olarak, literatürde incelenen parametrelerden biri olan nesne boyutlarına bağlı olan nesne çeşitliliği ve hem yerleştirilen nesne hacimlerine hem de palet hacimlerine bağlı olan palet kullanım oranı da incelenmiştir. Müşteri sayısı ve yerleştirilecek nesne sayısı girdi parametreleri doğrudan önerilen MILP'in indisleri olduğu için bu parametrelerin değerlerindeki

herhangi bir artışın, 0-1 tam sayılı (ikili) ve serbest değişkenler ile kısıt denklemleri sayısını doğrudan artıracığından bu iki problem parametresinin çözüm zamanını doğrudan artıracığı söylenebilir.

Literatürde önerilen algoritmalar test edilirken, genellikle hacimsel kullanım oranına ve/veya çözüm zamanına etkileri üzerinde karşılaştırmalar yapıldığı görülmüştür. Bu bölümdeki problem parametre araştırmaları da yine bu iki yanıt üzerinden yapılmıştır.

İlk olarak nesne çeşitliliğinin hacimsel kullanım oranına ve çözüm zamanına etkisi araştırılmıştır. Test problemi olarak literatürde BR1-BR7 (Bischoff ve Ratcliff, 1995a) olarak bilinen yedi farklı nesne çeşitliliğine sahip veri seti kullanılmıştır. Burada 3, 5, 8, 10, 12, 15 ve 20 farklı nesne çeşitliliği içeren test problemleri mevcuttur.

Bu test problemlerinde tüm nesneler tek bir konteynere sığabildiğinden, bu problemler TKYP'ler için oldukça uygundur. Ayrıca sorguladığımız nesne çeşitliliğinin hacimsel kullanım oranına ve çözüm zamanına etkisini araştırmak için de uygundur. Her bir problem sınıfından üçer tane olmak üzere toplamda 21 farklı problem ele alınarak çözülmüştür.

Çözüm sonuçları Tablo 5.1.'de verilmiştir. Çözüm sonuçları tablosundaki alt sınır (palet) değerleri problemde verilen nesnelerin toplam hacimlerinin, yine problemde verilen konteyner/ palet hacmine göre en az palete ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Üst sınır (%) değerleri de problemde verilen nesnelerin toplam hacimlerinin, yine problemde verilen konteyner/ palet hacmine bölünmesi ile bulunmuştur. Çözümlerden elde edilen hacimsel kullanım oranı ve çözüm zamanı yanıtları dikkate alınarak varyans analizi (ANOVA) ile hipotezler test edilmiştir.

Hacimsel kullanım oranı dikkate alındığında yedi farklı problem grubunun çözüm değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını araştırmak için H_0 hipotezi test edilmiştir. ANOVA sonucu Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. BR1-BR7 test problemlerinin çözüm değerleri

Problem No	Nesne Sayısı	Alt Sınır (Palet)	Üst Sınır (%)	Palet Sayısı	Hacimsel Kullanım Oranı (%)	Çözüm Zamanı (sn)
BR1.1	112	1	98,83	2	92,05*	86400
BR1.2	138	1	98,86	1	98,86	46921
BR1.3	127	1	99,47	2	86,40*	86400
BR2.1	81	1	98,83	2	93,57*	86400
BR2.2	114	1	99,92	2	87,03*	86400
BR2.3	166	1	99,24	1	99,24	74099
BR3.1	94	1	99,67	2	91,36*	86400
BR3.2	115	1	99,78	2	92,28*	86400
BR3.3	143	1	99,98	2	87,89*	86400
BR4.1	106	1	97,60	2	92,06*	86400
BR4.2	123	1	98,94	1	98,94	79668
BR4.3	135	1	99,82	2	87,06*	86400
BR5.1	98	1	98,69	2	93,65*	86400
BR5.2	138	1	98,61	1	98,61	51658
BR5.3	133	1	99,93	2	86,98*	86400
BR6.1	129	1	99,73	2	87,73*	86400
BR6.2	149	1	99,84	2	84,26*	86400
BR6.3	138	1	99,73	2	85,92*	86400
BR7.1	110	1	97,88	2	93,07*	86400
BR7.2	129	1	98,50	2	88,85*	86400
BR7.3	126	1	99,81	2	99,81	86400

*Algoritma 86400 sn içerisinde optimal sonuca ulaşamadıysa durdurulmuştur.

H_0 : Yedi farklı problem grubuna ait hacimsel kullanım oranları ortalaması arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.2. Yedi farklı problem grubunun hacimsel kullanım oranı açısından ANOVA sonucu

Faktör Gruplar	Tip Sabit	Seviye 7	Değerler 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7			
Hacimsel kullanım oranı için varyans analizi (düzeltilmiş kareler toplamı ile)						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Ardışık Kareler Top.	Düzeltilmiş Kareler Top.	Düzeltilmiş Ort. Kareler	F	P
Gruplar	6	45,650	45,650	7,610	0,64	0,70
Hata	14	167,36	167,36	11,95		
Toplam	20	213,01				

Tablo 5.2.'deki P değeri H_0 hipotezinin %95 güven aralığında kabul edilebileceğini gösteriyor. Yani, ele alınan nesne çeşitliliği açısından yedi farklı gruba ait problemin çözümlerine ait hacimsel kullanım oranı ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. Bu sonuç bize gösteriyor ki; nesne çeşitliliğinin önerilen MILP'in hacimsel kullanım oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi yoktur.

Çözüm zamanı dikkate alındığında ise yedi farklı problem grubunun çözüm değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını araştırmak için H_0 hipotezi test edilmiştir. ANOVA sonucu Tablo 5.3.'te verilmiştir.

H_0 : Yedi farklı problem grubuna ait çözüm zamanları ortalaması arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.3.Yedi farklı problem grubunun çözüm zamanı açısından ANOVA sonucu

Faktör	Tip	Seviye	Değerler			
Gruplar	Sabit	7	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7			
Çözüm zamanı için varyans analizi (düzeltilmiş kareler toplamı ile)						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Ardışık Kareler Top.	Düzeltilmiş Kareler Top.	Düzeltilmiş Ort. Kareler	F	P
Gruplar	6	573300881	573300881	95550147	0,68	0,670
Hata	14	1974821620	1974821620	141058687		
Toplam	20	2548122501				

Tablo 5.3.'teki P değeri H_0 hipotezinin %95 güven aralığında kabul edilebileceğini gösteriyor. Yani, ele alınan nesne çeşitliliği açısından yedi farklı gruba ait problemin çözüm zamanı ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. Bu sonuç bize gösteriyor ki; nesne çeşitliliğinin önerilen MILP'in çözüm zamanı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi yoktur.

Yapılan istatistiksel analiz gösteriyor ki; nesne çeşitliliği çözüm başarısı ve zamanı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki oluşturmuyor. Bir başka indirekt parametre olan palet yükleme oranı için de aynı analiz yapılmıştır. Bu analizde BR1-BR7 (Bischoff ve Ratcliff, 1995a) problemlerinin palet (konteyner) yükleme oranları birbirine yakın olduğu ve grup oluşturmadığı için Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin çalışmalarında önerdikleri parametrelere göre test problemleri türetilmiştir. Problemlerde nesnelerin enleri 70-100 cm, boyları 50-80 cm ve yükseklikleri 30-60 cm aralığında düzgün dağılıma uyacak şekildedir. Konteynerlerin (palet olarak da düşünülebilir) boyları 609,6 cm (20 ft), enleri ve yükseklikleri 243,84 cm (8 ft) olarak alınmıştır. Türetilen problemler palet yükleme oranlarına göre %70-80, %80-90 ve %90-100 aralıklarında olacak şekilde üç farklı grupta yedişer problem olacak şekildedir. Ele alınan bu veri seti bir öncekinden çok daha fazla heterojendir. Problem seti önerilen MILP ile çözülmüştür ve çözüm sonuçları Tablo 5.4.'teki gibidir.

Çözümlerden elde edilen hacimsel kullanım oranı ve çözüm zamanı yanıtları dikkate alınarak ANOVA ile hipotezler test edilmiştir.

Tablo 5.4. Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin veri setinden elde edilen test problemlerinin önerilen MILP ile çözüm değerleri

Problem No	Nesne Sayısı	Alt Sınır (Palet)	Üst Sınır (%)	Palet Sayısı	Hacimsel Kullanım Oranı (%)	Çözüm Zamanı (sn)	Problem No	Nesne Sayısı	Alt Sınır (Palet)	Üst Sınır (%)	Palet Sayısı	Hacimsel Kullanım Oranı (%)	Çözüm Zamanı (sn)
1	107	1	72,56	1	72,56	18652	12	131	1	89,93	2*	82,53*	86400
2	119	1	79,61	1	79,61	41168	13	123	1	81,60	1	81,60	74346
3	116	1	78,03	1	78,03	37051	14	128	1	86,08	2*	80,52*	86400
4	113	1	77,32	1	77,32	34698	15	137	1	96,09	2*	82,47*	86400
5	115	1	77,55	1	77,55	32587	16	132	1	91,57	2*	81,09*	86400
6	106	1	72,86	1	72,86	20932	17	134	1	92,36	2*	82,11*	86400
7	104	1	71,12	1	71,12	17862	18	135	1	94,01	2*	81,08*	86400
8	122	1	80,11	2	75,61	54386	19	143	1	99,68	2*	81,99*	86400
9	125	1	83,97	2	76,04	66597	20	135	1	93,73	2*	79,36*	86400
10	128	1	85,08	2	81,32	79882	21	141	1	98,95	2*	82,46*	86400
11	128	1	85,69	2	79,44	84530	-	-	-	-	-	-	-

*Algoritma 86400 sn içerisinde optimal sonuca ulaşamadıysa durdurulmuştur.

Hacimsel kullanım oranı dikkate alındığında üç farklı palet yükleme oranına sahip problem grubunun çözüm değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını araştırmak için H_0 hipotezi test edilmiştir. ANOVA sonucu Tablo 5.5.'te verilmiştir.

H_0 : Üç farklı problem grubuna ait çözümlerin hacimsel kullanım oranları ortalaması arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.5. Üç farklı problem grubunun hacimsel kullanım oranı açısından ANOVA sonucu

Faktör Gruplar	Tip Sabit	Seviye 3	Değerler 1; 2; 3			
Hacimsel kullanım oranı için varyans analizi (düzeltilmiş kareler toplamı ile)						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Ardışık Kareler Top.	Düzeltilmiş Kareler Top.	Düzeltilmiş Ort. Kareler	F	P
Gruplar	2	128,090	128,090	64,045	9,77	0,001
Hata	18	117,976	117,976	6,554		
Toplam	20	246,057				

Tablo 5.5.'teki P değeri H_0 hipotezinin %95 güven aralığında reddedileceğini gösteriyor. Yani, ele alınan üç farklı palet yükleme oranına sahip problemin

çözümlerine ait hacimsel kullanım oranı ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. Bu sonuç bize gösteriyor ki; %70-80, %80-90 ve %90-100 arasındaki farklı palet yükleme oranlarının hacimsel kullanım oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi mevcuttur.

Çözüm zamanı dikkate alındığında ise üç farklı problem grubunun çözüm değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını araştırmak için H_0 hipotezi test edilmiştir. ANOVA sonucu Tablo 5.6.'da verilmiştir.

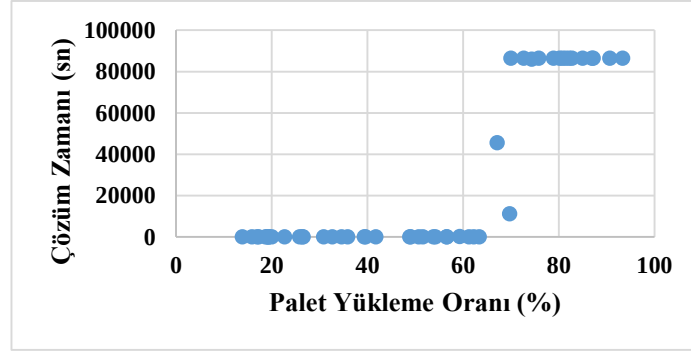
H_0 : Üç farklı problem grubuna ait çözüm zamanları ortalaması arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.6. Üç farklı problem grubunun çözüm zamanı açısından ANOVA sonucu

Faktör Gruplar	Tip Sabit	Seviye 3	Değerler 1; 2; 3			
Çözüm zamanı için varyans analizi (düzeltilmiş kareler toplamı ile)						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Ardışık Kareler Top.	Düzeltilmiş Kareler Top.	Düzeltilmiş Ort. Kareler	F	P
Gruplar	2	13111191089	13111191089	6555595544	83,28	<i>0,000</i>
Hata	18	1416867146	1416867146	78714841		
Toplam	20	14528058235				

Tablo 5.6.'daki P değeri H_0 hipotezinin %95 güven aralığında reddedileceğini gösteriyor. Yani, ele alınan üç farklı palet yükleme oranına sahip problemin çözüm zamanı ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. Bu sonuç bize gösteriyor ki; %70-80, %80-90 ve %90-100 arasındaki farklı palet yükleme oranlarının çözüm zamanı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi mevcuttur.

Palet yükleme oranı, Şekil 5.1.'de gösterilen dağılım grafiğine göre %63-70 yükleme oranı arasındaki bir noktada optimal çözüm süresini üstel olarak arttırmaktadır. Çözüm iterasyonları 86400 sn ile sınırlandırıldığı için bu noktanın üzerindeki tüm değerler üst sınırdadır.



Şekil 5.1. Palet yükleme oranına göre çözüm zamanı çizelgesi

Parametre analizlerinden elde edilen veriler ışığında optimal çözüm zamanı için problem parametrelerinin etkisi Tablo 5.7.'de özetlenmiştir.

Tablo 5.7. Problem parametrelerinin optimal çözüm zamanı üzerindeki etkisi

Problem Parametreleri	Optimal Çözüm Zamanı Üzerindeki Etkisi
Müşteri sayısı	Etkili
Nesne sayısı	Etkili
Nesne çeşitliliği	Etkisiz
Palet yükleme oranı	Etkili (Palet yükleme oranı > ~63%)

5.2. Önerilen HGA'nın Sınanması

Önerilen HGA'nın performansı Thapatsuwan ve ark. (2012) tarafından sunulan literatürdeki en güncel ve en fazla heterojenliğe sahip veri seti ile test edilmiştir. Önerilen HGA'nın nihai yükleme işlemi için literatürde var olan DASD algoritmasını kullandığından daha önce detaylı olarak bahsedilmiştir. Öncelikle önerilen HGA ile klasik DASD algoritmasının performansı karşılaştırılmıştır.

Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin veri setine göre 100 ile 6000 adet arasında yerleştirilecek nesnelerin bulunduğu farklı test problemlerinde nesnelerin enleri 70-100 cm, boyları 50-80 cm ve yükseklikleri 30-60 cm aralığında düzgün dağılıma uyacak şekildedir. Konteynerlerin (palet olarak da düşünülebilir) boyları 609,6 cm (20 ft), enleri ve yükseklikleri 243,84 cm (8 ft) olarak alınmıştır. Bu 66 test probleminin önerilen HGA ve DASD çözümleri Tablo 5.8.'de görülmektedir.

Tablo 5.8. Thapatsuwan ve ark. (2012)'nın veri setinden elde edilen test problemlerinin önerilen HGA ve DASD ile çözüm değerleri

Problem No	Nesne Sayısı	Alt Sınır (Konteyner Sayısı)	Önerilen HGA		DASD		Problem No	Nesne Sayısı	Alt Sınır (Konteyner Sayısı)	Önerilen HGA		DASD			
			Nesne Sayısı *	Konteyner Sayısı	Hacimsel Kullanım Oranı (%)	Konteyner Sayısı				Nesne Sayısı *	Konteyner Sayısı	Hacimsel Kullanım Oranı (%)	Konteyner Sayısı		
1	100	1	84	1	70	1	70	34	2750	18	2548	27	76	29	66
2	100	1	89	1	71	1	71	35	2750	19	2383	28	76	30	63
3	100	1	85	1	69	1	69	36	2750	19	2132	28	80	30	64
4	250	2	208	2	85	2	78	37	3000	21	2830	29	83	32	62
5	250	2	230	2	84	2	72	38	3000	21	2860	29	84	32	66
6	250	2	189	2	89	2	74	39	3000	21	2844	29	84	32	68
7	500	3	424	4	87	4	75	40	3250	23	2670	32	86	36	63
8	500	3	440	4	85	4	75	41	3250	23	2677	33	77	36	65
9	500	3	434	4	85	4	74	42	3250	23	2873	33	76	36	65
10	750	6	564	7	84	8	69	43	3500	24	2868	36	74	39	66
11	750	6	642	7	82	8	67	44	3500	24	2848	35	85	38	66
12	750	6	575	6	81	7	78	45	3500	25	3412	36	76	39	62
13	1000	7	800	10	85	11	72	46	3750	26	3151	38	77	40	65
14	1000	7	899	9	86	11	68	47	3750	26	3127	38	75	41	60
15	1000	7	818	10	82	11	71	48	3750	26	3047	38	75	41	60
16	1250	9	989	13	78	15	72	49	4000	28	3382	39	82	42	67
17	1250	9	939	13	78	14	79	50	4000	28	3727	39	82	42	67
18	1250	9	946	13	81	15	71	51	4000	28	3146	40	76	43	57
19	1500	11	1223	16	77	17	68	52	4250	30	3262	43	80	46	62
20	1500	11	1314	15	80	16	67	53	4250	30	3547	43	80	46	61
21	1500	11	1222	15	80	16	80	54	4250	29	4007	43	73	45	66
22	1750	13	1713	18	81	20	69	55	4500	31	3385	46	78	49	63
23	1750	13	1443	18	79	20	68	56	4500	31	4091	46	80	49	63
24	1750	12	1479	17	84	19	68	57	4500	31	4271	45	86	48	67
25	2000	14	1599	20	84	22	67	58	4750	33	3582	48	77	51	65
26	2000	14	1803	21	76	23	68	59	4750	33	4062	48	78	51	65
27	2000	14	1956	20	83	22	71	60	4750	33	4001	48	78	52	58
28	2250	16	1697	23	78	25	69	61	5000	35	4742	51	76	55	60
29	2250	16	2113	23	79	25	67	62	5000	35	4081	51	78	55	60
30	2250	16	1856	24	72	25	68	63	5000	35	4574	51	80	55	62
31	2500	18	1893	27	80	29	66	64	6000	41	4775	60	70	66	63
32	2500	18	2316	27	81	29	68	65	6000	42	4679	61	82	67	60
33	2500	18	2352	27	84	29	69	66	6000	42	4622	61	74	67	60

Önerilen HGA ve DASD algoritmasıyla elde edilen çözümlere ait konteyner sayısı ve hacimsel kullanım oranı değerleri ilişkili t testi (paired t-test) ile karşılaştırılmıştır. İki algoritma arasında konteyner sayısı ortalamaları bakımından istatistiksel olarak

anlamlı bir fark olup olmadığının belirlenebilmesi için H_0 hipotezi test edilmiştir. Test sonuçları Tablo 5.9.'daki gibidir.

H_0 : HGA ve DASD algoritmalarının çözüm değerlerine ait konteyner sayısı ortalaması arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.9. Önerilen HGA ve DASD algoritmasının çözümlerine ait konteyner sayısı değerlerinin ilişkili t testi sonuçları

	Örneklem Büyüklüğü	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama Standart Hata
HGA	66	26,85	16,87	2,08
DASD	66	29,06	18,18	2,24
Fark	66	-2,218	1,420	0,175
Ortalama fark için 95% güven aralığı: (-2,561; -1,863)				
Ortalama fark için T değeri = -12,66 P-Değeri = 0,000				

Tablo 5.9.'daki P değerine göre %95 güven aralığında H_0 hipotezi reddedilir. Yani Önerilen HGA ve DASD algoritması ile elde edilen konteyner sayısı değerleri ortalaması arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. T değeri ve güven aralığı negatif olduğu için ilk satırda yer alan HGA ile elde edilen konteyner sayısı değerlerinin DASD algoritmasıyla elde edilen değerlerden daha küçük olduğu ve dolayısıyla daha iyi çözüm verdiği söylenebilir.

İki algoritma arasında hacimsel kullanım oranı (%) ortalamaları bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığının belirlenebilmesi için H_0 hipotezi test edilmiştir. Test sonuçları Tablo 5.10.'daki gibidir.

H_0 : HGA ve DASD algoritmalarının çözüm değerlerine ait hacimsel kullanım oranı (%) ortalaması arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.10.'daki P değerine göre %95 güven aralığında H_0 hipotezi reddedilir. Yani Önerilen HGA ve DASD algoritması ile elde edilen hacimsel kullanım oranı (%) değerleri ortalaması arasında fark vardır. T değeri ve güven aralığı pozitif olduğu için ilk satırda yer alan HGA ile elde edilen hacimsel kullanım oranı (%) değerlerinin

DASD algoritmasıyla elde edilen değerlerden daha büyük olduğu ve dolayısıyla daha iyi çözüm verdiği söylenebilir.

Tablo 5.10. Önerilen HGA ve DASD algoritmasının çözümlerine ait hacimsel kullanım oranı değerlerinin ilişkili t testi sonuçları

	Örneklem Büyükliği	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama Standart Hata
HGA	66	79,606	4,509	0,555
DASD	66	67,045	5,088	0,626
Fark	66	12,561	5,547	0,683
Ortalama fark için 95% güven aralığı: 11,197; 13,924)				
Ortalama fark için T değeri = 18,39 P-Değeri = 0,000				

Thapatsuwan ve ark. (2012) çalışmalarında yapay bağışıklık sistemi (AIS) algoritmasını, PSO algoritmasını aynı veri seti üzerinde karşılaştırmış ve PSO'nun daha büyük ölçekli problemlerde daha iyi ve daha tutarlı sonuçlar verdiğini bulmuştur. Başka bir çalışmada da, Feng ve ark. (2015), Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin veri setini kullanarak ve büyük ölçekli problemler için bir HGA-L önermişlerdir. Her iki çalışmada da önerilen yöntemler, Chen ve ark. (1995)'nin çalışmasındakine benzer şekilde konteyner içerisindeki boş alanlar (m^3) açısından karşılaştırılmıştır. Önerilen HGA, Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin veri seti kullanılarak yerleştirilecek nesne sayısı 100 ile 5000 arasında değişen 21 test problemi üzerinden PSO ve HGA-L karşılaştırılmıştır. Çözüm değerleri Tablo 5.11.'de görülmektedir.

Tablo 5.11. Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin veri setinden elde edilen test problemlerinin önerilen HGA, PSO ve HGA-L ile çözüm değerleri

Nesne Sayısı	Boş Alanlar m^3			Nesne Sayısı	Boş Alanlar m^3		
	PSO	HGA-L	HGA-DASD		PSO	HGA-L	HGA-DASD
100	47,62	12,46	10,85	2750	1517,07	311,89	312,80
250	126,09	48,06	12,70	3000	1658,04	360,36	326,09
500	259,08	60,09	37,55	3250	1796,56	370,41	362,14
750	397,44	108,86	49,23	3500	1938,00	411,37	386,17
1000	536,65	118,95	96,67	3750	2075,82	431,41	435,22
1250	673,47	167,19	143,92	4000	2214,67	472,29	410,83
1500	811,63	181,43	157,08	4250	2351,93	493,95	493,60
1750	949,22	212,05	181,25	4500	2497,47	532,47	531,67
2000	1090,75	241,61	229,58	4750	2643,05	550,05	543,75
2250	1216,28	264,30	265,83	5000	2781,56	593,53	582,67
2500	1372,22	300,73	316,25	-	-	-	-

Önerilen HGA, PSO ve HGA-L algoritmalarının performansları boş alan (m^3) açısından birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Öncelikle PSO ve HGA-L algoritmalarının performanslarını karşılaştırabilmek için H_0 hipotezi test edilmiştir. Test sonuçları Tablo 5.12.'deki gibidir.

H_0 : PSO ve HGA-L algoritmalarının çözüm değerlerine ait konteyner içerisindeki boş alan (m^3) ortalamaları arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.12. PSO ve HGA-L algoritmasının çözümlerine ait konteyner içerisindeki boş alan değerlerinin ilişkili t testi sonuçları

	Örneklem Büyükliği	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama Standart Hata
PSO	21	1378,79	863,53	188,44
HGA-L	21	297,31	176,84	38,59
Fark	21	1081,48	686,93	149,9
Ortalama fark için 95% güven aralığı: (768,80; 1394,17)				
Ortalama fark için T değeri = 7,21 P-Değeri= 0,000				

Tablo 5.12.'deki P değerine göre %95 güven aralığında H_0 hipotezi reddedilir. Yani Önerilen PSO ve HGA-L algoritması ile elde edilen konteyner içerisindeki boş alan (m^3) değerleri ortalaması arasında fark vardır. T değeri ve güven aralığı pozitif olduğu için ilk satırda yer alan PSO ile elde edilen hacimsel kullanım oranı (%) değerlerinin HGA-L algoritmasıyla elde edilen değerlerden daha büyük olduğu ve dolayısıyla daha kötü çözüm verdiği söylenebilir.

PSO ve önerilen HGA algoritmalarının performanslarını karşılaştırabilmek için H_0 hipotezi test edilmiştir. Test sonuçları Tablo 5.13.'teki gibidir.

H_0 : PSO ve HGA algoritmalarının çözüm değerlerine ait konteyner içerisindeki boş alan (m^3) ortalamaları arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.13.'teki P değerine göre %95 güven aralığında H_0 hipotezi reddedilir. Yani Önerilen PSO ve HGA algoritması ile elde edilen konteyner içerisindeki boş alan (m^3) değerleri ortalaması arasında fark vardır. T değeri ve güven aralığı pozitif olduğu için

ilk satırda yer alan PSO ile elde edilen hacimsel kullanım oranı (%) değerlerinin HGA algoritmasıyla elde edilen değerlerden daha büyük olduğu ve dolayısıyla daha kötü çözüm verdiği söylenebilir.

Tablo 5.13. PSO ve önerilen HGA algoritmasının çözümlerine ait konteyner içerisindeki boş alan değerlerinin ilişkili t testi sonuçları

	Örneklem Büyükliği	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama Standart Hata
PSO	21	1378,79	863,53	188,44
HGA	21	280,28	182,97	39,93
Fark	21	1098,51	681,58	148,73
Ortalama fark için 95% güven aralığı: (788,26; 1408,76)				
T Ortalama fark için T değeri =7,39 P-Değeri = 0,000				

Son olarak HGA-L ve önerilen HGA algoritmalarının performanslarını karşılaştırmak için H_0 hipotezi test edilmiştir. Test sonuçları Tablo 5.14.'teki gibidir.

H_0 : HGA-L ve HGA algoritmalarının çözüm değerlerine ait konteyner içerisindeki boş alan (m^3) ortalamaları arasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 5.14. HGA-L ve önerilen HGA'nın çözümlerine ait konteyner içerisindeki boş alan değerlerinin ilişkili t testi sonuçları

	Örneklem Büyükliği	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama Standart Hata
HGA-L	21	297,31	176,84	38,59
HGA	21	280,28	182,97	39,93
Fark	21	17,03	20,03	4,37
Ortalama fark için 95% güven aralığı: (7,9119; 26,1462)				
T Ortalama fark için T değeri =3,90 P-Değeri = 0,001				

Tablo 5.14.'teki P değerine göre %95 güven aralığında H_0 hipotezi reddedilir. Yani Önerilen HGA-L ve HGA algoritması ile elde edilen konteyner içerisindeki boş alan (m^3) değerleri ortalaması arasında fark vardır. T değeri ve güven aralığı pozitif olduğu için ilk satırda yer alan HGA-L ile elde edilen hacimsel kullanım oranı (%) değerlerinin HGA algoritmasıyla elde edilen değerlerden daha büyük olduğu ve dolayısıyla daha kötü çözüm verdiği söylenebilir.

Sonuç olarak ele alınan Feng ve ark. (2015)'nin HGA-L algoritması, Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin PSO algoritmasından konteyner içerisindeki boş alan (m^3) değerleri açısından daha iyi çözüm sunmaktadır. Bu tezde önerilen HGA ise her iki algoritmadan daha iyi çözüm sunmaktadır. Ayrıca önerilen HGA'nın bir parçasında kullanılan DASD algoritmasından da konteyner sayısı ve hacimsel kullanım oranı (%) açısından daha iyi çözüm sunmaktadır.



BÖLÜM 6. ÖRNEK OLAY ÇALIŞMASI

Bu bölümde insani yardım faaliyetleri sürdüren bir sivil toplum kuruluşunun düzenlediği bir yardım kampanyası sonucunda Suriye'ye tırlarla taşınacak olan yardım malzemelerinin paletlere yerleştirilmesi problemi ele alınmıştır. İhtiyaç sahiplerine su, gıda, giysi ve battaniye, tıbbi malzeme ve ilaç, temizlik maddeleri, çadır, vb. gibi malzemeler taşınmak istenmektedir. Bu malzemeler ihtiyaca göre gruplanarak kolilere ayrılmıştır. Buna göre; 3 farklı boyutta aile yardım kolisi (AYK), 5 farklı boyutta tıbbi malzeme kolisi (TMK), 3 farklı boyutta çadır kolisi (ÇK), 3 farklı boyutta gıda kolisi (GK) olmak üzere 14 farklı boyuttaki kolilerden oluşan bir 3B-PYP karşımıza çıkmaktadır. Bu kolilerle ilgili detaylar Tablo 6.1.'deki gibidir.

Tablo 6.1. Taşınacak yardım malzemelerinin özellikleri

Koli No	Koli Tipi	Boyutlar (cm) (en x boy x yükseklik)	Koli Sayısı	Koli Ağırlığı (kg)	Koli Yoğunluğu (kg/cm ³)	Kontrollü Döndürme
1	AYK 1	38x30x30	300	16,6	0,00049	2-yönlü
2	AYK 2	46x40x30	170	25,2	0,00046	2-yönlü
3	AYK 3	62x60x40	84	42,7	0,00029	2- yönlü
4	TMK 1	36x28x20	24	7,6	0,00038	2-yönlü
5	TMK 2	33x30x30	16	17,2	0,00058	2-yönlü
6	TMK 3	28x40x30	84	10,1	0,00030	2- yönlü
7	TMK 4	58x38x39	32	10,8	0,00013	2- yönlü
8	TMK 5	40x40x42	18	14,2	0,00021	2- yönlü
9	ÇK 1	40x77x34	165	10	0,00010	6- yönlü
10	ÇK 2	78x112x56	9	27,3	0,00006	6- yönlü
11	ÇK 3	56x80x40	24	24,5	0,00014	6- yönlü
12	GK 1	30x20x15	30	8	0,00089	2- yönlü
13	GK 2	36x38x30	120	13,7	0,00033	2- yönlü
14	GK 3	40x30x28	120	14,5	0,00043	2- yönlü
TOPLAM			1196	20.865,7	-	-

Ele alınan problemde toplamda 1196 tane nesne standart 80x120x120 cm boyutlarındaki mümkün olan en az sayıdaki özdeş palete yerleştirilmek ve paletlerle tırlara yüklenerek yardım bölgesinde sevk edilmek istenmektedir. Örnek olay probleminde kırılgenlik kısıtının göz önüne alınması istenmemiştir ve tüm koli

tiplerinin kırılma değeri sıfır olarak alınmıştır. Hacimsel anlamda bakıldığında 1196 tane nesnenin toplam hacmi $75.094.176 \text{ cm}^3$ 'tür. Dolayısıyla da kullanılacak olan palet sayısı 66'dan daha az olamaz. Problem önerilen HGA ile çözüldüğünde ise 75 tane palet kullanılarak yükleme yapılmıştır.

AYK 1 kolisinden 300 adet sevk edilmek istenmektedir. 1 no'lu paletten 9 no'lu palete kadar olan tüm paletlere de AYK 1 kolisinden yüklenmiştir. Koliler ikili olarak birleştirilerek yerleştirilmiştir. Yani yan yana birleştirilen $38 \times 30 \times 30 \text{ cm}$ ebadındaki iki koli $76 \times 30 \times 30 \text{ cm}$ ebadındaki bir koli gibi düşünülerek paletlere yüklenmiştir. Bu 9 palet tamamen aynı şekilde yüklenmiştir ve paletlerin yerleşim bilgileri Tablo 6.2.'deki gibidir.

Tablo 6.2. 1-9 no'lu paletlerin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	38	30	30	1'	76	30	30	0	0	0	1-9
2	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
3	38	30	30	2'	76	30	30	0	30	0	1-9
4	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
5	38	30	30	3'	76	30	30	0	60	0	1-9
6	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
7	38	30	30	4'	76	30	30	0	90	0	1-9
8	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
9	38	30	30	5'	76	30	30	0	0	30	1-9
10	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
11	38	30	30	6'	76	30	30	0	30	30	1-9
12	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
13	38	30	30	7'	76	30	30	0	60	30	1-9
14	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
15	38	30	30	8'	76	30	30	0	90	30	1-9
16	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
17	38	30	30	9'	76	30	30	0	0	60	1-9
18	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
19	38	30	30	10'	76	30	30	0	30	60	1-9
20	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
21	38	30	30	11'	76	30	30	0	60	60	1-9
22	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
23	38	30	30	12'	76	30	30	0	90	60	1-9
24	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
25	38	30	30	13'	76	30	30	0	0	90	1-9
26	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
27	38	30	30	14'	76	30	30	0	30	90	1-9
28	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
29	38	30	30	15'	76	30	30	0	60	90	1-9
30	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9
31	38	30	30	16'	76	30	30	0	90	90	1-9
32	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	1-9

Geriye kalan 12 adet AYK 1 kolisi ile 10 adet AYK 2 kolisi ve 4 adet TMK 3 kolisinin yerleştiği 10 no'lu paletin yerleşim bilgileri Tablo 6.3.'teki gibidir. 38x30x30 cm ebadındaki iki tane AYK 1 kolisi yine yan yana birleştirilerek 76x30x30 cm ebadında bir koli şeklinde palete yüklenmiştir. 46x40x30 cm ebadındaki iki AYK 2 kolisi de önce arka arkaya gelecek şekilde birleştirilerek 46x80x30 cm ebadında bir koli şekline getirilmiş sonra da XY-düzleminde döndürülerek palete yerleştirilmiştir. 28x40x30 cm ebadındaki iki TMK 3 kolisi de önce arka arkaya gelecek şekilde birleştirilerek 28x80x30 cm ebadında bir koli şekline getirilmiş sonra da XY-düzleminde döndürülerek palete yerleştirilmiştir.

Tablo 6.3. 10 no'lu paletin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	38	30	30	1'	76	30	30	0	0	0	10
2	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	10
3	38	30	30	2'	76	30	30	0	30	0	10
4	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	10
5	38	30	30	3'	76	30	30	0	60	0	10
6	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	10
7	38	30	30	4'	76	30	30	0	90	0	10
8	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	10
9	38	30	30	5'	76	30	30	0	0	30	10
10	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	10
11	38	30	30	6'	76	30	30	0	30	30	10
12	38	30	30	-	-	-	-	-	-	-	10
13	46	40	30	7'	80	46	30	0	60	30	10
14	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	10
15	46	40	30	8'	80	46	30	0	0	60	10
16	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	10
17	46	40	30	9'	80	46	30	0	46	60	10
18	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	10
19	28	40	30	10'	80	28	30	0	92	60	10
20	28	40	30	-	-	-	-	-	-	-	10
21	46	40	30	11'	80	46	30	0	0	90	10
22	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	10
23	46	40	30	12'	80	46	30	0	46	90	10
24	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	10
25	28	40	30	13'	80	28	30	0	92	90	10
26	28	40	30	-	-	-	-	-	-	-	10

11 no'lu paletin içerisine de kalan AYK 2 ve TMK3 kolilerinden 10 no'lu palettekine benzer şekilde birleştirme ve döndürme işlemleri yapılarak yerleştirilmiştir. Bu palet ile birebir aynı olarak yüklenmiş 9 tane daha palet mevcuttur. Buna göre 11'den 20'ye kadar numaralandırılmış 10 paletin yerleşim bilgileri Tablo 6.4.'teki gibidir.

Tablo 6.4. 11-20 no'lu paletlerin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	46	40	30	1'	80	46	30	0	0	0	11-20
2	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
3	46	40	30	2'	80	46	30	0	46	0	11-20
4	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
5	28	40	30	3'	80	28	30	0	92	0	11-20
6	28	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
7	46	40	30	4'	80	46	30	0	0	30	11-20
8	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
9	46	40	30	5'	80	46	30	0	46	30	11-20
10	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
11	28	40	30	6'	80	28	30	0	92	30	11-20
12	28	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
13	46	40	30	7'	80	46	30	0	0	60	11-20
14	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
15	46	40	30	8'	80	46	30	0	46	60	11-20
16	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
17	28	40	30	9'	80	28	30	0	92	60	11-20
18	28	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
19	46	40	30	10'	80	46	30	0	0	90	11-20
20	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
21	46	40	30	11'	80	46	30	0	46	90	11-20
22	46	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20
23	28	40	30	12'	80	28	30	0	92	90	11-20
24	28	40	30	-	-	-	-	-	-	-	11-20

21 no'lu paletten 34 no'lu palete kadar olan tüm paletlere de AYK 3 kolisinden yüklenmiştir. 62x60x40 cm ebadındaki iki AYK 3 kolisi arka arkaya gelecek şekilde birleştirilerek paletlere yüklenmiştir. Bu 14 palet tamamen aynı şekilde yüklenmiştir ve paletlerin yerleşim bilgileri Tablo 6.5.'teki gibidir.

Tablo 6.5. 21-24 no'lu paletlerin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	62	60	40	1'	62	120	40	0	0	0	21-34
2	62	60	40	-	-	-	-	-	-	-	21-34
3	62	60	40	2'	62	120	40	0	0	40	21-34
4	62	60	40	-	-	-	-	-	-	-	21-34
5	62	60	40	3'	62	120	40	0	0	80	21-34
6	62	60	40	-	-	-	-	-	-	-	21-34

TMK 1 ve TMK 2 kolileri 35 no'lu palete yüklenmiştir. 33x30x30 cm ebadındaki iki TMK 2 kolisi ve 36x28x20 cm ebadındaki iki TMK 1 yan yana birleştirilerek palete yerleştirilmiştir ve paletlerin yerleşim bilgileri Tablo 6.6.'daki gibidir.

Tablo 6.6. 35 no'lu paletin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	33	30	30	1'	66	30	30	0	0	0	35
2	33	30	30	-	-	-	-	-	-	-	35
3	33	30	30	2'	66	30	30	0	30	0	35
4	33	30	30	-	-	-	-	-	-	-	35
5	33	30	30	3'	66	30	30	0	60	0	35
6	33	30	30	-	-	-	-	-	-	-	35
7	33	30	30	4'	66	30	30	0	90	0	35
8	33	30	30	-	-	-	-	-	-	-	35
9	33	30	30	5'	66	30	30	0	0	30	35
10	33	30	30	-	-	-	-	-	-	-	35
11	33	30	30	6'	66	30	30	0	30	30	35
12	33	30	30	-	-	-	-	-	-	-	35
13	33	30	30	7'	66	30	30	0	60	30	35
14	33	30	30	-	-	-	-	-	-	-	35
15	33	30	30	8'	66	30	30	0	90	30	35
16	33	30	30	-	-	-	-	-	-	-	35
17	36	28	20	9'	72	28	20	0	0	60	35
18	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
19	36	28	20	10'	72	28	20	0	28	60	35
20	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
21	36	28	20	11'	72	28	20	0	56	60	35
22	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
23	36	28	20	12'	72	28	20	0	84	60	35
24	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
25	36	28	20	13'	72	28	20	0	0	80	35
26	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
27	36	28	20	14'	72	28	20	0	28	80	35
28	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
29	36	28	20	15'	72	28	20	0	56	80	35
30	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
31	36	28	20	16'	72	28	20	0	84	80	35
32	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
33	36	28	20	17'	72	28	20	0	0	100	35
34	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
35	36	28	20	18'	72	28	20	0	28	100	35
36	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
37	36	28	20	19'	72	28	20	0	56	100	35
38	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35
39	36	28	20	20'	72	28	20	0	84	100	35
40	36	28	20	-	-	-	-	-	-	-	35

TMK 4 kolisinin 24 tanesi, ikisi de aynı olacak şekilde 36 ve 37 no'lu paletlere yerleştirilmiştir. 58x38x39 cm ebadındaki iki TMK 4 kolisi önce yan yana birleştirilmiş, sonra da XY-düzleminde döndürülerek paletlere yerleştirilmiştir. Paletlerin yerleşim bilgileri Tablo 6.7.'deki gibidir.

Tablo 6.7. 36-37 no'lu paletlerin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	58	38	39	1'	38	116	39	0	0	0	36-37
2	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	36-37
3	58	38	39	2'	38	116	39	38	0	0	36-37
4	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	36-37
5	58	38	39	3'	38	116	39	0	0	39	36-37
6	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	36-37
7	58	38	39	4'	38	116	39	38	0	39	36-37
8	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	36-37
9	58	38	39	5'	38	116	39	0	0	78	36-37
10	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	36-37
11	58	38	39	6'	38	116	39	38	0	78	36-37
12	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	36-37

TMK 4 kolisinin kalan 8 tanesi ve TMK 5 kolisinin 6 tanesi 38 no'lu palete yerleştirilmiştir. TMK 4 kolileri bir önceki yerleşime benzer şekilde, 40x40x42 cm ebadındaki iki TMK 5 kolisi de yan yana birleştirilerek palete yüklenmiştir ve paletin yerleşim bilgileri Tablo 6.8.'deki gibidir.

Tablo 6.8. 38 no'lu paletin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	40	40	42	1'	80	40	42	0	0	0	38
2	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	38
3	40	40	42	2'	80	40	42	0	40	0	38
4	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	38
5	40	40	42	3'	80	40	42	0	80	0	38
6	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	38
7	58	38	39	4'	38	116	39	0	0	42	38
8	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	38
9	58	38	39	5'	38	116	39	38	0	42	38
10	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	38
11	58	38	39	6'	38	116	39	0	0	81	38
12	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	38
13	58	38	39	7'	38	116	39	38	0	81	38
14	58	38	39	-	-	-	-	-	-	-	38

TMK 5 kolisinin kalan 12 tanesi ile ÇK 1 kolisinin 3 tanesi 39 no'lu palete yerleştirilmiştir. TMK 5 kolileri bir önceki yerleşime benzer şekilde, 40x77x34 cm ebadındaki ÇK 1 kolileri de XY- düzleminde döndürülerek palete yüklenmiştir ve paletin yerleşim bilgileri Tablo 6.9.'daki gibidir.

Tablo 6.9. 39 no'lu paletin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	40	40	42	1'	80	40	42	0	0	0	39
2	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	39
3	40	40	42	2'	80	40	42	0	40	0	39
4	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	39
5	40	40	42	3'	80	40	42	0	80	0	39
6	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	39
7	40	40	42	4'	80	40	42	0	0	42	39
8	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	39
9	40	40	42	5'	80	40	42	0	40	42	39
10	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	39
11	40	40	42	6'	80	40	42	0	80	42	39
12	40	40	42	-	-	-	-	-	-	-	39
13	40	77	34	7'	77	40	34	0	0	84	39
14	40	77	34	8'	77	40	34	0	40	84	39
15	40	77	34	9'	77	40	34	0	80	84	39

40 no'lu paletten 57 no'lu palete kadar olan tüm paletlere de kalan ÇK 1 kolileri bir önceki yüklemeye benzer şekilde yüklenmiştir. Bu 18 palet tamamen aynı şekilde yüklenmiştir ve paletlerin yerleşim bilgileri Tablo 6.10.'daki gibidir.

Tablo 6.10. 40-47 no'lu paletlerin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	40	77	34	1'	77	40	34	0	0	0	40-57
2	40	77	34	2'	77	40	34	0	40	0	40-57
3	40	77	34	3'	77	40	34	0	80	0	40-57
4	40	77	34	4'	77	40	34	0	0	34	40-57
5	40	77	34	5'	77	40	34	0	40	34	40-57
6	40	77	34	6'	77	40	34	0	80	34	40-57
7	40	77	34	7'	77	40	34	0	0	68	40-57
8	40	77	34	8'	77	40	34	0	40	68	40-57
9	40	77	34	9'	77	40	34	0	80	68	40-57

58 no'lu paletten 61 no'lu palete kadar olan tüm paletlere ÇK 2 kolisinden 8 tane yüklenmiştir. 78x112x56 cm ebadındaki ÇK 2 kolileri aynı şekilde herhangi bir birleştirme ya da döndürülmesi işlemi yapılmaksızın paletlere yüklenmiştir. Bu 4 palet tamamen aynı şekilde yüklenmiştir ve paletlerin yerleşim bilgileri Tablo 6.11.'deki gibidir.

Tablo 6.11. 58-61 no'lu paletlerin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	78	112	56	1'	78	112	56	0	0	0	58-61
2	78	112	56	2'	78	112	56	0	0	56	58-61

62 no'lu palete de kalan 1 tane ÇK 2 kolisi ve 2 tane ÇK 3 kolisi yüklenmiştir. ÇK 2 kolisi bir öncekine benzer şekilde, 56x80x40 cm ebadındaki iki ÇK 3kolisi de önce yan yana birleştirilerek, sonra da XY- düzleminde döndürülerek palete yerleştirilmiştir. Paletin yerleşim bilgileri Tablo 6.12.'deki gibidir.

Tablo 6.12. 62 no'lu paletin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	78	112	56	1'	78	112	56	0	0	0	62
2	56	80	40	2'	80	112	40	0	0	56	62
3	56	80	40	-	-	-	-	-	-	-	62

63 no'lu paletten 65 no'lu palete kadar olan tüm paletlere de ÇK 3 kolisinden 18 tane bir öncekine benzer şekilde yüklenmiştir. Bu üç palet tamamen aynı şekilde yüklenmiştir ve paletlerin yerleşim bilgileri Tablo 6.13.'teki gibidir.

Tablo 6.13. 63-65 no'lu paletlerin yerleşim detayları

Nesne No	En	Boy	Yükseklik	Yeni Nesne No	Duruş			Koordinatlar			Palet No
					En	Boy	Yükseklik	X	Y	Z	
1	56	80	40	1'	80	112	40	0	0	0	63-65
2	56	80	40	-	-	-	-	-	-	-	63-65
3	56	80	40	2'	80	112	40	0	0	40	63-65
4	56	80	40	-	-	-	-	-	-	-	63-65
5	56	80	40	3'	80	112	40	0	0	80	63-65
6	56	80	40	-	-	-	-	-	-	-	63-65

66 no'lu palete kalan 4 tane ÇK 3 kolisi ile tüm GK 1 kolileri yüklenmiştir. ÇK 3 kolileri bir öncekine benzer şekilde, 30x20x15 cm ebadındaki dört GK1 kolisi yan yana birleştirilerek palete yüklenmiştir. Paletin yerleşim bilgileri Tablo 6.14.'teki gibidir.

Tablo 6.15. (Devamı)

Tablo 6.16. (Devamı)

BÖLÜM 7. ÇALIŞMANIN ENDÜSTRİ 4.0'A YANSIMALARI

Son yıllarda dördüncü sanayi devrimi olarak nitelendirilen ve temelleri Almanya'da ortaya atılan Endüstri 4.0 kavramı, bize yaşamın her alanında artan dijitalleşmeye sanayi alanında da ihtiyaç duyulduğunu ve artık bunun için düğmeye basıldığını göstermektedir. Endüstri 4.0 tamamen hız, etkinlik, verimlilik, maliyet ve inovasyon odaklı üretim ve servis anlayışını sağlayabilmek için mümkün olduğunca teknoloji ile bütünleşmiş yeni bir üretim ve servis tarzını ifade etmektedir. Endüstri 4.0 ile üretim süreçlerindeki tüm bileşenlerin birbirleriyle iletişim halinde olması ve büyük verilere gerçek zamanlı olarak ulaşılması sayesinde, yeni üretim tarzının getirdiği beklentileri en iyi düzeyde karşılayacak çıktıların elde edilmesi hedeflenmektedir (Soylu, 2018).

Endüstri 4.0 kavramı teknolojik otomasyon sistemlerini, veri alışverişlerini ve farklı üretim teknolojilerini içeren genel bir kavramdır (Özsoylu, 2017). İnsan duyularının taklidi neticesinde ortaya çıkmış sensör teknolojisi, her geçen gün gelişmektedir. Bu teknolojisi vasıtasıyla çevredeki fiziksel veriler algılanarak elektronik sinyallere ve daha sonra dijital veriye dönüştürülmektedir. Endüstri 4.0 kapsamında meydana gelen dijitalleşmenin temeli bu dönüşüm neticesinde gerçekleşmektedir.

Günümüzde Endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaşması dünyada ve ülkemizde birçok alanda hızla devam etmektedir. Ülkemizde Endüstri 4.0 konusunda en çok yatırım yapan sektörlerden biri de lojistik sektörüdür. Endüstri 4.0'ın lojistik alanındaki yansıması Lojistik 4.0 kavramı ile tanımlanmaktadır. Bu kavram, tam zamanında üretim amacının, düşük maliyetle ve çevik bir şekilde gerçekleştirebilmesi için tedarik zincirinin ilk noktasındaki tedarikçiden, son noktasındaki müşteriye kadar olan tüm süreci kapsamaktadır. Verimli ve güçlü bir Lojistik 4.0, kaynak planlama, depo yönetim sistemleri, ulaştırma yönetim sistemleri, akıllı ulaştırma sistemleri ve bilgi güvenliği gibi teknolojik uygulamaları kullanmalıdır (Barreto ve ark., 2017)

Örneğin; bir müşteri bir internet platformu üzerinden sipariş verdiğinde, tedarik zincirindeki tüm paydaşlar bu siparişi gerçek zamanlı olarak yönetebilmelidir. Ürünlerin üretim sahası içerisindeki hareketleri internet platformu üzerinden diğer paydaşlardan alınan verilere göre çalışan otonom araçlarla gerçekleştirilmelidir. Böylece, depolama veya stok maliyetleri en aza indirgenecek veya tamamen ortadan kalkacaktır. Çünkü müşterilerin siparişleri ve tedarikçilerin siparişleri aynı zamanda işlenecek ve üretim için gerekli olan tüm malzemelerin teslim edilmesi için tam olarak tarih belirlenebilecektir. Ürünlerin taşındığı araçların internet platformuna göre programlanmış bir rotası bulunur. Müşteriler ve tedarikçiler GPS ile gerçek zamanlı olarak yerleri görülebilen araçların takibini yapabilir (Galindo, 2016).

Bu çalışmada odaklanılan problem, lojistik taşımacılık öncesi genel tabiriyle konteyner yükleme problemleri, ya da daha spesifik olarak 3B-PYP'dir. Bu süreç, hali hazırda birçok işletme tarafından el yordamıyla yürütülmektedir. Öncelikle siparişler kısa veya uzun vadeli stoklara üretilir. Stoklar tamamlandığında siparişlere göre elleçleme süreci başlar. Sipariş edilen ürünler depolardan ya da geçici stok alanlarından seçilerek paletlere el yordamıyla yüklenir. Yüklenen paletler genellikle streçleme makinesiyle ya da yine el işçiliğiyle streçlenir ve forkliftlerle araçlara yüklenir.

Bu süreç daha teknolojik üretim tesislerinde elleçleme operasyonundan itibaren otomatik olarak yapılabilmektedir. Yani otomatik robotlar siparişlere göre depolardan ya da geçici stok alanlarından sipariş edilen ürünleri seçerek banda alır. Bandta ilerleyen ürünler bir robot kolu vasıtasıyla paletlere yüklenir. Yüklenen paletler, streçleme makinesiyle streçlendikten sonra yine bant üzerinde yükleme noktasına getirilir ve araçlara yüklenir. Taşımacılık operasyonu öncesi paletleme ve araç yükleme süreci bu şekilde insansız, sensörlerle ve programlanmış zeki robotlarla desteklendiği sürece Lojistik 4.0 uygulamaları içerisine dâhil edilebilir.

Bu tezde de 3B-PYP için önerilen HGA, söz konusu otomatik paletleme robotları için oldukça kullanışlı olacaktır. Önerilen algoritmanın çözüm raporu, her bir nesnenin duruşu ve koordinatları ile ilgili bilgileri içerdiğinden büyük ölçekli problemlerin

çözümünde, görselleştirilse dahi anlaşılması güç olabilmektedir. Ürünleri paletlere yükleyen çalışanlar kendilerine verilen bu programın çıktısı olan yerleştirme modellerini doğru anlamak için fazladan zaman harcayacak, hatta yanlış yerleştirme yaptıklarında paleti tekrar boşaltarak düzeltmeleri gerekecektir. Çünkü yapılan en ufak hata yerleştirmenin uygun olmamasına sebep olacaktır. Elbette çalışanlar zamanla buna uyum sağlayacak ve tecrübe kazanacaktır fakat her personel değişikliğinde bu öğrenme süreci başa dönmek zorundadır.

Diğer bir taraftan önerilen algoritmanın çözüm raporu bir ara yüz yazılımı vasıtasıyla paletleme yapacak robot koluna tanıtıldığında ve hatta geriye doğru, elleçleme aşamasında bu yerleştirme modelinin bilgisi verildiğinde robot kolunun önüne yerleştireceği ürünler sıra ile gelecek, robot kolu bunları gerekirse döndürerek uygun yerlere yerleştirecek ve paleti yükleyecektir. Sistem bu şekilde çalışmaya başladıktan sonra hata, öğrenme süreci, tecrübe kazanma süreci vs. gibi durumlar tamamen ortadan kalkacak önerilen algoritma amacına tam olarak ulaşacaktır. Bu bağlamda önerilen HGA'nın, en güncel kavram olan Endüstri 4.0 ve bununla ilişkilendirilen Lojistik 4.0 ile güçlü bir ilişkisi olduğu söylenebilir.

BÖLÜM 8. SONUÇ

Lojistik alanında, taşımacılık operasyonlarında araç rotalama problemlerinden sonra en çok karşımıza çıkan problem tipleri üç boyutlu araç yükleme problemleridir. Bu problemler literatürde daha çok KYP olarak karşımıza çıkmaktadır ve temelde bir grup küçük kutunun uzayda çakışmayacak şekilde büyük bir kutuya (konteynere veya palete) en fazla hacmi dolduracak veya en fazla hacim kullanım oranını sağlayacak şekilde üç boyutlu yerleştirme modelinin (şablonunun) bulunmaya çalışıldığı çeşitli türevleri de mevcuttur.

Bu çalışmada, temelde üç boyutlu KYP'lerden biri olan ve literatürde distribütörlerin palet yükleme problemleri sınıfında yer alan 3B-PYP ele alınmıştır. Ele alınan problemde, verilen tüm nesnelerin birbirine çakıştırılmadan eksiksiz olarak yüklenmesi, yüklenen nesnelerin palet boyutlarını aşmaması ve yüklenen nesnelerin her bir ekseninin paletin bir eksenine paralel olması (ortogonal yükleme) gibi problemin doğası gereği göz önüne alınması gereken kısıtlar söz konusudur. Bu çalışmada ele alınan problemde, problemin doğası gereği göz önüne alınması gereken kısıtların yanı sıra, kontrollü döndürme kısıtı, kırılgenlik kısıtı, yüke dayanım kısıtı ve bağlantılı nesnelerin bir arada olması kısıtı dikkate alınmıştır. Dikkate alınan bu ek yükleme kısıtları, literatürde var olan kısıtların incelenmesi sonrasında yapılan saha araştırmaları sonucu, indirimli market zincirlerinin 3B-PYP'lerindeki kurallarından yola çıkılarak, literatürdeki çalışmalardan farklı kısıtlar bir arada ele alınmıştır.

3B-PYP'nin söz konusu kısıtlar altında çözümü için öncelikle bir MILP geliştirilmiştir. Problemin NP-Zor yapıda olmasından dolayı, çözülecek problemin ölçeği büyüdükçe önerilen MILP tek başına kabul edilebilir bir zamanda cevap verememiştir. Meta-sezgisel algoritma geliştirme aşamasından önce yapılan parametrik analiz sonucuna göre de müşteri sayısı, yerleştirilecek nesne sayısı ve palet

yükleme oranı ($> \sim 63\%$) arttıkça optimal çözüm zamanının arttığı tespit edilmiştir. Nesne çeşitliliğindeki artışın ise optimal çözüm zamanını etkilemediği tespit edilmiştir.

Literatürde KYP ya da 3B-PYP'lerin NP-Zor yapıda olması, çözüm için genellikle sezgisel, meta-sezgisel ya da hibrit yöntemlerin tercih edilmesine sebep olmuştur. Uygun çözüm yönteminin geliştirilmesi öncesinde yapılan parametrik analiz sonuçları da dikkate alınarak bir hibrit yöntem geliştirilmesine karar verilmiştir. Geliştirilen HGA, bir GA'nın bir yığın oluşturma yaklaşımı ve DASD sezgisel algoritması ile hibritlenmesinden oluşmuştur.

Önerilen MILP'in tüm 0-1 tam sayılı değişkenlerinin indisinde yerleştirilecek nesne sayısı parametresi yer aldığından bu parametrenin değerindeki artışlar problemin 0-1 tam sayılı değişken ve kısıt denklemleri sayılarını artıracığından optimal çözüm zamanını artıracaktır. Meta-sezgisel çözüm yönteminin geliştirilme aşamasında bu durum dikkate alınarak, bir yığın oluşturma yaklaşımının çözüm yöntemine dâhil edilmesine karar verilmiştir. Sonuç olarak yerleştirilecek nesne sayısının mümkünse yerleştirme öncesi azaltılması düşüncesinden yola çıkılarak, boyutları benzer nesnelerin yığılması ve bu yığınların birer yeni nesne olarak ele alınması fikri uygulamaya konulmuştur. Yani önerilen HGA'nın içerisinde çalışan yığın oluşturma yaklaşımının işlevi, yerleştirilecek nesnelerin sayıca azaltılması için benzer boyutlardaki nesneleri yığmaktır.

Geliştirilen yığınlama sezgiseli GA'daki kromozom uzunluklarını zaman zaman değiştirebilmektedir. Dolayısıyla farklı uzunluktaki kromozomların çaprazlanması durumu ortaya çıkmaktadır. Literatürde daha önce bu gibi durumlar için tanımlanmış bir çaprazlama operatörü mevcut değildir. Bu çalışmanın literatüre bir katkısı da, farklı uzunluktaki kromozomların çaprazlanabildiği, aynı zamanda yığın oluşturma sezgiselinin ihtiyacı olan benzer genlerin yan yana dizilmesi ihtimalinin artırmasını hedefleyen bir A-DÇO'nun geliştirilmesidir. Bu operatör, kromozom uzunluklarına bakmaksızın çaprazlanacak genleri bir kurala bağlı olarak seçer. Bu kural da temelde komşu genlerde bilgileri taşınan bir biriyle benzer boyutlara sahip olmayan nesnelerin

çaprazlanması mantığını taşımaktadır. Yani yan yana olması mümkün olduğu kadar istenmeyen genleri bir birinden ayırmaya çalışır. A-DÇO kromozom uzunluğunun aynı olduğu durumlarda da kullanılabilir. Bu da operatörün genelleştirilmesine ve yaygınlaştırılmasına olanak sağlar.

Önerilen HGA'nın içerisinde bir de Karabulut ve İncoğlu (2004) tarafından geliştirilen DASD algoritması çalışmaktadır. Geliştirilen HGA'da son olarak nesneler (tek başına veya yığınlar halinde olmak üzere) DASD algoritmasına uygun bir şekilde nihai olarak yerleştirilir. Sonuç olarak tüm nesnelerin veya yığınların, referans alınan en alt sol köşe noktalarının X-Y-Z eksenlerindeki koordinatlarının ve duruş şekillerinin (en, boy ve yükseklik değerlerinin sıralanmasına göre) elde edilmesiyle yükleme işlemi tamamlanmış olur.

Geliştirilen HGA öncelikle kendi içerisinde de kullanılan klasik DASD algoritması ile 100'den 6000 nesneye kadar farklı boyutlardaki 66 farklı veri seti kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçta kullanılan konteyner sayısı ve hacimsel kullanım oranı açılarından %95 güvenle istatistiksel olarak HGA'nın DASD'dan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yine önerilen HGA literatürdeki Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin önerdiği PSO ve Feng ve ark. (2015)'nin önerdiği HGA-L ile 100'den 5000 nesneye kadar farklı boyutlardaki 21 farklı veri seti kullanılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar mevcut çalışmalardaki amaç fonksiyonu olan konteyner içerisindeki boş alan (m^3) değerleri açısından yapılmıştır. Sonuç olarak ele alınan Feng ve ark. (2015)'nin HGA-L algoritması, Thapatsuwan ve ark. (2012)'nin PSO algoritmasından daha iyi çözüm sunduğu gözlenmiştir. Tezde önerilen HGA'nın ise her iki algoritmadan daha iyi çözüm sunduğu gözlenmiştir.

Önerilen HGA ile bir sivil toplum kuruluşunun düzenlediği bir yardım kampanyası sonucunda tırlarla taşınacak olan yardım malzemelerinin paletlere yerleştirilmesi problemi de çözülmüştür. Ek olarak, önerilen HGA'nın ileriye dönük Endüstri 4.0 kapsamında yapılacak olan otomatik paletleme projelerinde kullanımı da düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdou, G., Arghavani, J. 1997. Interactive ILP procedures for stacking optimization for the 3D palletization problem. *International Journal of Production Research*, 35(5): 1287–1304.
- Abdou, G., El-masry, M. 1999. 3D random stacking of weakly heterogeneous palletization problems. *International Journal of Production Research*, 37(7): 1505–1524.
- Abdou, G., El-Masry, M. 2000. Three-dimensional random stacking of weakly heterogeneous palletization with demand requirements and stability measures. *International Journal of Production Research*, 38(14): 3149–3163.
- Abdou, G., Yang, M. 1994. A systematic approach for the three dimensional palletization problem. *International Journal of Production Research*, 32(10): 2381-2394.
- Abdou, G., Yang, M. 1995. Multi-layer palletisation of multi-size boxes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 10(4): 292–297.
- Aka, S. H. 2017. Lojistiğin önemi ve katma değer yaratmasındaki rolü. *Deniz Ticareti, İMEAK Deniz Ticaret Odası Yayınları*, 3-5.
- Allen, S. D. 2011. *Algorithms and Data Structures for Three-Dimensional Packing*. University of Nottingham, Doktora Tezi.
- Almeida, A., Figueiredo, M. B. 2010. A particular approach for the three-dimensional packing problem with additional constraints. *Computers and Operations Research*, 37: 1968-1976.
- Araya, I., Guerrero, K., Nuñez, E. 2017. VCS: A new heuristic function for selecting boxes in the single container loading problem. *Computers and Operations Research*, 82: 27–35.
- Araya, I., Riff, M. C. 2014. A beam search approach to the container loading problem. *Computers and Operations Research*, 43(1): 100–107.
- Arghavani, J., Abdou, G. 1996. 3D volumetric pallet loading optimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11(6): 425-429.
- Bagley, J. D. 1967. *The behavior of adaptive systems which emply genetic and correlation algorithms*, University of Michigan, Doktora Tezi.
- Barreto, L., Amaral, A., Pereira, T. 2017. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13:1245-1252.

- Bischoff, E. E., Janetz, F., Ratcliff, M. S. W. 1995. Loading pallets with non-identical items. *European Journal of Operational Research*, 84(3): 681–692.
- Bischoff, E. E., Ratcliff, M. S. W. 1995a. Issues in the development of approaches to container loading. *Omega* 23: 377–390.
- Bischoff, E. E., Ratcliff, M. S. W. 1995b. Loading multiple pallets. *Journal of Operational Research Society* 46: 1322–1336.
- Bortfeldt, A., Gehring, H. 2001. A hybrid genetic algorithm for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 131: 143–161.
- Bortfeldt, A., Mack, D. 2007. A heuristic for the three-dimensional strip packing problem. *European Journal of Operational Research*, 183(3): 1267–1279.
- Bortfeldt, A., Wäscher, G. 2013. Constraints in container loading-A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, 229(1): 1–20.
- Chan, F. T. S., Bhagwat, R., Kumar, N., Tiwari, M. K., Lam, P. 2006. Development of a decision support system for air-cargo pallets loading problem: A case study. *Expert Systems with Applications*, 31(3): 472–485.
- Che, C. H., Huang, W., Lim, A., Zhu, W. 2011. The multiple container loading cost minimization problem. *European Journal of Operational Research*, 214(3): 501–511.
- Chen, C. S., Lee, S. M. Shen, Q. S. 1995. An analytical model for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 80(1): 68–79.
- Chien, C. F., Lee, C. Y., Huang, Y. C., Wu, W. T. 2009. An efficient computational procedure for determining the container-loading pattern. *Computers and Industrial Engineering*, 56(3): 965–978.
- Costa, M. da G., Captivo, M. E. 2016. Weight distribution in container loading: A case study. *International Transactions in Operational Research*, 23(1–2): 239–263.
- Dereli, T., Das, G. S. 2010a. A hybrid simulated annealing algorithm for solving multi-objective container-loading problems. *Applied Artificial Intelligence*, 24(5): 463–486.
- Dereli, T., Das, G. S. 2010b. Development of a decision support system for solving container loading problems, *Transport*, 25(2): 138–147.
- Dowsland, W. B. 1991. Three-dimensional packing—solution approaches and heuristic development. *International Journal of Production Research*, 29: 1673–1685.
- Dyckhoff, H., 1990. A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44(2):145–159.
- Eley, M., 2003. A bottleneck assignment approach to the multiple container loading problem. *Operations Research Spectrum* 25: 45–60.
- Elhedhli, S., Gzara, F., Yan, Y. F. 2017. A MIP-based slicing heuristic for three-dimensional bin packing. *Optimization Letters*, 11(8): 1547–1563.
- Faina, L. 2000. A global optimization algorithm for the three-dimensional packing problem. *European Journal of Operational Research*, 126(2): 340–354.

- Fanslau, T., Bortfeldt, A. 2009. A tree-search algorithm for solving the container loading problem. *INFORMS Journal on Computing* 22: 222–235.
- Feng, X., Moon, I., Shin, J. 2015. Hybrid genetic algorithms for the three-dimensional multiple container packing problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2–3), 451–477.
- Gonçalves, J. F., Resende, M. G. C. 2012. A parallel multi-population biased random-key genetic algorithm for a container loading problem. *Computers and Operations Research*, 39(2): 179–190.
- Gonçalves, J. F., Resende, M. G. C. 2013. A biased random key genetic algorithm for 2D and 3D bin packing problems. *International Journal of Production Economics*, 145(2): 500–510.
- Galindo, L. D. 2016. The challenges of Logistics 4.0 for the supply chain management and the information technology, Norwegian University of Science and Technology, Mechanical Engineering, Yüksek Lisans Tezi.
- He, K., Huang, W. 2010. Solving the single-container loading problem by a fast heuristic method. *Optimization Methods and Software*, 25(2): 263–277.
- He, K., Huang, W. 2011. An efficient placement heuristic for three-dimensional rectangular packing. *Computers and Operations Research*, 38: 227–233.
- Hifi, M., Negre, S., Wu, L. 2014. Hybrid greedy heuristics based on linear programming for the three-dimensional single bin-size bin packing problem. *International Transactions in Operational Research*, 21(1): 59–79.
- Huang, Y. H., Hwang, F. J. 2018. Global optimization for the three-dimensional open-dimension rectangular packing problem. *Engineering Optimization*, 50(10): 1789–1809.
- Huang, Y. H., Hwang, F. J., Lu, H. C. 2016. An effective placement method for the single container loading problem. *Computers and Industrial Engineering*, 97: 212–221.
- Huang, W., He, K. 2007. An Efficient Algorithm for Solving the Container Loading Problem. *İçinde: Combinatorics, Algorithms, Probabilistic and Experimental Methodologies*, Springer, New York, 396–407.
- Jamrus, T., Chien, C. F. 2016. Extended priority-based hybrid genetic algorithm for the less-than-container loading problem. *Computers and Industrial Engineering*, 96: 227–236.
- Junqueira, L., Morabito R. 2013. Optimization Models for the Three-dimensional Container Loading Problem with Practical Constraints. *İçinde: Modelling and Optimization in Space Engineering*, Springer, New York, 271–293.
- Junqueira, L., Morabito, R., Yamashita, D. S. 2012. Three-dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints. *Computers and Operations Research*, 39: 74–85.
- Kang, M. K., Jang, C. S., Yoon, K. S. 2010. Heuristics with a new block strategy for the single and multiple containers loading problems. *Journal of the Operational Research Society*, 61(1): 95–107.

- Kang, K., Moon, I., Wang, H. 2012. A hybrid genetic algorithm with a new packing strategy for the three-dimensional bin packing problem. *Applied Mathematics and Computation*, 219(3): 1287–1299.
- Karabulut, K., İnceoğlu, M. M. 2004. A hybrid genetic algorithm for packing in 3D with deepest bottom left with fill method. *Advances Information Systems*, İzmir, 441-450.
- Koç, İ. O. 2007. Gezgin satıcı problemi için çok popülasyonlu paralel bir genetik algoritma tasarımı, geliştirilmesi ve analizi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi FBE, Doktora Tezi.
- Lau, H. C. W., Chan, T. M., Tsui, W. T., Ho, G. T. S., Choy, K. L. 2009. An AI approach for optimizing multi-pallet loading operations. *Expert Systems with Applications*, 36: 4296–4312.
- Li, X., Zhang, K. 2015. A hybrid differential evolution algorithm for multiple container loading problem with heterogeneous containers. *Computers and Industrial Engineering*, 90: 305-313.
- Li, H-L., Tsai, J-F., Hu, N-Z. 2003. A distributed global optimization method for packing problems. *Journal of the Operational Research Society*, 54(4): 419-425.
- Lim, A., Ma, H., Qiu, C., Zhu, W. 2013. The single container loading problem with axle weight constraints. *International Journal of Production Economics*, 144(1): 358–369.
- Lim, A., Rodrigues, B., Wang, Y. 2003. A multi-faced buildup algorithm for three-dimensional packing problems. *Omega*, 31(6): 471–481.
- Lim, A., Rodrigues, B., Yang, Y. 2005. 3-D container packing heuristics. *Applied Intelligence*, 22: 125-134.
- Lin, J-L., Foote, B., Pulat, S., Chang, C-H., Cheung, J. Y. 1993. Hybrid genetic algorithm for container packing in three dimensions. 9th IEEE Conference on Artificial Intelligence for Applications, Orlando, 353–359.
- Liu, F-H. F., Hsiao, C-J. 1997. A three-dimensional pallet loading method for singlesize boxes. *Journal of the Operational Research Society* 48: 726–735.
- Liu, J., Yue, Y., Dong, Z., Maple, C., Keech, M. 2011. A novel hybrid tabu search approach to container loading. *Computers and Operations Research*, 38(4):797–807.
- Mahvash, B., Awasthi, A., Chauhan, S. 2018. A column generation-based heuristic for the three-dimensional bin packing problem with rotation. *Journal of the Operational Research Society*, 69(1): 78–90.
- Martello, S., Pisinger, D., Vigo, D. 2000. The three-dimensional bin packing problem. *Operations Research*, 48(2): 256-267.
- Mitchell, M. 1999. *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press.
- Moon, I., Nguyen, T. V. L. 2014. Container packing problem with balance constraints. *OR Spectrum*, 36(4): 837–878.
- Özsoylu, A. F. 2017. Endüstri 4.0, Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi, 21(1): 41-64.

- Paquay, C., Limbourg, S., Schyns, M. 2018. A tailored two-phase constructive heuristic for the three-dimensional Multiple Bin Size Bin Packing Problem with transportation constraints. *European Journal of Operational Research*, 267(1): 52–64.
- Paquay, C., Schyns, M., Limbourg, S. 2016. A mixed integer programming formulation for the three-dimensional bin packing problem deriving from an air cargo application. *International Transactions in Operational Research*, 23: 187–213.
- Parreño, F., Alvarez-Valdes, R., Oliveira, J. F., Tamarit, J. M. 2010. Neighborhood structures for the container loading problem: a VNS implementation. *Journal of Heuristics*, 16: 1–22.
- Parreño, F., Alvarez-Valdez, R., Tamarit, J. M., Oliveira, J. F. 2008. A maximal-space algorithm for the container loading problem. *INFORMS Journal on Computing* 20: 412–422.
- Peng, Y., Zhang, D., Chin, F. Y. L. 2009. A hybrid simulated annealing algorithm for container loading problem. *GEC'09-Proceedings of the First ACM/SIGEVO Summit on Genetic and Evolutionary Computation*, Shanghai, 919–928.
- Pimpawat, C., Chaiyaratana, N. 2001. Using a co-operative co-evolutionary genetic algorithm to solve a three-dimensional container loading problem. *Congress on Evolutionary Computation*, Seoul, 1197–1204.
- Pisinger, D. 2002. Heuristics for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 141: 382–392.
- Piyachayawat, T., Mungwattana, A. 2017. A hybrid algorithm application for the multi-size pallet loading problem case study: Lamp and lighting factory. *4th International Conference on Industrial Engineering and Applications*, Nagoya, 100–105.
- Ramos, A. G., Oliveira, J. F., Gonçalves, J. F., Lopes, M. P. 2016a. A container loading algorithm with static mechanical equilibrium stability constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 91: 565–581.
- Ramos, A. G., Oliveira, J. F., Lopes, M. P. 2016b. A physical packing sequence algorithm for the container loading problem with static mechanical equilibrium conditions. *International Transactions in Operational Research*, 23(1–2): 215–238.
- Ren, J., Tian, Y., Sawaragi, T. 2011. A tree search method for the container loading problem with shipment priority. *European Journal of Operational Research*, 214: 526–535.
- Sheng, L., Hongxia, Z., Xisong, D., Changjian, C. 2016. A heuristic algorithm for container loading of pallets with infill boxes. *European Journal of Operational Research*, 252(3): 728–736.
- Sheng, L., Wei, T., Zhiyuan, X., Xiwei, L. 2014. A tree search algorithm for the container loading problem. *Computers and Industrial Engineering*, 75(1): 20–30.

- Sheng, L., Xiuqin, S., Changjian, C., Hongxia, Z., Dayong, S., Feiyue, W. 2017. Heuristic algorithm for the container loading problem with multiple constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 108: 149–164.
- Silva, E., Oliveira, J. F., Wäscher, G. 2016. The pallet loading problem: A review of solution methods and computational experiments. *International Transactions in Operational Research*, 23(1–2): 147–172.
- Sivenandam, S. N., Deepa, S. N. 2008. *Introduction to Genetic Algorithms*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Sorensen, T., Foged, S., Gravers, J. M., Janardhanan, M. N., Nielsen, P. 2016. Input Analysis of the Distributor's Pallet Loading Problem. İçinde: *Distributed Computing and Artificial Intelligence*, 13th International Conference, Springer, İsviçre, 545–554.
- Soylu, A. 2018. Endüstri 4.0 ve girişimcilikte yeni yaklaşımlar, *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 32: 43-57.
- Tang, X. 2004. *Genetic Algorithms with Application to Engineering Optimization*, The University of Memphis, Doktora Tezi.
- Terno, J., Scheithauer, G., Sommerweiß, U., Riehme, J. 2000. An efficient approach for the multi-pallet loading problem. *European Journal of Operational Research*, 123(2): 372–381.
- Thapatsuwan, P., Pongcharoen, P., Hicks, C., Chainate, W. 2012. Development of a stochastic optimisation tool for solving the multiple container packing problems. *International Journal of Production Economics*, 140: 737-748.
- Toffolo, T. A. M., Esprit, E., Wauters, T., Vanden Berghe, G. 2017. A two-dimensional heuristic decomposition approach to a three-dimensional multiple container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 257(2): 526–538.
- Trivella, A. and Pisinger, D. 2016. The load-balanced multi-dimensional bin-packing problem. *Computers and Operations Research*, 74: 152-164.
- Wang, N., Lim, A., Zhu, W. 2013. A multi-round partial beam search approach for the single container loading problem with shipment priority. *International Journal of Production Economics*, 145(2):531–540.
- Wäscher, G., Haußner, H., Schumann, H. 2007. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(3): 1109–1130.
- Wei, L., Oon, W. C., Zhu, W., Lim, A. 2012. A reference length approach for the 3D strip packing problem. *European Journal of Operational Research*, 220(1): 37–47.
- Wei, L., Zhu, W., Lim, A. 2015. A goal-driven prototype column generation strategy for the multiple container loading cost minimization problem. *European Journal of Operational Research*, 241(1): 39–49.
- Wu, Y., Li, W., Goh, M., de Souza, R. 2010. Three-dimensional bin packing problem with variable bin height. *European Journal of Operational Research*, 202(2): 347–355.

- Yeung, L. H. W., Tang, W. K. S. 2005. A hybrid genetic approach for container loading in logistics industry. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(2): 617–627.
- Zhang, D., Peng, Y., Leung, S. C. H. 2012. A heuristic block-loading algorithm based on multi-layer search for the container loading problem. *Computers and Operations Research*, 39(10): 2267–2276.
- Zhao, X., Bennell, J. A., Bektaş, T., Dowsland, K. 2016. A comparative review of 3D container loading algorithms. *International Transactions in Operational Research*, 23(1–2): 287–320.
- Zheng, J. N., Chien, C. F., Gen, M. 2015. Multi-objective multi-population biased random-key genetic algorithm for the 3-D container loading problem. *Computers and Industrial Engineering*, 89: 80–87.
- Zhu, W., Huang, W., Lim, A. 2012. A prototype column generation strategy for the multiple container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 223(1): 27–39.
- Zhu, W., Lim, A. 2012. A new iterative-doubling Greedy-Lookahead algorithm for the single container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 222(3): 408–417.
- Zúñiga, C., Ángel Piera, M., Narciso, M. 2011. Revisiting the pallet loading problem using a discrete event system approach to minimise logistic costs. *International Journal of Production Research*, 49(8): 2243–2264.

EKLER

EK 1: Literatür Araştırmasının Özeti

Kaynak araştırması bölümünde detaylı olarak anlatılan çalışmalar, kronolojik olarak sıralanarak problem türüne, nesne şekline, kontrollü döndürme, ağırlık, yük dağılımı, denge, destek kısıtları ve diğer kısıtlara göre değerlendirilip, çözüm yöntemleriyle birlikte Tablo Ek 1.1.'de gösterilmektedir. Tabloda kullanılan kısaltmaların açıklamaları şu şekildedir:

TKYP: Tekli konteyner yükleme problemi

KP: Kutulama problemi

ÇKYP: Çoklu konteyner yükleme problemi

DKKYP: Düşük kullanımlı konteyner yükleme problemi

PYP: Palet yükleme problemi

ABKYP: Açık boyutlu konteyner yükleme problemi

ŞYP: Şerit yükleme problemi

ABPYP: Açık boyutlu palet yükleme problemi

D: Dikdörtgensel

KPY: Kesik paralel yüzlü

LP: Lineer programlama

NLP: Nonlineer programlama

S: Sezgisel

M-S: Meta-sezgisel

O: Opsiyonel

Tablo Ek-1.1. (Devamı)

Kaynak Çalışma	Problem Türü	Nesne Şekli	Kısıtlar							Diğer Kısıtlar	Çözüm Yöntemleri			
			Kontrollü Döndürme	Maksimum Ağırlık	Yük Dengesi	Denge	Destek	Yüke Dayanım	Yükleme Önceliği		LP / ILP / MILP / NLP	Sezgisel	Meta-Sezgisel	Hibrit
Zheng ve ark., 2015	TKYP	D											X	
Costa ve Captivo, 2016	KP	D	X	X	X							X		
Jamrus ve Chien, 2016	DKKYP	D				X		X	X					X
Huang ve ark., 2016	ŞYP	D								-Bağılantılı nesneler	MILP	X		
Paquay ve ark., 2016	ÇKYP	KPY			X	X				-Kırılganlık	MILP			
Ramos ve ark., 2016a	TKYP	D				X								X
Ramos ve ark., 2016b	TKYP	D				X			X			X		
Sheng ve ark., 2016	PYP	D								-Kalan boşluklara yerleştirme		X		
Trivella ve Pisinger, 2016	KP	D			X						MILP	X		
Araya ve ark., 2017	TKYP	D	X			X						X		
Elhedhli ve ark., 2017	ABPYP	D					X				MILP	X		
Piyachayawat ve Mungwattana, 2017	PYP	D											X	
Sheng ve ark., 2017	TKYP	D							X	-Bağılantılı Nesneler		X		
Toffolo ve ark., 2017	ÇKYP	D	X									X		
Huang ve Hwang, 2018	ABKYP	D									MILP			
Mahvash ve ark., 2018	KP	D									MILP	X		
Paquay ve ark., 2018	ÇKYP	KPY	X	X	X		X					X		

ÖZGEÇMİŞ

Sena KIR, 08.12.1987 yılında Üsküdar'da doğmuştur. İlköğrenimini Fatih Gazi İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini Vefa Lisesi'nde tamamlamıştır. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden bölüm üçüncüsü olarak lisans derecesi, 2011 yılında da İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı'ndan yüksek lisans derecesi almıştır. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora eğitimine başlamıştır. 2010 yılından beri de Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.