KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

PRATİK KISITLI KUTU PAKETLEME PROBLEMİNİN UÇ NOKTALAR TEMELLİ VE KRİTER AĞIRLIKLI ÇÖZÜMÜ İÇİN SEZGİSEL MODEL ÖNERİSİ

ÖMER UNER

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

PRATİK KISITLI KUTU PAKETLEME PROBLEMİNİN UÇ NOKTALAR TEMELLİ VE KRİTER AĞIRLIKLI ÇÖZÜMÜ İÇİN SEZGİSEL MODEL ÖNERİSİ

ÖMER UNER

Prof. Dr. Zerrin ALADAĞ		
Danışman,	**Kocaeli Üniv.**	.....
Prof. Dr. Coşkun ÖZKAN		
Jüri Üyesi,	**Yıldız Teknik Üniv.**	.....
Prof. Dr. Ayhan DEMİRİZ		
Jüri Üyesi,	**Gebze Teknik Üniv.**	.....
Dr. Öğr. Üyesi Atakan ALKAN		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniv.**	.....
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet CİHAN		
Jüri Üyesi,	**Düzce Üniv.**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 04.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Üç boyutlu kutu paketleme problemi çözümü için günümüze kadar bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar teorik kutu paketleme probleminin yanında bazı pratik kısıtları da kapsamaktadır. Ancak problem bir ekipmana yükleme yaparak ürün veya yarı mamulleri bir yerden diğer bir yere taşımaya dönüştüğünde bir çok pratik kısıtın eş zamanlı sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada tedarik zinciri ve lojistik tecrübesi teorik bilgi ve çalışmalarla birleştirilerek üç boyutlu ekipman yükleme problemi için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Yapılan çalışma ile ekipman içine sığma, yüklenen kutuların birbiri ile çakışmaması, tüm kutuların her hangi bir ekipmana yüklenmesi gibi teorik çalışmaların da sağladığı kısıtların yanında, düşey sabitlik, kutu yük dayanımı, istifleme, toplam ağırlık limiti ve aks ağırlık limiti gibi pratik kısıtlar da kapsanacak şekilde bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem temel olarak beş aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada kutular yüzey alanı ve yüksekliklerine göre sınıflandırılır ve sıralanır. İkinci aşamada sıralı kutuların yük dayanımlarına göre gerekiyorsa sıra değişiklikleri yapılarak dayanıklı ve dayanıksız kutular dengeli dağıtılır. Üçüncü aşamada her kutu bir ekipmana ön atama ile atanır ve ekipmanlar arasında gerekiyorsa hacim veya ağırlık dengelemesi yapılır. Dördüncü aşamada kutuların kısıtlara göre yüklenebileceği noktaların tespiti yapılır. Beşinci aşamada kutuların yüklenebileceği noktalardaki amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır ve en iyi amaç fonksiyonu değerini veren kutu o değeri verdiği noktaya yüklenir. Tüm kutular yükleninceye kadar bu sürece devam edilir.

Çalışma ürün veya yarı mamul taşıyan tüm firmalar için bir referans olacaktır. Özellikle aks ağırlık limiti ile ilgili yapılan çalışmaların azlığı sebebiyle karayolu ile temas eden tüm firmalar bu çalışmadan yararlanabilir veya ilham alabilir.

Çalışmayı tamamlamamda bana danışmanlıktan daha fazlasını sağlamış olan ve her zaman güçlü desteğini hissettiğim değerli hocam Prof. Dr. Zerrin ALADAĞ'a, çalışmaya yön veren ve tamamlanmasında beni cesaretlendiren değerli hocam Prof. Dr. Coşkun Özkan'a, çalışma süresince görüş ve yorumlarıyla ilham veren değerli hocam Prof. Dr. Ayhan Demiriz'e ve destekleri için Dr. Öğretim Üyesi Ahmet Cihan'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle çalışmanın son yılında her konuda bana destek ve anlayışlarını esirgemeyen sevgili eşim Aysun UNER, oğlum Kaan Mirza UNER ve annem Fatma UNER'e en içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak da her kararımda beni destekleyen ve elinden gelenin en iyisini her koşulda sağlayan babam Mehmet Kamil UNER'e kazandırdığı her şey için sonsuz teşekkürlerimi sunar huzur içinde uyumasını dilerim.

Haziran - 2019 Ömer UNER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
TABLOLAR DİZİNİ iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ v
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. ÜÇ BOYUTLU KUTU PAKETLEME PROBLEMİ 3
1.1. Kutu Paketleme Problemlerinin Sınıflandırılması 3
1.1.1. Girdi en küçükleme problemleri 5
1.1.2. Çıktı en büyükleme problemleri 5
1.2. Üç Boyutlu Kutu Paketleme Probleminde Kısıtlar 8
1.3. Üç Boyutlu Çoklu Ekipman Paketleme Problemi (3D-MCPP) 11
1.3.1. Çoklu ekipman paketlemede ekipman açma yöntemleri 12
1.3.2. Çoklu ekipman paketlemede cisim sıralama yöntemleri 13
1.3.3. Çoklu ekipman paketleme probleminde cisim yerleştirme 14
1.4. Uç Noktalar Temelli Yapıcı Sezgisel Yöntem 18
1.5. Kutu Paketleme Problemi için Yapılmış Önceki Çalışmalar 28
2. PRATİK KISITLI, UÇ NOKTALAR TEMELLİ YÜKLEME ALGORİTMASI 36
2.1. Önerilen Yöntemde Problem Kısıtları 36
2.2. Problem Girdileri 41
2.3. Yeni Kısıtlarla Birlikte Yüklenecek Kutuların Sıralanması 44
2.4. Dayanım Dengeleme 44
2.5. Hacim ve Ağırlığın Dengelenmesi 46
2.5.1. Ağırlık dengeleme 48
2.5.2. Hacim dengeleme 53
2.6. Ekipman Açma Stratejisi 56
2.7. Yüklenecek Kutu-Uç Nokta Seçimi için Amaç Fonksiyonu 56
2.8. Kutuların Yükleme Noktalarına Atanması 59
3. MODELİN TEST EDİLMESİ 61
3.1. Verilerin Analizi 61
3.2. Örneklerin Belirlenmesi 61
3.3. Modelin Bilgisayar Ortamına Aktarılması 64
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 68
4.1. Sonuçların Analizi 68
4.2. Öneriler 76
KAYNAKLAR 77
EKLER 82
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 109
ÖZGEÇMİŞ 110

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kutu paketleme problemi çözüm örneği.....15
Şekil 1.2. İki boyutlu yüklemede köşe noktalar gösterimi.....19
Şekil 1.3. Üç boyutlu yüklemede köşe noktalar gösterimi.....19
Şekil 1.4. Köşe noktalar yönteminde yükleme verimsizliği.....20
Şekil 1.5. İki-boyutlu ve üç-boyutlu paketlemelerde uç noktalar.....20
Şekil 1.6. Üç boyutlu paket uç nokta gösterimi.....21
Şekil 1.7. İlk durumdaki artık alan.....25
Şekil 1.8. Kutu yüklendikten sonraki artık alan.....26
Şekil 2.1. Dayanım dengeleme algoritması.....45
Şekil 2.2. Ağırlık ve hacmin eş zamanlı en iyilenmesi.....47
Şekil 2.3. En az ekipman sayısı ve hacim/ağırlık dengeleme seçimi.....48
Şekil 2.4. Aks grubu yoğunluk sınıflarının belirlenmesi.....50
Şekil 2.5. Ağırlık dengeleme algoritması.....52
Şekil 2.6. Hacim dengeleme algoritması.....55
Şekil 3.1. Önerilen yöntemin genel akış algoritması.....65

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Girdi en küçükleme problem tipleri.....7
Tablo 1.2. Çıktı en büyükleme problem tipleri.....7
Tablo 2.1. Aks grubu yoğunluk sınıfları.....42
Tablo 2.2. Kutu dayanımları tablosu.....43
Tablo 2.3. Aks grubu ağırlık ve yoğunluk limitleri.....49
Tablo 3.1. Yükleme verileri analizi.....62
Tablo 3.2. Yükleme ağırlık ve hacim kombinasyon sıklıkları.....62
Tablo 3.3. Problem türlerinin sıklığı ve alınacak örnek adedi..... 63
Tablo 3.4. Yükleme problemleri ağırlık ve hacim bilgileri.....64
Tablo 3.5. En iyi çözüm kombinasyonları.....66
Tablo 3.6. En iyi çözümden bir kesit.....67
Tablo 4.1. Birinci ekipman yükleme verim artışı.....68
Tablo 4.2. 32 probleme ait birinci ekipman kullanım oranları.....69
Tablo 4.3. Birinci problem çözümünde AGYS'na atanan ağırlıklar.....70
Tablo 4.4. Birinci problem çözümünün 2. ekipmanında yüklemeye müsait kapasite.....70
Tablo 4.5. 32 problemin çözüm sonucu ekipman sayısı, Y ekseni uzantısı, toplam ağırlık, toplam hacim ve amaç fonksiyonu kriter ağırlıkları.....72
Tablo 4.6. Önerilen yöntemle ikinci ekipmanda kazanılan yükleme kapasitesi.....73
Tablo 4.7. İkinci ekipmanda önerilen kazanç istatistikleri.....73
Tablo 4.8. Önerilen yöntemle sağlanan toplam kazanç %'si 74
Tablo 4.9. Sağlanan toplam kazanç istatistikleri.....74
Tablo 4.10. Önerilen çözümde AGYS'larına atanan ağırlıklar.....75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

D	: Yükleme Yapılan Ekipmanın Derinlik Ölçüsü, (cm)
W	: Yükleme Yapılan Ekipmanın Genişlik Ölçüsü, (cm)
H	: Yükleme Yapılan Ekipmanın Yükseklik Ölçüsü, (cm)
D_i	: İ. Küçük Cismin Derinlik Ölçüsü, (cm)
W_i	: İ. Küçük Cismin Genişlik Ölçüsü, (cm)
H_i	: İ. Küçük Cismin Yükseklik Ölçüsü, (cm)
X_e	: E Noktasının X Eksenindeki Koordinatı, (cm)
Y_e	: E Noktasının Y Eksenindeki Koordinatı, (cm)
Z_e	: E Noktasının Z Eksenindeki Koordinatı, (cm)
Δ	: Değeri 1 İle 100 Arasında Değişen Sınıflandırma Katsayısı
Aj, Δ	: Δ Aralığında J. Sınıflandırılmış Alan-Yükseklik Sınıfı, (cm^2)
Hj, Δ	: Δ Aralığında J. Sınıflandırılmış Yükseklik-Alan Sınıfı, (cm)
Fb	: Yüklenecek Kutu Seçimi İçin Amaç Fonksiyonu Değeri, (Birim)
W_{MP}	: Ekipman Genişliği Boyunca Yüklenmiş Kutuların Dış Çerçevesi, (cm)
D_{MP}	: Ekipman Derinliği Boyunca Yüklenmiş Kutuların Dış Çerçevesi, (cm)
C	: Ceza Maliyeti, (Birim)
RS	: İlgili Uç Noktanın Etrafındaki Yüklemeye Müsait Uzaklık, (cm)
Rse,Y	: E Noktasının Y Eksenindeki Yüklemeye Müsait Boşluğu, (cm)
Rse,X	: E Noktasının X Eksenindeki Yüklemeye Müsait Boşluğu, (cm)
Rse,Z	: E Noktasının Z Eksenindeki Yüklemeye Müsait Boşluğu, (cm)
G	: Kutu Ağırlığı, (kg)
G_{gr}	: Aks Grubuna Yüklenmiş Olan Ağırlık, (kg)
V_i	: İ. Kutunun Hacmi, (cm^3)
Gg	: Aks Grubu Toplam Ağırlık Limiti, (kg)
D_g	: Aks Grubu Y Ekseni Uzunluk Miktarı, (cm)
G	: Ekipman Toplam Ağırlık Limiti, (kg)
V	: Ekipman Toplam Ağırlık Limiti, (cm^3)
G_v	: Aks Grubu Yoğunluk Sınıfı Hacim Limiti, (cm^3)
Y_g	: Aks Grubu Ortalama Yoğunluğu, (kg/cm^3)
P_i	: i. Kutunun Altındaki Kutuya Uyguladığı Birim Basınç, (kg/cm^2)
B_{sk}	: Alt Destekleyen Kutunun Basınç Dayanımı, (kg/cm^2)
G_{gr}	: Aks Grubuna Yüklenmiş Olan Kutuların Toplam Ağırlığı, (kg)
V_{gr}	: Aks Grubuna Yüklenmiş Olan Kutulrın Toplam Hacmi, (cm^3)
Ep_y	: Yüklenecek Uç Noktanın Y Eksenindeki Değeri, (cm)
Gy	: Yükleme Yapılan Aks Grubunun Y Eksenindeki Başlangıç Değeri, (cm)
Lb_g	: Yükelenecek Kutuların Toplam Ağırlığının Ekipman Ağırlık Limitine Oranı, (Birim)
Lb_v	: Yükelenecek Kutuların Toplam Hacminin Ekipman Hacim Limitine Oranı, (Birim)
C_{LB}	: En Küçük Ekipman Sayısı, (Adet)
N	: Yüklenecek Kutular
S	: Problem Çözümü
S_k	: Kutunun Altını Destekeleyen Kutular

YA : Yüzey Alanı, (cm^2)
DK : Değerlendirilecek Kutular
Ff : İlk Kutu Seçimi İçin Amaç Fonksiyonu
Den_i : I Kutusunun Yoğunluğu, (kg/cm^3)

Kısaltmalar

1D : 1-Dimensional (1-Boyutlu)
2D : 2-Dimensional (2-Boyutlu)
3D : 3-Dimensional (3-Boyutlu)
3D-EPL : 3-Dimensional Extreme Point List (Üç Boyutlu Uç Noktalar Listesi)
3D-MCPP : 3-Dimensional Multiple Container Packing Problem (Üç Boyutlu Çoklu Konteyner Yükleme Problemi)
AGYS : Aks Grubu Yoğunluk Sınıfı
AK : Ağır Kutu
AKL : Alt Kutu Listesi
BFD : Best Fit Decreasing (En İyi Yerleşen Azalan)
BPP : Bin Packing Problem (Kutu Paketleme Problemi)
C-EPBFD : Composite-Extreme Point Best Fit Decreasing (Karma-Uç Noktalara En İyi Yerleşen/Azalan)
CP : Corner Points (Köşe Noktalar)
DYE : Düşük Yoğunluklu Ekipman
E1 : Ekipman 1
E2 : Ekipman 2
EP-BFD : Extreme Point Best Fit Decreasing (Uç Noktalar- En İyi Yerleşen /Azalan)
EP-FFD : Extreme Point First Fit Decreasing (Uç Noktalar- İlk Yerleşen/Azalan)
FFD : First Fit Decreasing (İlk Yerleşen Azalan)
GA : Genetic Algorithms (Genetik Algoritma)
GLS : Guided Local Search (Kılavuzlu Yerel Arama)
GRASP : Greedy Random Adaptive Search Procedure (Açgözlü Tesadüfi Adaptif Arama Prosedürü)
HK : Hafif Kutu
IG : Interval Graph (Aralıklı Ağ)
IIPP : Identical Item Packing Problem (Eş Cisim Paketleme Problemi)
İSUP : İlk Sıraya Uyum Prensibi
LB : Lower Bound (Alt Sınır)
LDB : Layer Determined Box (Katman Belirleyen Kutu)
MBPP : Multiple Bin Packing Problem (Çoklu Kutu Paketleme Problemi)
MBSBPP : Multiple Bin Size Bin Packing Problem (Çoklu Kutu Boyutlu Kutu Paketleme Problemi)
ME : Müsait Ekipman
MIKP : Multiple Identical Knapsack Problem (Çoklu Eş Sırt Çantası Problemi)
MILOPP : Multiple Identical Large Object Packing Problem (Çoklu Eş Boyutlu Büyük Nesne Yerleştirme Problemi)
MHKP : Multiple Heterogeneus Knapsack Problem (Çoklu Heterojen Sırt Çantası Problemi)
MHLOPP : Multiple Heterogeneus Large Object Packing Problem (Çoklu

	Heterojen Boyutlu Büyük Nesnelere Yerleştirme Problemi)
MSSCSP	: Multiple Stock Size Cutting Stock Problem (Çoklu Stok Boyutlu Stok Kesme Problemi)
NP-Zor	: Polinomiyal Olmayan Zamanda Çözülebilen Zor
ODP	: Open Dimension Problem (Açık Boyut Problemi)
PT	: Problem Türü
RBPP	: Residual Bin Packing Problem (Artık Kutu Paketleme Problemi)
RCSP	: Residual Cutting Stock Problem (Artık Stok Kesme Kesme Problemi)
SA	: Simulated Annealing (Benzetilmiş Tavlamam Algoritması)
SAGY	: Sıralanmış Aks Grubu Ortalama Yoğunlukları
SBPP	: Single Bin Packing Problem (Tek Kutu Paketleme Problemi)
SBSBPP	: Tek Kutu Boyutlu Kutu Paketleme Problemi
SKP	: Single Knapsack Problem (Tek Sırt Çantası Problemi)
SLOPP	: Single Large Object Packing Problem (Tek Büyük Nesne Yerleştirme Problemi)
SSSCSP	: Single Stock Size Cutting Stock Problem (Tek Stok Boyutlu Stok Kesme Problemi)
TS	: Tabu Search (Tabu Arama)
VNS	: Variable Neigbourhood Search (Değişken Komşuluklu Arama)
YE	: Yoğun Ekipman
YYE	: Yüksek Yoğunluklu Ekipman

PRATİK KISITLI KUTU PAKETLEME PROBLEMİNİN UÇ NOKTALAR TEMELLİ VE KRİTER AĞIRLIKLI ÇÖZÜMÜ İÇİN SEZGİSEL MODEL ÖNERİSİ

ÖZET

Üretim birimleri ve müşterilerin ihtiyaç duydukları malzemelerin verimli taşınması bu işletmelere önemli bir maliyet ve dolayısıyla rekabet avantajı sağlar. Hem ekonomik hem de çevresel sebeplerle işletmeler yükledikleri ekipmanların içinde mümkün olduğu kadar az boşluk bırakmaya çalışırlar. Böylece daha az ekipmanla daha çok ürün veya malzeme taşıyarak maliyet ve taşımanın çevresel etkilerini azaltmayı amaçlarlar. Yüklemeyi maksimum verimle yaparken uyulması gereken bazı kanuni veya fiziksel kısıtlar vardır. Bu çalışmada; uç noktalar temelli bir algoritma yardımıyla üç boyutlu kutu paketleme problemi taşıma problemlerinde göz önüne alınması gereken bir çok pratik kısıt ile çözülmüştür. Geliştirilen yöntem ile ekipman toplam hacim kısıtı, ekipman toplam ağırlık kısıtı, istiflenebilme kısıtı, kutu yük dayanımı kısıtı, ekipman aks ğırlık kısıtı ve yüklenen kutuların dikey sabitlik kısıtları sağlanabilmektedir. Geliştirilen algoritma daha önce yapılmış gerçek yükleme verileri kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar önerilen yöntemin yapılmış olan yüklemelerden daha verimli çözümler ürettiğini göstermiştir. Ayrıca gerçek yüklemeler aks ağırlığı ve kutu dayanımı kısıtlarını garanti edemezken algoritma ile üretilen çözüm tüm kısıtları garanti edebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Aks Ağırlık Limiti, Çoklu Ekipman Yükleme, Uç Noktalar, Üç Boyutlu Kutu Paketleme, Yük Dayanımı.

AN EXTREME POINTS BASED HEURISTIC MODEL PROPOSAL FOR BIN PACKING PROBLEM WITH PRACTICAL LOADING CONSTRAINTS

ABSTRACT

Efficient and effective transportation of goods not only provides cost reduction in manufacturing but also generates a competitive advantage feature for organizations. Manufacturers mainly try to load the quipments such as containers, trailers etc. as much as utulized due to environmental and economical reasons. So they aim to reduce the freight cost and pollution via more effective but fewer transportation. However, there are some constraints to reach the maximum capacity usage such as physical limitations, local or international regulations. In this research, three dimensional bin packing problem solved via an extreme point based method under many practical transportation constraints. This method has been developed to overcome the constraints such as overall equipment mass volume, equipment total weight limit, stackability in transportation, load bearing of packaging, axle weight limit and vertical standing ability. The research has been tested on the actual figures of previous loading exercises, and analyses. The result of the tests has clearly shown that the new developed algorithm generates more effective outcome. Morover the existing models cannot warrant to comply with the axle weight limit and the durability of the boxes, whereas this new proposed model takes all of the limitations in the consideration and guarantees the proper solution.

Keywords: Axle Weight Limit, Multiple Container Loading, Extreme Points, Three Dimensional Bin Packing, Load Bearing.

GİRİŞ

Mamül ve yarı mamüllerin dağıtımı ekonomi üzerinde büyük bir öneme sahiptir. Modern ekonomi çok uluslu şirketlerin büyük miktarda mamul ve yarı mamülleri kıtalar arası taşıması sayesinde sürüdürülmektedir. Üretim birimleri ve müşterilerin ihtiyaç duydukları malzemelerin etkin bir verimlilikle taşınması bu işletmelere önemli bir maliyet ve dolayısıyla rekabet avantajı sağlar. Bu sebeple işletmeler yükledikleri ekipmanlara mümkün olduğu kadar çok yük sığdırmaya ve içinde minimum boşluk bırakmaya çalışırlar. Böylece daha az ekipmanla daha çok ürün veya malzeme taşıyarak maliyet azaltmayı amaçlarlar. Bununla birlikte taşıma ekipmanlarının trafikte oluşturdukları yoğunluk ve çevresel kirliliğe olan katkıları da bir ekipmanın içinde mümkün olduğu kadar fazla malzeme taşıma fikrini destekleyen unsurlardır. Ayrıca verimli yüklenmiş ekipmanlar, içindeki boşluğun az olması sebebiyle, taşıma sırasında hasarlanma riskini azaltarak hem malzemelerin kalitesinin korunmasına yardımcı olurken hem de gerekli ürünlerin ikincil taşımalarının da önüne geçerek üretim ve dağıtımda gereksiz maliyetlerin oluşmasını engeller. Ekipman yükleme verimliliğinin arttırılması kapasite kullanımına olumlu etki yaparak ekipman bulunurluğunu da arttırır.

Dikdörtgensel şekilli büyük cisimlere (ekipman) değişken boyutlu dikdörtgensel cisimlerin minimum sayıda ekipman kullanarak yüklenmesi problemi üç boyutlu kutu paketleme problemi (3D-BPP) olarak adlandırılır. 3D-BPP tır yükleme, konteynır yükleme, palet yükleme, uçak kargo yükleme ve depo yönetimi gibi birçok endüstiriyel proseslerde karşımıza çıkabilen, uygulama alanı geniş bir problemdir. Kutu paketleme problemi başlangıçta basit görünmekle birlikte bilim insanları oldukça karmaşık olduğunu ispatlamıştır.

Kutu paketleme problemi çözümünde amaç bir ekipman içine en çok verimle kutuları sığdırmaktır. Problem bir yerden diğer bir yere taşınması gereken kutuları bir ekipmanın içine yüklemek olduğunda uyulması gereken bazı ilave kanuni ve fiziksel kısıtlar vardır. Bu çalışmada; uç noktalar temelli bir algoritma yardımıyla üç boyutlu

kutu paketleme problemi taşıma problemlerinde göz önüne alınması gereken bir çok pratik kısıt ile çözülmüştür.

Çalışmanın ilk bölümünde üç boyutlu kutu paketleme probleminin detayları, çözüm yöntemleri ve önceki çalışmalar özetlenmiştir. Sonraki bölümde üç boyutlu kutu paketleme problemi için geliştirilen yeni yöntem anlatılmıştır. Üçüncü bölümde geliştirilen yöntemin gerçek problemler üzerinde testi ve bulguları değerlendirilmiştir. Dördüncü ve son bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

1. ÜÇ BOYUTLU KUTU PAKETLEME PROBLEMİ

Üç boyutlu kutu paketleme problemi (3D-BPP)'nde amaç "n" adet dikdörtgensel şekilli cisimi minimum sayıda dikdörtgensel şekilli büyük cisimlere sığdırmaktır. Küçük cisimler büyük cisimin duvarlarına paralel olarak yüklenmeli ve hiç bir boyutta büyük cisimlerden taşmamalıdır. Ayrıca yüklenmiş küçük cisimler arasında çakışma olmamalıdır. Yükleme yapılacak büyük cisimleri lojistik taşıma araçlarının genel adı olan ekipman olarak adlandırırsak, 3D-BPP'de ekipmanlar eşit ve bilinen boyutlara (D, W, H) sahiptir. Her küçük cisim i=1;....; n. olmak üzere bilinen d_i, w_i, h_i boyutlarına sahiptir ve kutu olarak adlandırılacaktır. Burada;

D : Ekipmanın derinlik ölçüsü,
W : Ekipmanın genişlik ölçüsü,
H : Ekipmanın yükseklik ölçüsü,
d_i : i. kutunun derinlik ölçüsü
w_i : i. kutunun genişlik ölçüsü
h_i : i. kutunun yükseklik ölçüsü

$d_i \leq D$, $w_i \leq W$, ve $h_i \leq H_i$ i= 1; …; n'dir.

Yükleme problemleri literatürde kesme ve paketleme problemleri olarak sınıflandırılır. Kesme ve paketleme problemleri kutu boyutları, ekipman boyutları vb. kriterlere göre bir çok farklı isimle anılmaktadır. Kutu paketleme problemlerinin sınıflandırılması ile ilgili detaylar aşağıdaki gibidir.

1.1.Kutu Paketleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Genel ismi ile kesme ve paketleme problemleri altı temel özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Wäscher vd. (2007)'nin yaptıkları sınıflandırmaya göre kesme ve paketleme problemleri aşağıdaki kritelerle kategorize edilir;

- Problemin amaç fonksiyonu,
- Yüklenecek cisimlerin boyut sayısı,
- Yüklenecek cisimlerin boyut ölçülerinin çeşitliliği,

- Yüklenecek cisimlerin şekilleri,
- Ekipman boyutlarının çeşitliliği,
- Ekipman boyut sabitliği,

Problemin Amaç Fonksiyonu: Problemin amacı girdi en küçükleme veya çıktı en büyükleme olarak ikiye ayırılır. Girdi en küçükleme belirli sayıda cisimin en az sayıda ekipmana yüklenmesini amaçlarken çıktı en büyükleme sınırlı sayıda ekipmana mümkün olduğu kadar fazla cismin yüklenmesini amaçlamaktadır.

Yüklenecek Cisimlerin Boyut Sayısı: Yüklenecek cisimler bir, iki, üç veya daha fazla geometrik boyuta sahip olabilir. 3D-BPP' de kutular derinlik (d), genişlik (w) ve yükseklik (h) olmak üzere üç boyuta sahiptir.

Yüklenecek Cisimlerin Boyut Ölçülerinin Çeşitliliği: Bu kriter yüklenecek cisimlerin boyut ölçülerinin çeşitliliğidir. Yüklenecek cisimlerin tek tip ölçüde olması, bir-kaç farklı büyüklükte olması (zayıf derecede heterojen) veya çok farklı ölçülerde olması (güçlü şekilde heterojen) problemin tipini değiştirmektedir.

Yüklenecek Cisimlerin Şekilleri: İki ve üç boyutlu problemlerde yüklenecek cisimler dikdörtgen, daire, kutu, silindir veya top gibi düzenli geometrik şekiller olabileceği gibi düzensiz geometrik şekillere de sahip olabilir.

Ekipman Boyutlarının Çeşitliliği: Ekipman boyutlarının çeşitliliği de problem tipini berleyen kategorilerden biridir. Temel olarak tek yüklenecek ekipman veya birden fazla yüklenecek ekipman olarak ikiye ayrılır.

Ekipmanın Boyut Sabitliği: Yükleme yapılacak ekipmanın bir veya daha fazla boyutu sabit veya değişken ölçülü olabilir. Bu da problem tipini değiştiren bir kriterdir.

Bu kriterlere göre paketleme problemleri literatürde çok farlı kategorilere ayrılmıştır. Problem tipleri Bortfeldt ve Wäscher 2012'de yapılan sınıflandırmaya göre temel olarak ikiye ayrılır;

- Girdi en küçükleme problemleri
- Çıktı en büyükleme problemleri

1.1.1. Girdi en küçükleme problemleri

Belirli sayıdaki cismin sınırsız ve en az sayıdaki ekipmana yüklenmesini amaçlayan problemler yüklenecek cisimlerin ve yükleme yapılacak ekipmanların ya da diğer bir ifade ile stoğa kesilecek küçük cisimler ile kendisinden stok kesilecek şeritlerin boyut çeşitliliğine göre aşağıdaki şekilde tanımlanır.

- Tek stok boyutlu stok kesme problemi (SSSCSP): Zayıf derecede heterojen kutuların en az sayıdaki eş boyutlu ekipmanlara yüklenmesi problemidir.
- Çoklu stok boyutlu stok kesme problemi (MSSCSP): Zayıf derecede heterojen boyutlu bir grup kutunun zayıf derecede heterojen boyutlu bir grup ekipmana, en az sayıda ekipman kullanacak şekilde yüklenmesi problemidir.
- Artık stok kesme kesme problemi (RCSP): Zayıf derecede heterojen boyutlu bir grup kutunun kuvvetli derecede heterojen boyutlu bir grup ekipmana, en az sayıda ekipman kullanacak şekilde yüklenmesi problemidir.
- Tek Kutu Boyutlu Kutu Paketleme Problemi (SBSBPP): Kuvetli derecede heterojen boyutlu bir grup kutunun eş boyutlu ekipmanlara en az sayıda ekipman kullanacak şekilde yüklenmesi problemidir.
- Çoklu kutu boyutlu kutu paketleme problemi (MBSBPP): Kuvetli derecede heterojen boyutlu bir grup kutunun zayıf derecede heterojen boyutlara sahip ekipmanlara, en az sayıda ekipman kullanacak şekilde yüklenmesi problemidir.
- Artık kutu paketleme problemi (RBPP): Kuvetli derecede heterojen boyutlara sahip bir grup kutunun kuvvetli derecede heterojen boyutlara sahip ekipmanlara, en az sayıda ekipman kullanacak şekilde yüklenmesi problemidir.
- Açık boyut problemi (ODP): Bir grup kutunun bir veya daha fazla değişken boyuta sahip tek bir ekipmana, ekipman hacmini en küçükleyecek şekilde yüklenmesi problemidir.

1.1.2. Çıktı en büyükleme problemleri

Belirli sayıdaki ekipmana en çok sayıdaki küçük cismin yüklenmesini amaçlayan problemler yüklenecek cisimlerin ve yükleme yapılacak ekipmanların ya da diğer bir ifade ile stoğa kesilecek küçük cisimler ile kendisinden stok kesilecek şeritlerin boyut çeşitliliğine göre aşağıdaki şekilde tanımlanır.

- Eş cisim paketleme problemi (IIPP): En çok sayıda eş kutuyu bir ekipmana yükleme problemidir.
- Tek büyük nesne yerleştirme problemi (SLOPP): Sınırlı kapasiteli tek büyük bir ekipman içine en çok sayıda zayıf derecede heterojen boyutlu kutunun yerleştirilmesi problemidir.
- Çoklu eş boyutlu büyük nesne yerleştirme problemi (MILOPP): Bir grup eş boyutlu ekipman içine zayıf derecede heterojen boyutlu bir grup kutudan en çok sayıda yükleme problemidir.
- Çoklu heterojen boyutlu büyük nesnelere yerleştirme problemi (MHLOPP): Heterojen boyutlara sahip çoklu ekipman grubuna zayıf derecede heterojen boyutlu en çok kutunun yerleştirilmesi problemidir.
- Tek sırt çantası problemi (SKP): Tek bir ekipmanın kuvvetli derecede heterojen boyutlu cisimlerle en çok hacmi kullanacak şekilde yüklenmesi problemidir.
- Çoklu eş sırt çantası problemi (MIKP): Birden fazla eş boyutlu ekipman içine yüklenecek hacmi en büyükleyecek şekilde kuvvetli derecede heterojen boyutlu kutuların yüklenmesi problemidir.
- Çoklu heterojen sırt çantası problemi (MHKP): Heterojen boyutlu bir grup ekipmanın, yüklenen hacmi en büyükleyecek şekilde, heterojen boyutlu bir grup kutu ile yüklenmesi problemidir.

Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'de sırasıyla girdi en küçükleme ve çıktı en büyükleme problem tipleri özetlenmiştir.

Pisinger (2002) yükleme problemlerini kutu paketleme, şerit paketleme ve sırt çantası problemleri olmak üzere üç ana sınıfa ayırmıştır. Wäscher vd. 2007 deki sınıflandırmaya göre kutu paketleme problemleri kendi arasında üçe ayrılmıştır. Bu sınıflar;

- Tek Boyutlu Kutu Paketleme Problemi (SBPP)
- Çoklu Kutu Paketleme Problemi (MBPP)
- Artık Kutu Paketleme Problemi (RBPP) olarak sıralanmaktadır.

SBPP'de bir grup farklı boyuttaki kutu en az sayıdaki aynı boyutlara sahip ekipmanlara atanmalıdır. MBPP'de bir grup farklı boyuttaki kutu zayıf derecede heterojen

boyutlara sahip ekipmanlara atnamalıdır. RBPP'de bunlardan farklı olarak ekipman boyutları kuvvetli derecede heterojen olmalıdır.

Tablo 1.1. Girdi en küçükleme problem tipleri (Wäscher vd., 2007)

Ekipman Özellikleri \ Yüklenecek Cisimlerin Çeşitliliği		Zayıf Heterojen	Kuvvetli Heterojen
Tüm Boyutlar Sabit	Aynı	Tek Stok Boyutlu Stok Kesme Problemi **SSSCSP**	Tek Kutu/Ekipman Boyutlu Kutu/Ekipman Paketleme Problemi **SBSBPP**
	Zayıf Heterojen	Çoklu Stok Boyutlu Stok Kesme Problemi **MSSCSP**	Çoklu Kutu/Ekipman Boyutlu Kutu/Ekipman Yükleme Problemi **MBSBPP**
	Kuvvetli Heterojen	Artık Stok Kesme Problemi **RCSP**	Artık Kutu/Ekipman Paketleme Problemi **RBPP**
Değişken Boyutlu Tek Ekipman		Açık Boyutlu Problem **ODP**	

Tablo 1.2. Çıktı en büyükleme problem tipleri (Wäscher vd., 2007)

Ekipman Özellikleri \ Yüklenecek Cisimlerin Çeşitliliği		Aynı	Zayıf Heterojen	Kuvvetli Heterojen
Tüm Boyutlar Sabit	Aynı	Aynı Cisim Paketleme Problemi **IPP**	Tek Ekipman-Yerleştirme Problemi **SLOPP**	Tek Sırt Çantası Problemi **SKP**
	Zayıf Heterojen		Çoklu Eş Ekipman-Yerleştirme Problemi **MILOPP**	Çoklu Eş Sırt Çantası Problemi **MIKP**
	Kuvvetli Heterojen		Çoklu Heterojen Ekipman Yerleştirme Problemi **MHLOPP**	Çoklu Heterojen Sırt Çantası Problemi **MHKP**

Kutu paketleme problemlerinin en basit hali bir boyutlu kutu paketleme problemi (1D-BPP)'dir. Bir-Boyutlu Sırt Çantası problemi ya da 0-1 Sırt Çantası Problemi olarak da adlandırılan 1D-BPP ağırlıkları ve değerleri belirli bir dizi cismin ağırlık kapasitesi belirli bir sırt çantasına koyulması problemidir. Amaç çantaya konulan cisimlerin toplam değerini en büyüklemektir. Örneğimizde ağırlık olmak üzere, klasik bir

boyutlu kutu paketleme probleminde her bir yüklenecek kutunun değişken bir boyutu ve bir değeri vardır. Her bir ekipmanın da bilinen bir kapasitesi vardır. Problem amacına göre tüm cisimlerin minimum sayıda ekipmana yüklenmesi ya da eldeki ekipmanlara toplam değeri en büyük cisim kombinasyonunun yüklenmesini temsil eder. İki boyutlu kutu paketleme problemi(2D-BPP)'inde bir boyutluya ilave olarak iki değişken, diğer bir deyimle ikinci bir boyut daha vardır. Değişken boyutttaki dikdörtgenlerin daha büyük bir dikdörtgene en verimli şekilde yerleştirilmesi problemidir. İki boyutlu paketleme problemi deterministik olmayan polinomsal-zor (NP-hard) bir problemdir.

3D-BPP doğal olarak bir boyutlu ve iki boyutlu kutu paketleme problemleri (1D-BPP ve 2D-BPP)'nin genelleştirilmiş halidir. Her bir yüklenecek cisimin ve ekipmanın uzunluk, genişlik ve yükseklik olmak üzere üç boyutu vardır. 3D-BPP, 2D-BPP'nin genelleştirilmiş hali olduğundan kuvvetli şekilde deterministik olmayan polinomsal-zor (NP-hard) problemdir (Martello vd., 2000). Bu probleme sunulacak çözüm yükleme örüntüsü olarak adlandırılır. Yükleme örüntüsü cisimlerin ekipman içine hangi sırayla ve hangi koordinatlara yüklenceğini içeren bilgiden oluşur.

1.2. Üç Boyutlu Kutu Paketleme Probleminde Kısıtlar

Belirli bir grup kutunun en az sayıda ekipmana yüklenmesi problemlerinde, kutuların bir noktaya yerleştirilebilmesi için, ekipman sınırları içinde kalması, ekipmana daha önce yüklenmiş diğer kutularla çakışmaması kısıtlarının yanında ağırlık dağılımı, istifleme, sabitlik, toplam ağırlık, paketleme gurupları, bir kaç farklı boşaltma noktası vb. gerçek yükleme kısıtları da probleme dahil olabilir (Bortfeldt ve Wascher, 2012). Üç-boyutlu kutu paketleme problemlerinin endüstriyel uygulamalarında uygulama alanına bağlı olarak değişkenlik gösteremesine rağmen bazı kısıtların dikkate alınması gerekmektedir. Her problemde dikkate alınması gereken üç temel geometrik kısıt aşağıdaki gibidir;

- Kutuların kenarları yüklenecek ekipmanın duvarlarıyla paralel olacak şekilde yükleme yapılmalıdır.
- Tüm kutular ekipmanın tamamıyla içinde olmalıdır.
- Yüklenmiş olan kutular hiç bir boyutta birbirleriyle çakışmamalıdır.

Bu üç temel kısıta ilave olarak kullanım alanına göre dikkate alınabilecek diğer kısıtlar aşağıdaki gibidir;

- Kutu Yönü: Bir kutunun altı yüzeyi olduğundan her bir kutu altı farklı yönde yüklenebilir ancak kutuların döndürülmesine izin verilip verilmemesi bir kısıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Bazı yük ve paketleme tipleri için kutunun her hangi bir şekilde yüklenmesi önemli olmazken bazıları için kutunun ne şekilde yüklendiği ürün ve/veya paketin hasarlanmamasında veya istiflenebilmesinde rol oynamaktadır. Dikey yön kısıtları kutunun bir boyutunu yükseklik olarak kabul eder ve sadece bu boyutun yükseklik olarak kaldığı döndürmelere izin verir. Bazı durumlarda üst kısım alt olarak döndürülemez ve kutular yatay eksende sadece 90 derece döndürülebilir.Bu gibi durumlarda kutular taban olarak kabul edilen yüzeyin alta geldiği şekilde yüklenebilirler. Ayrıca yükün ekipman içindeki görünümü de bazı yükleme tipleri için önemli olmaktadır. Bu tip yükler için kutular kesinlikle belirli bir yönde yüklenmelidir.
- Yük Sabitliği: Yüklenen kutuların sabit bir şekilde yüklendiği noktada duruyor olması, her hangi bir yöne doğru hareket etmiyor veya devrilmiyor olması da bazı uygulama alanlarında bir kısıttır. Yükün sabitlenmesi hareket ederek diğer yüklerin veya yükün kendisinin hasarlanmasının engellenmesi ve aynı zamanda iş kazalarının önlenmesi anlamında önemlidir. Yükleme yapılan kutunun altının daha önce yüklenmiş kutular veya ekipman tabanı tarafından tam veya kısmi olarak desteklenmesi dikey sabitliği sağlarken. Yüklenen kutunun yanlarının ekipman duvarları ve/veya yüklenen diğer kutularla desteklenmesi kısıtları da yatay sabitliği sağlar.
- Yük Dayanımı ve Kırılganlık Kısıtları: Kutuların birbirleri üzerine yüklenmesi ile ilgili olan kısıttır. Her bir kutunun belirli bir ağırlık dayanım kuvveti vardır. Bu ağırlıktan fazlası üzerine binerse kutu dayanamayıp hasarlanır ve sonucunda maddi kayıplara ve iş kazalarına sebep olabilir. Kırılgan malzemeleri içeren kutuların üzerine herhangi bir kutunun yüklenmemesi de bu kısıtların özel bir halidir ve literatürde kırılganlık kısıtı olarak geçmektedir.
- İstifleme Kısıtları: Kutuların yüzey ve taban tasarımları sebebiyle her kutu tipi birbirinin üzerine yüklenemeyebilir. Bu tür kutuları içeren yükleme problemlerinde birbiri üzerine yüklenebilen ve yükelenmeyen kutular ayrı ayrı tanımlanmalıdır.

- Ağırlık Kısıtları: Ağırlık kısıtlarının en temeli taşıma ekipmanının toplam ağırlık kısıtıdır. Ekipman içine yüklenecek azami ağırlık miktarı ekipmanın dizaynı veya karayolları kanunları ile belirlenmiş toplam ağırlık limitini aşmamlıdır. Ağırlık ile ilgili ikinci bir kısıt yükün ağırlığının ekipman içerisinde nasıl dağıldığıdır. Konteyner gibi yola bağlantısı olmayan yüklerde amaç yükün ağırlık merkezinin mümkün olduğu kadar ekipmanın geometrik merkezine yakın olması amaçlanır. Dorse gibi yola bağlantısı olan taşıma araçlarında ekipmanın aks ağırlığı kısıtları da yükleme için bir kısıt oluşturmaktadır Lim vd. (2013). Her bir aksın dayanacağı yük miktarı sınırlıdır. Limitinden fazla yükle yüklenen araçlarda hem ekipmana hem de yola zarar verilerek trafik güvenliği riske atılmış olur.

Ağırlık kısıtları genel olarak yüklenecek malzemeler göreceli olarak yoğun malzemeler olduğunda etkilidir. Hem taşıma hem de yükün elleçlenmesi aşamalarında ağırlık kısıtlarına uyulması iş güvenliği açısından önemlidir. Ağırlığın uygun dağılması hava kargo yüklemelerinde hem uçuş güvenliği hem de yakıt tüketimini etkilediği gibi deniz yolu ve kara yolu yüklemelerinde de yakıt tüketimini etkilemektedir. Dengesiz yüklenen yükler yakıt tüketimini arttırmaktadır (Trivella ve Pisinger, 2016).

- Çoklu Boşaltma Noktası: Bazı uygulamalarda yüklerin birden fazla noktada boşaltılması ve boşaltmaya uygun olarak yüklenmesi önem taşımaktadır. Bu uygulamalarda ilk boşaltılacak yük ekipmanın sonunda veya tabanında olursa boşaltma faaliyetini güçleştireceğinden yükler boşaltılacakları noktalara göre organize edilerek yüklenmelidir.
- Yük Ayrımı: Bazı uygulamalarda iki kutu tipi birbiriyle aynı ekipmana yüklenmemelidir. Örneğin kimyasal malzemelerle gıda maddeleri.
- Tam Yükleme: Bazı uygulamalarda iki kutu tipi kesinlikle aynı ekipmanın içine yüklenmelidir. Aynı boşaltma noktası veya aynı müşterinin yükleri gibi sebepler bu kısıtı doğurabilir. Buna da tam yükleme kısıtı denir.
- Yükleme Önceliği: Bazı kutular diğerlerinin yüklenmesinden daha öncelikli olabilir. Bu kısıt kutuların yükleme önceliği olarak adlandırılır. Bortfeldt ve Gehring (1998), Ren ve diğerleri (2011) ve Lim vd. (2013) yükleme önceliği kısıtını dikkate alan çalışmalara örnek olarak verilebilir.

Kutu yükleme problemine yönelik çalışmaların bir kısmı teorik olarak çalışarak bu kısıtları göz önüne almazken bazı çalışmalarda bu kısıtların farklı kombinasyonları göz önüne alınmıştır. Bortfeldt ve Wascher (2013), ekipman yükleme kısıtları ile ilgili olarak kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Bu alandaki araştırmaların temel olarak standart problemlerle uğraştığını ve sıklıkla ilgili pratik kısıtların ihmal edildiğini belirtmişlerdir. Zhao, Bennella, Bekta S. ve Dowsland (2016) bu görüşü desteklemiştir.

1.3. Üç Boyutlu Çoklu Ekipman Paketleme Problemi (3D-MCPP)

Farklı ölçülerdeki bir grup dikdörtgensel kutunun en en az sayıdaki eş boyutlara sahip birden çok ekipmana, kutular arasında çakışma olmadan, yüklenmesi problemi Üç Boyutlu Çoklu Ekipman Paketleme Problemi (3D-MCPP) olarak adlandırılır. Wascher vd. 2007 yılında yaptıkları sınıflandırmada 3D-MCPP bir girdi en küçükleme problemi olarak tanımlanmıştır. 3D-MCPP yüklenecek kutuların boyutlarının zayıf veya kuvvetli derecede heterojen olduğu tek boyutlu stok-stok kesme problemi (SSSCSP) veya tek kutu boyutlu kutu paketleme problemi (SBSBPP) olarak sınıflandırılabilir. Tam sayılı programlamaya dayalı sezgisel (Ivancic vd. 1989), kağıt endüstrisi için geliştirilen sezgisel (Fraser and George 1994), karmaşık tamsayılı programlama modeli (Chen vd. 1995), sezgisel yöntem (Xue ve Lai 1997), köşe noktalar kullanan dal-sınır algortiması (Martello vd.2000), sütun üretim yöntemi ile birlikte tam sayılı programlama (Eley 2003), çoklu komşuluk arama (Jin vd. 2003), lokal armalı sezgisel (Farøe vd. 2003), katman oluşturma ile birlikte TS (Lodi vd. 2002), karmaşık tam sayılı doğrusal programlama formülasyonu (Westerlund vd. 2005), arama ağacı yöntemi (Brunetta ve Gregoire 2005), ikili değişkenlikle yerel arama yapan sezgisel (Takahara 2006) ve Crainic vd. 2008'in uç noktalar adını verdikleri, paketleme içinde yeni eklenecek kutunun koyulabileceği noktaları tanımlayan çalışmaları MCPP için yapılan çalışmalara ilk örneklerdir. Zhaoa vd. 2016 yılında üç boyutlu yükleme problemleri için yaptıkları literatür analizine göre çoklu ekipman yükleme problemlerinin göreceli olarak az çalışıldığını ve gelecek çalışmalar için önerdikleri üç muhtemel çalışma alanından birinin çoklu ekipman yükleme problemi olduğunu belirtmişlerdir. Diğer üç boyutlu yükleme problemleri gibi 3D-BPP de NP-Zor bir problemdir. (Martello vd. 2000)

1.3.1. Çoklu ekipman paketlemede ekipman açma yöntemleri

Çoklu ekipman paketleme problemlerinde temel olarak iki ekipman açma yöntemi vardır (Gehring ve Bortfeldt, 2002);

Birinci yöntem sırasal stratejidir. Bu yöntemde bir ekipman açılır ve tamamen dolana kadar yüklendikten sonra henüz yüklenmemiş kutu varsa yeni bir ekipman açılır. Bu yöntemin dezavantajı orantısız şekilli kutuların paketlemede sona kalması sebebiyle en son yüklenen kutuların hacim kullanım verimliliğinin düşük olma ihtimalidir.

Diğer yöntem eş zamanlı stratejidir. Bu yöntemde birden fazla ekipman aynı anda açılabilir. Toplam yüklenecek hacim ekipman hacmine bölünür ve çıkan sonuç bir en küçük tam sayıya yuvarlanır. Eğer başlangıçta daha az ekipman olsun istenirse, toplam yüklenecek hacmin ekipman hacmine oranı ikiye bölünür ve çıkan sonuç en küçük tam sayıya yuvarlanır. Bu ekipmanlar dolduğunda yeni ekipman açılır.

İkinci yöntemin bir versiyonu Eley 2003'de üçüncü bir yöntem olarak sınıflandırılmıştır. Ön-atamalı strateji olarak bahsi geçen bu yöntemde kutular kullanıcı tarafından belirlenen bir amaç doğrultusunda sınıflandırılarak çoklu ekipmanlara atanır. Atandıkları kutuya her hangi bir sebepten yüklenemeyecek olan kutular başka bir algoritma yardımıyla diğer ekipmanlara yüklenirler. Burada kullanıcı tarafından belirlenen amaç küçük ve büyük kutuların dengeli dağıtılması vb.olabilir. Terno vd. (2000) ağır ve HK'ların dağıtılması olarak kullanmışlardır.

Bazı çalışmalarda, önce kutuları paketleme düzenine yerleştirme ve sonra bu sıraya göre sırasıyla ekipman açarak yükleme veya sırasal stratejiye göre bir başlangıç çözümü oluşturup sonra geliştirme sürecinde ön-atamalı stratejiyi kullanmak gibi belirtilen iki yöntemin melezleri kullanılmıştır.

Gehring ve Bortfeldt (2002) yaptıkları çalışmada sırasal stratejinin verimlilik olarak az bir farkla daha başarısız ancak çözüm zamanı olarak çok daha kısa süreli çözümler üretebiliyor olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Ekipmanın hangi yöntemle açılacağının belirlenmesinin ardından açılan ekipmana kutuların hangi sıra ile yükleneceği ve ekipman içinde nereye yerleştirileceği belirlenmesi gereken diğer konulardır.

1.3.2. Çoklu ekipman paketlemede cisim sıralama yöntemleri

Üç-boyutlu kutu paketleme problemi (3D-BPP) en yaygın kullanım alanı kutuların bir palete ya da doğrudan bir yükleme ekipmanına yüklenmesidir. Herhangi bir yükleme yönteminde kutuların yükleme yapılmadan önce nasıl sıralanacağı, sınıflandırılacağı ve yükleme yapılacak ekipman içerisinde nasıl temsil edileceğinin belirlenmesi gerekir.

Üç-boyutlu dikdörtgensel kutuların sabit ölçülü üç-boyutlu dikdörtgensel ekipmanlara yüklenmesi alanında bugüne kadar yapılan çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan sıralama yöntemlerini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

Yüklenecek kutuların sıralanması yükleme öncesinde kutuların belirli bir sırada organize edilmesi anlamına gelir. Sıralama yükleme için kullanılan yöntemin verimliliğinde kilit bir rol oynar.

Yüklemede kullanılan yöntem üzerinde yapılan değişiklikler genel olarak sıralamadaki değişimleri de içerir. Genel olarak yapılan çalışmalarda kullanılan sıralama yöntemleri iki ana gruba ayrılır;

- Sabit Sıralama
- Aktif sıralama

Sabit sıralama kutuların yükleme öncesinde belirli kurallara göre sıralanmasını ve yükleme sırasında bu sıranın takip edilmesini ifade eder.

Aktif sıralama ise yükleme sırasında da yüklenmeyen kutuların sıralanmasını yapan yöntemlerdir. Bu yöntemlerde kullanılan kriterler aşağıdaki gibidir;

- Derinlik ve genişlik olmak üzere kutunun taban uzunlukları,
- Kutunun taban alanı,
- Kutu grubunun taban alanlarının toplamı,
- En küçük boyutun ölçüsü,
- Aynı kutu tipinin adedi,
- En büyük boyutun uzunluğu,
- Kutunun derinlik ölçüsü,

- Kutunun genişlik ölçüsü,
- Kutunun yükseklik ölçüsü,
- Kutunun tüm ölçülerinin toplamı,
- Kutu ağırlığı,
- Kutu hacmi,
- Potansiyel hacim verimliliği veya yerleştirilecek alandaki toplam hacim kullanımı,
- Aynı kutu tipinden oluşan ve eş yönlü blokların hacmi,
- Aynı kutu tipinden yüklenmemiş kutuların hacmi,
- Paketleme noktası ile kutunun uzunluk ölçüsünün toplamı,
- Ekipmanın yüklenmemiş taban alanı,

Üç boyutlu kutu paketleme problemi ile ilgili yapılan çalışmalarda sıralamalar ya direkt olarak yukarıdaki kriterlere göre ya da herhangi bir kritere göre sınıflandırılan kutuların sınıf içinde diğer kriter veya kriterlere göre sıralanması ile yapılmıştır.

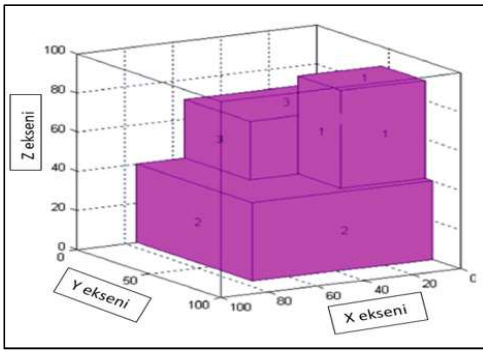
1.3.3. Çoklu ekipman paketleme probleminde cisim yerleştirme

Paketleme problemlerinin en büyük kullanım alanı taşınacak kutuların bir palete ya da doğrudan bir taşıma ekipmanına yüklenmesidir. Bununla birlikte problemin çeyrek asrı aşkın bir süredir araştırılıyor olmasına rağmen bir çok yükleme ataması operatörlerin tecrübe ve kararlarına göre yapılmaktadır.

Operasyonel gözlemler ve literatüre göre operatörler tarafından yapılan yüklemeler ekipmanların hacim kullanımını optimum yapamamaktadır. Hacim kullanımı bilgisayarlar tarafından üretilen çözümler tarafından önemli ölçüde geliştirilebilir.

Üç-boyutlu kutu paketleme problemlerinin çözümü cisimlerin ekipman içindeki yerinin temsili ile ifade edilir. Kutuların hangi sıra ile ekipman içinde hangi noktaya yüklenenceği bilgisi çözümü oluşturur.

Şekil 1.1'de Feng vd. 2013'de yapılan çalışmada sunulan çözüm örneği rotasyon bilgisini de içerecek şekilde gibidir. Birinci satırda kutuların numarası yer almaktadır ve ekipman içine hangi sıra ile yerleştirileceğini belirtmektedir. İkinci satırda kutunun hangi yönde konulacağı, sırasıyla 3, 4 ve 5. satırlarda X, Y ve Z eksenlerindeki konumları belirtilmiştir.



2	3	1	Kutuların yükleme sırası
5	2	0	Kutuların yönleri
0	0	0	Kutuların X ekseni koordinatları
0	0	45	Kutuların Y ekseni koordinatları
0	40	40	Kutuların Z ekseni koordinatları

Şekil 1.1. Kutu paketleme problemi çözüm örneği

Problem çözümünde kutuların yerleştirileceği konumların belirlenmesi yöntemleri kesin temsil yöntemleri ve sezgisel yöntemler olmak üzere temel olarak iki sınıfa ayrılır.

1.3.3.1. Kesin temsil yöntemleri

Bu yöntemler 3DBPP için sınırlı kullanıma sahiptir. Az kullanılmasının sebeplerinden biri muhtemel örüntülerin temsilinin ve pratik kısıtların bu çözümlerle ifade edilmesinin zorluğudur. Diğer bir güçlük de yüklenecek kutu sayısı ve ekipman sayısının fazlallığı sebebiyle sonuç formülasyonunun çözümünün zorluğudur.

Problemdeki bazı değişkenlerin tam sayı olduğu matematiksel optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan tekniklerden olan tam sayılı programlama ve karmaşık tamsayılı programlama 3DBPP'nin çözümünde yararlanılan kesin çözüm yöntemlerindendir. Özellikle aday çözümlerin sistematik bir şekilde sayılmasını sağlayan, tam setin kökte bulunduğu bir ağaç yapısını andıran dal sınır algoritması sıklıkla kullanılmış bir tam sayılı programlama çözüm yöntemidir. Algoritma çözüm parçalarını barındıran bu ağacın dallarını keşfeder.

Bir dalın aday çözümlerini saymadan önce dallar optimal çözümdeki alt ve üst sınırlarla kontrol edilir ve algoritma tarafından o ana kadar bulunmuş olan çözümden daha iyisini sağlayamıyorsa bu dal çözümden çıkartılır.

Tam sayılı programlama temsillerinin çözümü için kullanılan yöntemlerden biri de sütun üretim yöntemidir. Tek başına ve sezgisellerle birlikte 3D-BPP çözümlerinde kullanılan kesin çözüm tekniklerinden biridir. Değişkenlerin tümünü çözüme almak

yerine problemi ana problem ve alt problem olarak ikiye ayıran ve bazı değişkenleri sonradan çözüme dahil eden ve böylece arama alanını önemli derecede azaltan bir yöntemdir.

Dal-sınır algoritmasına ilave olarak doğrusal programlama gevşetmelerini sıkılaştıran kesme düzlemi tekniklerini kullanan dal ve kes (branch and cut) algoritması da 3DBPP için kullanılan bir tam sayılı programlama çözüm tekniğidir.

Kartezyen koordinat sistemi, yakınsama algoritmaları da 3DBPP'in çözümünde kullanılan diğer kesin çözüm yöntemleridir. Ancak az sayıda kutu ve ekipman olduğunda yararlanılabilen yöntemlerdir.

Bu konuda yapılan çalışmalarda kesin çözüm veren algoritmaların, problemin karmaşıklığı sebebiyle, ancak küçük boyutlu problemleri optimal olarak çözebildiği görülmüştür. Çoğu pratik uygulama için sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar mevcuttaki en iyi seçenektir. Bu algoritmalar makul bir sürede optimum veya optimuma yakın çözümlere ulaşabilmektedir.

1.3.3.2. Sezgisel temsil yöntemleri

Sezgisel temsil yöntemlerini yerleştirme sezgiselleri ve geliştirme sezgiselleri olmak üzere kendi arasında iki sınıfa ayırabiliriz. Yerleştirme sezgiselleri ilk çözüm sırasında hangi kutunun nereye konulacağını temsil ederken geliştirme sezgiselleri başlangıç çözümünden sonra mevcut paketlemeyi geliştirmek amacıyla kullanılır.

Yerleştirme sezgiselleri:Yerleştirme sezgiselleri kutunun ekipman içirisinde hangi konuma yerleştirileceğini belirleyen yöntemlerdir. Yapılan çalışmalarda şu ana kadar kullanılan yerleştirme sezgisellerini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

Duvar Oluşturma (Wall-building) Yöntemi: Bir çok çalışma farklı şekillerde bu yöntemi kullanmıştır. Aynı tipteki ve boyuttaki kutuların gruplanması ve bu kutulardan oluşturulan blokların ekipmanın bir iç köşesinden itibaren dikey sütunlar halinde yüklenmesi ve sonra ekipmanın genellikle uzun kenarı boyunca duvar şeklinde yerleştirilmesi yöntemidir. Yüklenen kutular içi-içe geçmediğinden ağırlık dengeleme çalışmaları blokların yerini değiştirerek kolayca yapılabilir. Aynı kutuların blok halinde düzenlenmesi kolaydır ve yükleme zamanını azaltır.

Ayrıca aynı kutuların üstüste yüklenmesi ağırlık dayanımı kısıtını aşmamayı da kolaylaştırır. Aynı kutulardan oluşan bloklar düzgün bir dikdörtgensel şekil oluşturduğundan yük sabitliği de arttırılmış olur.

İstifleme (Stack Building) Yöntemi: Kutular düzgün bir şekilde istiflenir. Duvar oluşturma yöntemine oldukça benzer ancak farklı olarak istiflenmiş kutular duvar oluşturmazlar.

Katman Oluşturma (Layer Building) Yöntemi: Paketleme düzeni bir grup kutunun ekimanın tabanına temel katmanı oluşturacak şekilde dizilmesiyle oluşturulur. Temel katman oluşturulduktan sonra üzerine, ekipmanın yükseklik sınırı izin verdiği ölçüde, katmanlar halinde yükleme yapılmaya devam edilir. Duvar oluşturma yönteminin yatay halidir. Bazı çalışmalarda katman oluşturma yöntemi de duvar oluşturma yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

Blok Oluşturma (Block Building) Yöntemi: Genellikle aynı yönlü tek tip kübik kutu bloklarının katmanlar halinde yüklenmesi yöntemidir. Buradaki amaç blokların kendi içinde hacim kayıplarının minimize edilmesidir.

Diğer Yerleştirme Sezgiselleri: Verilerin birbirine sanki ağaç yapısı oluşturuyormuş gibi sanal olarak hiyerarşik bir şekilde bağlandığı arama ağacı algoritması (tree search) veya arama ağları. Ekipmanın içinde müsait bulunun tüm kübik boşlukları listeleyen ve böylece ekipman içindeki tüm boş alanı temsil eden maksimum boşluk (maximal space) algoritması. Açgözlü tesadüfi adaptif arama prosedürü (GRASP), önce yüklenen her bir kutuyu bir katman veya yükleme yüzeyi olarak gören çok yüzeyli yapı (multifaced buildup) algoritması. İki boyutlu matris katmanlarından oluşan üç boyutlu bir matris yapısıyla yüklenen kutuların boyutlarını, yerlerini ve kalan boşluğu temsil eden mekansal (spatial) temsil yöntemi. Her kutu yüklendikten sonra yüklenen kutunun köşe noktalarını yüklemeye aday nokta olarak alan köşe noktalar yöntemi. Her kutu yüklendikten sonra uç noktalarından alınan altı farklı izdüşüm noktalarını yüklemeye aday nokta olarak belirleyen uç noktalar (EP) yöntemi. Tabu arama algoritması (TS). Tüm müsait köşeleri kaydeden ve bu noktalara yüklemeyi değerlendiren oyuk derecesi (Caving degree) yöntemi. Kutuları ekipmanın zeminine ve bir dikey kenarına doğru yerleştiren L-Şekilli örüntü yöntemi. Kutuların ekipman içerisindeki x, y ve z köşelerini yönlü ağlarla temsil eden yönlü ağ temsili yöntemi.

Ekipman içindeki kutuların çakışmadan bir paketleme ifade ettiğini ağ gösterimiyle temsil eden aralıklı ağ (IG) yöntemi diğer sezgisel temsil yöntemlerini oluşturur.

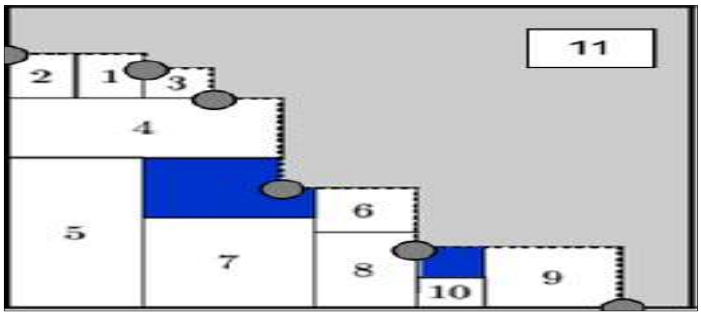
Geliştirme sezgiselleri: Yerleştirme sezgiselleri ile kutuların ekipmanlara yerleştirilmesi yapılırken geliştirme sezgiselleri ile yapılan komşuluk aramalarla önemli ölçüde verimlilik kazanımı sağlayan çözümlere ulaşılabilir. Birçok yerleştirme sezgiseli kutuların sıraya dizilmesi ve permütasyonu ile ilgili olduğundan ve genetik operatörler permütasyon temsili üzerinde çalışmak için dizayn edildiğinden genetik algoritma (GA) kutu yükleme problemlerinde sıklıkla kullanılmıştır. Kombinasyonel optimizasyon problemlerinde sıkça kullanılan bir yöntem olan TS algoritması da kutu yükleme problemlerinde geliştirici bir yöntem olarak da kullanılmıştır. Bir başlangıç çözümü üzerinde daha iyi çözümlere ulaşmayı amaçlayan ve yerel en iyi çözümlerden uzaklaşmak için belirli olasılık ve kabul stratejileriyle daha kötü sonuçları da kabul edebilen benzetilmiş tavlama (SA) algoritması da kutu yükleme problemlerinde kullanılan yöntemlerden biridir.

Aşamalı bir şekilde yerel arama yapan klavuzlu yerel arama (GLS) ve komşuluğun sistematik olarak değiştirildiği tesadüfi yerel arama yöntemi olan değişken komşuluk arama (VNS) algoritmaları da kullanılan geliştirici sezgisel yöntemlerdendir.

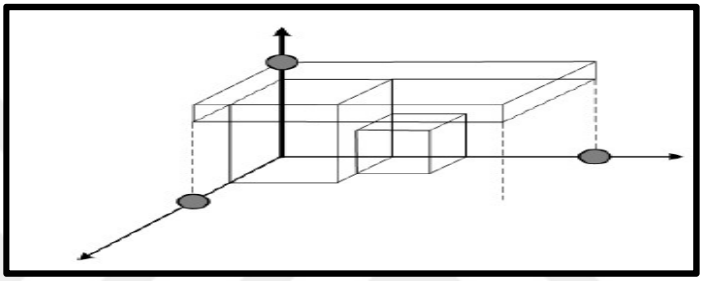
1.4. Uç Noktalar Temelli Yapıcı Sezgisel Yöntem

Crainic vd. 2008 yılında yaptıkları çalışma ile kutu paketleme problemi için uç noktalar temelli bir yöntem geliştirdiler. Bu yöntem aslında köşe noktalar olarak bilinen ve Martello vd. Tarafından 2000 yılında yapılan çalışmayla literatüre geçmiş köşe noktalar yönetemine dayanmaktadır. Köşe noktalar, mevcut bir paketlemede bir cismin yerleştirilebileceği baskın yerler olarak tanımlanmıştır.

İki boyutta köşe noktalar ekipman içindeki cisimlerin oluşturduğu dış çerçevenin yataydan dikeye veya dikeyden yataya dönüş köşeleri olarak tanımlanır. Şekil 1.2'deki büyük siyah noktalar, iki-boyutlu kutu paketleme problemlerinde köşe noktaları tanımlamaktadır. Üç-boyutlu çerçevede köşe noktalar, iki boyutludaki mantığın her bir cismin en alt ve en üst uç noktası tarafından oluşturulan her bir yükseklik noktasına uygulanması ile elde edilir. Şekil 1.3'te üç-boyutlu yüklemede köşe noktalar gösterilmiştir.



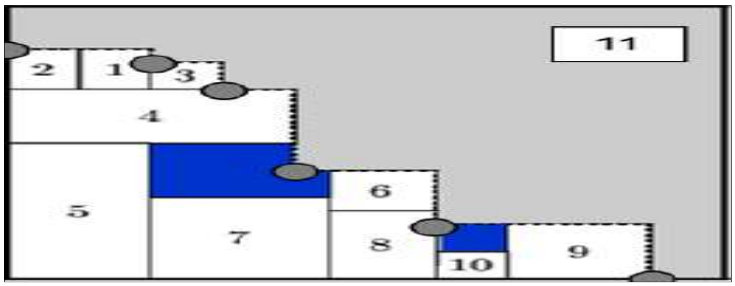
Şekil 1.2. İki boyutlu yüklemede köşe noktalar gösterimi



Şekil 1.3. Üç boyutlu yüklemede köşe noktalar gösterimi

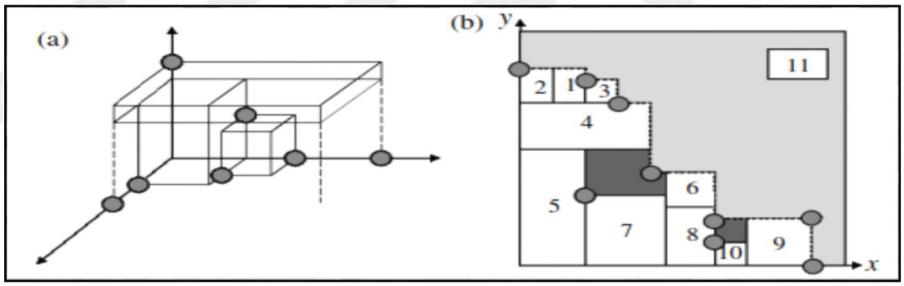
Martello vd. (2000) Köşe noktalar yöntemiyle bir dal-sınır algoritmasını dizayn etmişler. Geliştirdikleri yöntemle verilen bir kutu setinin ekipmana yüklenip yüklenemeyeceğini araştırmışlarıdr. Boef vd. 2005 yılında yaptıkları çalışma ile Martello ve arkadaşları tarafından sunulan köşe noktalar hesaplama yönteminin bazı uygun yerleştirmeleri bulamadığını göstermiştir. Martello vd., 2007 köşe noktaları hesaplama amacıyla yaptıkları çalışma ile bu sorunu çözen yeni bir versiyon geliştirmişlerdir. Dal-sınır algoritması içinde faydalanılan köşe noktalar yöntemi bulunan parçalı çözümlerin sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Köşe noktaları kullanan yapıcı sezgizeller ekipman kullanım veimliliği anlamında etkisiz olabilir ancak köşe noktaların tanımı gereği kutuların ekipmana yükleme sırasına bağlıdır.

Örneğin Şekil 1.4'teki 11 numaralı kutu 4, 5, 6 ve 7 numaralı kutuların arasındaki boşluğa sığabiliyor olmasına rağmen köşe noktaların tanımı gereği yüklenememektedir. Üç-boyutlu bir yüklemede özellikle kutu boyutları birbirinden farklılaştıkça verimsizlik artacaktır.



Şekil 1.4. Köşe noktalar yönteminde yükleme verimsizliği

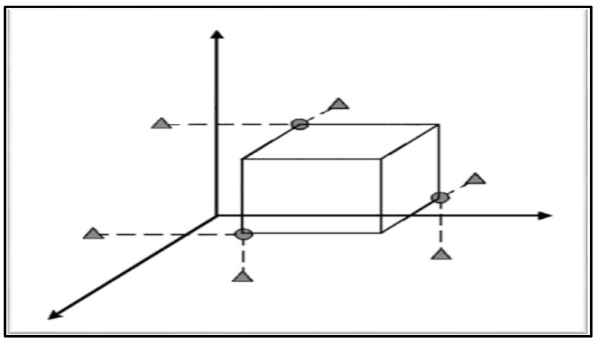
2008 yılında Crainic ve arkadaşları köşe noktalar yöntemini genişleten yeni bir yöntem geliştirmişler ve bu yöntemi uç noktalar (EPs) yöntemi olarak tanımlamışlardır. Uç noktalar, ekipman içine yüklenmiş kutuların şekilleri ile tanımlanmış müsait alanlardan faydalanmayı sağlar. Şekil 1.5. iki-boyutlu ve üç-boyutlu paketlemelerde uç noktaları göstermektedir.



Şekil 1.5. İki-boyutlu ve üç-boyutlu paketlemelerde uç noktalar

Uç noktaların ana fikri; boyutları w_i, d_i, h_i olan bir i kutusunun arka sol köşesi bir kipmanın x_i, y_i, z_i koordinatlarına yerleştirildiğinde, başka kutuların yüklenebileceği bir seri yeni potansiyel yükleme noktası oluşturur. Oluşan bu noktalar uç noktalar (EP) olarak isimlendirilir. Uç noktalar aşağıda tanımlanan üç noktadan ekipmanın dikgörtgensel eksenleri doğrultusunda alınan izdüşümlerle üretilir. Şekil 1.6 uç noktaların nasıl üretildiğini göstermektedir.

- $(x_e + w_i, y_e, z_e)$
- $(x_e, y_e + d_i, z_e)$
- $(x_e, y_e, z_e + h_i)$



Şekil 1.6. Üç boyutlu paket uç nokta gösterimi

- 3D-EPL güncelleme algoritması (EK-A) verilen bir paketleme ve üç boyutlu uç noktalar listesi (3DEPL) ile bir i kutusunun (x_e, y_e, z_e) noktalarına yüklenmesiyle oluşan yeni uç noktaları tanımlar.

3D-EPL güncelleme algoritmasının temel akışı aşağıdaki gibidir;

- Ekipman boş ise kutuyu (wi, 0, 0), (0, di, 0), ve (0, 0, hk) uç noktalarını üreten (0, 0, 0) noktasına yerleştir.
- Kutu boş değil ise, kutu (x_e, y_e, z_e) noktasına yerleştirilir ve uç noktalar aşağıdaki noktalardan alınan izdüşümlerle üretilir.
- x_e+w_i, y_e, z_e noktasından Y ve Z eksenleri doğrultusunda,
- x_e, y_e+d_i, z_e noktasından X ve Z eksenleri doğrultusunda,
- x_e, y_e, z_e+h_i noktasından X ve Y eksenleri doğrultusunda,
- Her bir noktadan ilgili eksende yüklenen kutu ile ekipman duvarı arasındaki tüm kutulara iz düşüm alınır.
- Eğer birden fazla kutuya iz düşüm alınabiliyorsa algoritma en yakın olanı seçer.

3D-EPL güncelleme algoritması mevcut paketlemedeki uç noktaların bilgisini tutar ve paketlemeye yeni kutu eklendiğinde 3D-EPL'ni günceller. Bu sebeple kutuların birbiri ardına yüklendiği yapıcı sezgisellerle birlikte kullanılabilir.

İlk Uygun-Azalan (FFD) ve En Uygun-Azalan (BFD) prosedürleri Bir boyutlu kutu paketleme için yapıcı sezgisellerdir. İki yöntem de cisimleri hacimlerine göre azalan sırayla sıralandıktan sonra ekipmana yükleme yönteminde farklılaşırlar. FFD sezgiselinde cisimler sırayla yüklenirken ilk sığdıkları ekipmana yerliştirilir. BFD

sezgiseli cismi yükledikten sonra en büyük boşluğa sahip olacak ekipmana yüklemeye çalışır. İki yöntemde sıradaki cismi eldeki hiç bir ekipmana yükleyemiyorsa yeni ekipman oluşturur. Bir boyutlu kutu paketleme problemi için basit ancak etkili yöntemlerdir. BFD and FFD yöntemlerinin 3DBPP'ne genişletilmiş halleri iyi sonuçlar vermemiştir. Ancak FFD ve BFD yöntemleri bir-boyutlu problemde sıralama kriteri olarak sadece hacimi kullanmaktadır. 3DBPP'de hacim veya ağırlık gibi tek sıralama kriteri yerine yükseklik, genişlik, derinlik ve bunlardan türetilebilecek yüzey alanı vb. kriterler kullanılabilir.

Crainic vd. Uç noktaları kullanarak yaptıkları çalışmada FFD ve BFD sezgisellerini genişleterek hem farklı sıralama kriterlerini denemişler hem de yükleme yapılacak ekipmanın seçiminde farklı kurallar kullanmışlardır.Geliştirdikleri yöntemlere EP-FFD ve EP-BFD isimlerini vermişlerdir. Farklı sıralama kuralları ile EP-FFD ve EP-BFD yöntemlerinin farklı versiyonlarını tanımlamışlardır. Denedikleri sıralama kriterleri içinde iyi sonuç verenleri aşağıdaki gibi sıralamışlardır;

- Hacim-Yükseklik: Kutular hacimlerine (w_i x d_i x h_i) göre artmayan sıra ile sıralanır. Aynı hacme sahip kutular yüksekliklerine (h_i) göre artmayan sırayla sıralanır.
- Yükseklik-Hacim: Kutular yüksekliklerine (h_i) göre artmayan sıra ile sıralanır. Aynı yüksekliğe sahip kutular hacimlerine (w_i x d_i x h_i) göre artmayan sırayla sıralanır.
- Alan-Yükseklik: Kutular taban alanlarına (w_i x d_i) göre artmayan sıra ile sıralanır. Aynı taban alanına sahip kutular yüksekliklerine (h_i) göre artmayan sırayla sıralanır.
- Sınıflandırılmış Alan-Yükseklik: Ekipman taban alanı (W x D) aşağıdaki Denklem (1.1)'de gösterilen aralıklarla tanımlanan sınıflara ayrılır; burada W ekipmanın genişliğini, D ekipmanın derinliğini ifade ederken $\delta \in [1, 100]$'dür. Kutular taban alanlarına göre ait olduklara sınıflara atanırlar ve sınıflar j'nin azalan değerlerine göre sıralanırlar. Aynı sınıfa atanmış kutular yüksekliklerine (h_i) göre artmayan sırayla sıralanırlar.

$$Aj\delta = [(j-1) \times WD/100 \times \delta, (j \times WD/100 \times \delta)] \quad (1.1)$$

- Yükseklik-Alan: Kutular yüksekliklerine (h_i) göre artmayan sıra ile sıralanır. Aynı yüksekliğe sahip kutular taban alanlarına (w_i x d_i) göre artmayan sırayla sıralanır.

- Sınıflandırılmış Yükseklik-Alan: Ekipman yüksekliği (H) aşağıdaki Denklem (1.2)'de gösterilen aralıklarla tanımlanan sınıflara ayrılır. $\delta \in [1, 100]$'dür. Kutular yüksekliklerine göre ait oldukları sınıflara atanırlar. Sınıflar j'nin azalan değerlerine göre sıralanırlar. Aynı sınıfa ait olan kutular kendi içinde taban alanlarına (w_i x d_i) göre artmayan sırayla sıralanırlar.

$$Hj\delta = [(j-1) \times H/100 \times \delta, (j \times H/100 \times \delta)] \quad (1.2)$$

EP-FFD sezgiseli kutuları yukarıda tanımlanan kurallardan belirlenen bir tanesi ile sıralar. Tüm kutuların boyutlarının ekipmana yüklemeye uygun olup olmadığını kontrol eder. Uygun olmayan kutuyu sıralamadan çıkartır. Kutuları sığdıkları ilk ekipmana yükler. Eğer kutu hiç bir ekipmana yüklenemiyorsa yeni ekipman açılır. Kutunun ekipmana sığıp sığmadığına; kutunun arka alt köşesinin EPL'ndeki noktalara yerleştirildiğinde diğer kutularla çakışıp çakışmadığına ve ekipman sınırları içinde kalıp kalmadığına bakılarak karar verilir. Kutuya daha önce yüklenen her hangi bir kutuyla çakışmayan ve ekipman sınırları içinde kalan kutular o EP'ya yüklenebilir. Kutu birden fazla EP'ya yüklenebiliyorsa, sırasıyla en küçük (z, y, x) değerine sahip olan noktaya yüklenir. Her bir yeni kutu yüklendiğinde EPL güncellenir.

EP-BFD sezgiseli kutuları belirlenen her hangi bir kurala göre sıralar. Tüm kutuların boyutlarının ekipmana yüklemeye uygun olup olmadığını kontrol eder.

Uygun olmayan kutuyu sıralamadan çıkartır. Yüklemeye uygun kutular bir amaç fonksiyonuna göre en iyi ekipmanın en iyi EP'na yüklenir. Bu yöntemde de bir kutunun her hangi bir EP'ya yüklenebilip yüklenemediğine, kutunun arka alt köşesi EP'ya yerleştirildiğinde kutuya daha önce yüklenen kutularla çakışıp çakışmadığına bakılarak karar verilir. Her bir EP için bir amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. En iyi amaç fonksiyon değerini veren EP yükleme noktası olarak seçilir. Eğer kutu hiç bir mevcut ekipmana sığmazsa yeni ekipman yüklemeye açılır. Her bir yeni kutu yerleştirildiğinde EPL EK-A'da sunulan algoritma yardımıyla güncellenir.

Boyutları w_i, d_i, h_i olan bir i kutusunun bir b ekipmanına yükleneceğini düşünürsek, e koordinatları x_e, y_e ve z_e olan bir uç nokta ve fb amaç fonksiyonunu temsil etmek üzere çalışmada değerlendirilen amaç foksiyonları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yüklemeden sonra kalan boşluğun en küçüklenmesi : Bu amaç fonksiyonu kutuyu yükledikten sonra kalan hacime eşittir. k ekipmana daha önce yüklenen kutuları temsil etmek üzere aşağıdaki şekilde hesaplanır. Amaç en küçük boşluğun kaldığı ekipmanı seçmektir. Bu yöntemin dezavantajı ekipman içindeki tüm uç noktaların aynı değeri vermesidir.

$$fb = (D \times W \times H) - (\sum (d_k \times w_k \times h_k)) - (d_i \times w_i \times h_i) \quad (k=1...n) \tag{1.3}$$

- X ve Y eksenlerindeki en büyük paketleme boyunu en küçüklemek: Her bir kutu X ve Y eksenlerinde yüklü boyut artışını en küçükleyecek noktaya yüklenir. W_{MP} ve D_{MP} i kutusundan önce ekipmana yüklenen kutuların oluşturduğu en küçük dış çerçeve olmak üzere X ve Y eksenleri için aşağıdaki Denklem (1.4) ve Denklem (1.5)'te gösterildiği şekilde hesaplanır. X ekseninde eğer $x_e + w_i > W_{MP}$ ise;

$$fb = x_e + w_i - W_{MP} \tag{1.4}$$

değilse; 0 olarak alınır.

Y ekseninde eğer $y_e + d_i > D_{MP}$ ise;

$$fb = y_e + d_i - D_{MP} \tag{1.5}$$

değilse; 0 olarak alınır.

- X ve Y eksenlerindeki yüklenmiş boyutu dengeleme: Bu amaç fonksiyonu X ve Y eksenlerindeki kullanılmış (yüklenmiş) uzunlukları dengelemeye çalışır. M derinlik ve genişlik boyutlarında bir artış durumunda büyük bir ceza maliyetini ifade etmek üzere Denklem (1.6), (1.7), (1.8) ve (1.9) aşağıdaki gibi hesaplanır. Eğer bir artış oluyorsa en küçük artışı veren uç nokta tercih edilir. X ekseninde eğer $x_e+w_k>W_{MP}$ ise;

$$fb = (x_e + w_k - W_{MP}) \times M \tag{1.6}$$

değilse;

$$fb = (W_{MP} - x_e + w_k) \quad (1.7)$$

olarak alınır.

Y ekseninde eğer $y_e + d_k > D_{MP}$ ise;

$$fb = (y_e + d_k - D_{MP}) \times M \quad (1.8)$$

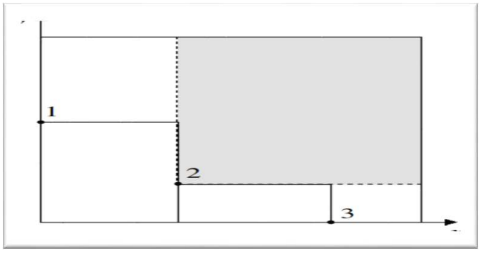
değilse;

$$fb = (D_{MP} - y_e + d_k) \quad (1.9)$$

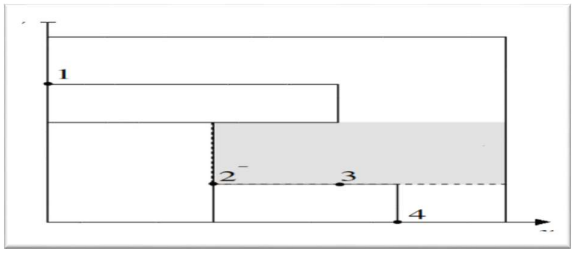
olarak alınır.

Uç nokta etrafındaki artık alanın (RS) en verimli kullanılması: EP'nın artık alanı uç nokta etrafındaki yüklemeye müsait boşluğu tanımlar. Uç noktanın her bir eksendeki kendisine en yakın kutuya ya da ekipman duvarına olan uzaklığı ile hesaplanır. Her bir eksendeki en yakın kutu farklı olabilir. Ekipmana her bir yeni kutu eklendiğinde EP'lar etrafındaki RS'lar EK-B'de sunulan algoritma ile güncellenir. Amaç fonksiyonu bir i kutusu bir e uç noktasına yüklendiğinde aşağıdaki şekilde uç noktanın RS'ı ile kutu boyutları arasındaki boşluğu Denklem (1.10)'daki gibi ölçer. Şekil 1.7 ve Şekil 1.8 sırasıyla kutu yüklenmeden önce ve yüklendikten sonraki RS'ları göstermektedir.

$$fb = [(RSe,y - di) + (RSe,x - wi) + (RSe,z - hi)] \quad (1.10)$$



Şekil 1.7. İlk durumdaki artık alan



Şekil 1.8. Kutu yüklendikten sonraki artık alan

Crainic vd. EP ve CP yöntemlerini kullanan sezgiselleri kıyaslamışlar ve EP kullanan FFD sezgiselinin CP kullanan sezgisellere göre ekipman içindeki müsait alanı daha verimli şekilde kullandığı ve dolayısıyla daha etkin olduğu sonucuna ulaşmışlar. Ayrıca performans ayrımının ekipman ve kutu boyutları arasındaki fark arttıkça belirginleştiğini, test edilen problemler içinde EP kullanan FFD yönteminin %18'e kadar CP kullanan yöntemlere göre daha verimli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca EP-FFD sezgiselini sınıflandırma katsayısı δ'nın 1 ile 100 arasındaki farklı değerleri arasında farklı sıralama kuralları ile de denemişler ve sınıflandırılmış alan-yükseklik ve sınıflandırılmış yükseklik-alan sıralama kurallarının diğerlerine göre daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

EP-BFD sezgiseli de farklı sıralama kuralları ve farklı amaç fonksiyonları için test edilmiştir. EP-BFD sezgiselinin sınıflandırmalı sıralama kuralları ile kullanımları sınıflandırmasız sıralama kuralları olmadan kullanımlarının tamamından ortalama olarak daha iyi sonuç vermiştir. En iyi sonuçları veren EP-BFD sezgiseli; artık alanların en verimli kullanılması amaç fonksiyonunu kullanan yöntem olduğu belirlenmiştir. Sıralama kuralı olarak da δ'nın 1ile 100 arasında değişen değerleri için sınıflandırılmış alan-yükseklik ile sınıflandırılmış yükseklik-alan sıralama kurallarını kullanan EP-BFD yönteminin en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca en iyi değerler δ'nın 21 ile 24 arasında olduğu ve 5 ile 57 arasında olduğu bölgelerde elde edilmiştir. δ'nın 60'tan büyük değerleri için kötü sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığı altında karma-uç noktalara en iyi yerleşen/azalan (C-EPBFD) adı altında karma bir yöntem geliştirmişlerdir.

Yöntemde amaç fonksiyonu olarak RS kullanılmıştır. Sıralama kriteri olarak sınıflandırılmış yükseklik-alan ve sınıflandırılmış alan-yükseklik yöntemleri sırasıyla δ'nın 1 ile 100 değerleri arasında çalıştırılır. En iyi sonuç çözüm olarak kabul edilir.

Crainic vd. 2008 yaptıkları çalışmada C-EPBFD yöntemini kullanarak tekli konteynır yükleme problemi çözmüşlerdir. Geliştirdikleri sezgiselin performansının diğer yapıcı algortimalar, meta-sezgiseller ve dal-sınır temmelli algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan yöntemler; GLS (Faroe vd. 2003), HA (Lodi vd. 2002b), S-Pack, MPV-BS ve MPV (Martello vd. 2000)'dir. Sonuçlar C-EPBFD'in diğer yapıcı sezgisellerden ve dal-sınır temelli MPV'den daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

GLS yöntemi C-EPBFD'den %2'den daha az oranda daha iyi sonuçlar göstermiştir ancak GLS'nin çalışma süresi "1" sn gibi bir süre iken C-EPBFD sezgiseli yarım saniyeden daha az bir sürede bu sonuca ulaşmaktadır. Bununla birlikte alt sınır ile C-EPBFD sonuçları arasında %5'ten daha az bir fark vardır. Kutu boyutlarının çoğunun ekipman boyutunun yarısından büyük olduğu yani alt sınır sonuçlarının en iyiye yakın olduğu problem tipinde alt sınırla C-EPBFD sonuçları arasında %1'den daha az fark vardır. Aynı problem tipinde C-EPBFD yöntemi GLS'den daha iyi sonuç vermiştir ve sonuçlar GLS ve MPV'den 10^3 kat daha az sürede elde edilmiştir.

C-EPBFD sezgiseli ihmal edilebilir bir hesaplama çabası ile mevcut sezgisel yöntemlerden daha iyi sonuç verdiği gibi Martello vd. tarafından geliştirilen daha karmaşık dal-sınır algoritmasından da daha iyi sonuçlar vermiştir. Chekanin ve Chekanin (2013) yılındaki çalışmalarında kendi yöntemleri Packer'ın Martello vd. (2000)'de önerilen yapıcı sezgisel S-PACK, Martello vd. (2000)'de geliştirilen dal ve sınır yöntemi PPV-BS, Lodi vd. (2002b)'de önerilen sezgisel HA ve Boschetti (2004)'de önerilen alt sınır LB'den genel olarak daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmayı C-EPBFD ile kıyaslayan araştırmacılar 24 test setinin 12'sinde kendi yöntemlerinin diğer 12 testde C-EPBFD yönteminin daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Bu da C-EPBFD yönteminin genel olarak iyi sonuçlar veren bir yöntem olduğunu göstermektedir. Toffolo vd. (2016) yılında birden fazla boyutlara sahip çoklu ekipman yükleme problemini bazı pratik kısıtları dikkate alarak çözmüşler ve yöntemlerini C-EPBFD'in de içinde bulunduğu iyi sonuç veren Martello vd. (2000)'nin önerdiği S-PACK, Lodi vd. (2002b)'de önerilen HA, Faroe vd. (2003)' te önerdiği GLS ve Crainic vd. (2009)'da önerdiği TS^{2}PACK le kıyaslamıştır. Bu kıyaslamaya göre de C-EPBFD hala en iyi çözüm veren yöntemler arasındadır. Araştırmacılar kendi

yöntemlerine bazı pratik kısıtlar eklendiğinden bu yöntemlerden daha verimsiz sonuç vermesinin normal olduğunu belirtmişlerdir.

1.5. Kutu Paketleme Problemi için Yapılmış Önceki Çalışmalar

Üç boyutlu kutu paketleme problemi önemli bir endüstriyel problem ve aynı zamanda kuvvetli şekilde deterministik olmayan polinomsal-zor bir problem olduğundan araçtırmacılar tarafından oldukça ilgi görmüş ve geniş şekilde çalışılmıştır. Zhao vd. 2016 yılında yayınlanan çalışmalarında 2013 yılına kadar yapılan çalışmaları özetlemişlerdir. Geniş ölçüde bu çalışmadan yararlanarak 3D-BPP ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmaları aşağıdaki gibi özetleyebiliriz;

George ve Robinson (1980) Her duvar'ın ilk kutusunu seçen ve duvar oluşturma yönteminin ilk örneklerinden biri olan sezgisel yöntem geliştirdiler. Han vd. (1986) L-Şekilli örüntü yöntemini geliştirdiler. Ivancic vd. (1989) tam sayılı programlamaya dayalı bir sezgisel geliştirdiler. Bischoff ve Marriott (1990) ekipman yükleme üzerine yapılan çalışmaları incelediler. Gehring vd. (1990) her bir duvarın uzunluğunun katman belirleyen kutu (LDB) tekniği ile belirlendiği, duvar oluşturma yöntemini kullanarak bir çalışma yaptılar. Haessler ve Talbot (1990) tek ekipmana heterojen kutuları yerleştirme sezgiseli ile yüklemeye çalıştılar. George (1992) her iterasyonda bir katman oluşturan bir sezgisel geliştirdi.

Loh ve Nee (1992) katman oluşturma yöntemi ile zayıf derecede heterojen kutuları yükseklik gruplarına göre sıraladıkları bir çalışma yaptılar. Scheithauer (1992) dinamik programlamanın gelecek durum stratejisine dayanan bir yakınsama algoritması geliştirdi. Lin vd. (1993) GA ile bir çalışma yaptılar. Hemminki (1994) duvarların genişliğine karar vermeyi sağlayan bir GA geliştirdi. Mohanty vd. (1994) tam sayılı programlama ve sütun üretimi kullanarak farklı boyuttaki ekipmalara yükleme yapan bir sezgisel çalıştılar. Morabito vd. (1994) arama ağacı ile bir sezgisel geliştirdiler. Bischoff ve Ratcliff (1995) istifleme yöntemini kullanarak yükün bir kaç farklı noktada boşaltıldığı bir çalışma yaptılar. Chen vd. (1995) ekipman içindeki kullanılmayan alanı azaltmayı amaçlayan karmaşık tamsayılı programlama ile bir çalışma yaptılar. Fekete ve Schepers (1997) ağ teorisi ve iki seviyeli arama ağacı yöntemi ile kesin çözüm önermişlerdir. Gehring ve Bortfeldt (1997) GA ve istifleme yöntemiyle kutu altının desteklendiği bir yöntem geliştirdiler. Çalışmalarında toplam

ağırlık kısıtını göz önüne almışlar. Lai ve Chan (1997) maksimum boşluk ve SA yöntemini kullanarak bir çalışma yaptılar.Bortfeldt ve Gehring (1998) Tabu arama algoritması ve duvar oluşturma yöntemi ile bir çalışma yaptılar. Çalışmalarına kutu yönü, sabitleme, istifleme ve toplam ağırlık kısıtlarını dahil ettiler. Chien ve Wu (1999) George ve Robinson (1980)'in sezgiselleri ile birlikte arama ağacı yöntemini birleştiren bir yöntem önerdiler. Chua vd. (1998) mekansal matris temsilini ve duvar oluşturma yöntemini kullanarak bir çalışma yaptılar. Lai vd. (1998) maksimum klik ve yönlendirilmiş tesadüfi adaptif arama algoritması ile bir çalışma yaptılar. Ratcliff ve Bischoff (1998) yük dayanımı kısıtını da göz önüne alarak katman oluşturma yöntemi ile bir çalışma yaptılar. Chien ve Wu (1999) boşluk alokasyonu yapan bir çalışma yaptılar. Davies ve Bischoff (1999) katman belirleyen kutu (LDB) yöntemini belirlli bir sayıdaki blokları üretmek için kullandılar. Miyazawa ve Wakabayashi (1999) yakınsama algoritması çalıştılar. Faina (2000) SA yöntemini kullandı. Martello vd. (2000) dal-sınır yöntemini kullanarak bir kesin çözüm çalıştılar. Bortfeldt ve Gehring (2001) LDB'ye dayanan bir duvar oluşturma yöntemini bir melez GA ile birlikte kullanan bir yöntem geliştirdiler. Eley (2002) açgözlü bir sezgisel ile blok düzenlemesi yapan bir arama ağacı yöntemi geliştirdi.

Gehring ve Bortfeldt (2002) duvarların GA ile temsil edildiği bir yöntem geliştirdiler ve paralel bir GA ile çözümü iyileştirmeye çalıştılar. Hifi (2002) arama ağacı ile çalışma yaptı. Lins vd. (2002) yönlü ağ temsili yöntemini kullanarak bir çalışma yaptılar. Lodi vd. (2002) TS kullandılar. Lodi vd. (2002) İki boyutlu kutu paketleme çözümü yapan bir sezgiselle katmanları oluşturan sonra bir boyutlu kutu paketleme problemi gibi önce yüksekliklerine sonra taban alanlarına göre gruplanmış kutuları yükleyen bir çalışma yaptılar ve bu çalışmayı TS ile birleştirdiler. Pisinger (2002) George ve Robinson (1980)'in sezgiselleri ile birlikte duvar derinliği ve sıra (strip) genişliğini belirleyen bir arama ağacı kullanarak duvarı oluşturan bir yöntem geliştirdi. Bortfeldt vd. (2003) blok oluşturma yöntemi ve TS kullanarak bir çalışma yaptılar. Castro Silva vd. (2003) açgözlü bir arama algoritması kullandılar. Eley (2003) sütun üretim yöntemi ve tam sayılı programlamayı kullanarak bir çözüm geliştirdi. Faroe vd. (2003) sabit boyutlu ekipman yükleme problemi için yönlendirilmiş yerel arama yöntemini kullandılar. Jin vd. (2003) hedef bir ekipmanı çözümden çıkarmak için çoklu komşuluk arama tasarladılar. Lim vd. (2003) ekipmanın kendisine ya da daha

önce yüklenmiş herhangi bir duvara yükleme yapmaya izin veren çok yüzeyli yükleme yöntemini geliştirdiler. Yeh vd. (2003) GA ve sinir ağlarını kullanarak bir çalışma yaptılar. Boschetti (2004) yeni alt sınırlar geliştirdi.Chien ve Deng (2004) kutuların dikey sıralara yüklendiği ve sonra duvar olarak birleştirildiği bir yöntem kullandılar. Boş alanların aranması ve birleştirilmesi için mekansal matris temsil yöntemi kullandılar. Fekete ve Schepers (2004) aralıklı ağ yöntemi ile kesin çözüm önermişlerdir. Mack vd. (2004) blok oluşturma yöntemiyle temel bir sezgisel ve SA yöntemi ile bir çözüm yaptılar. Brunetta ve Gregoire (2005) arama ağacı ile bir sezgisel geliştirdiler. Lim ve Zhang (2005) şekli ortalama kutu boyut oranlarından daha farklı kutuların yüklenmesini kolaylaştırmak amaçlı bir sezgisel geliştirdiler. Lim vd. (2005) yerel arama tekniği kullandılar. Moura ve Olivera (2005) yerel arama algoritması çalıştılar. George ve Robinson (1980)'de yapılan çalışmaya yeni yüklenecek kutunun genişlik alanı ve yeni oluşturulacak duvarın genişliği ile ilgili kısıtlar getirdiler. Yeung ve Tang (2005) melez bir GA geliştirdiler. Bischoff (2006) mekansal temsil ile kutu altının tamamen desteklendiği bir çalışma yaptı.

Takahara (2006) ikili değişkenlikle yerel aramalar yapan bir sezgisel kullandı. Ertek ve Kılıç (2006) çoklu ekipman boyutlu problem için ışın araması algoritması ile bir çalışma yaptılar. Crainic vd. (2006) hızlı alt sınır (fast lower bounds) bulan bir çalışma yaptılar. Fekete vd. (2007) iki aşamalı arama ağacı ile bir çalışma yaptılar. Liang vd. (2007) melez bir meta-sezgisel çalıştılar. Crainic vd. (2008) uç noktalar yöntemini kullanarak bir çözüm geliştirdiler. Parreno vd. (2008) maksimum boşluk yöntemiyle bir çalışma yaptılar. Soak vd. (2008) evrimsel algoritma ve sezgisel bir geliştirici kullandılar. Takahara (2008) ikili değişkenlikle (swap moves) yerel aramalar yapan bir sezgisel kullandılar. Wang vd. (2008) blok oluşturma ve arama ağacı yöntemlerini kullandılar. Chien vd. (2009) mekansal temsil yöntemi kullandılar. Christensen ve Rousle (2009) arama ağacı ile çoklu boşaltma noktası ve yük dayanımı kısıtlarını göz önüne alarak bir çalışma yaptılar. Crainic vd. (2009) iki kademeli bir TS ve uç noktalar temsil yöntemini kullanarak bir çalışma yaptılar. Birinci seviye TS kutuların ekipmanlara atamasını yaparken ikinci kademe TS aralıklı ağ yapısı üzerinde arama yaparak kutuların ekipman içindeki pozisyonlarını düzenlemek üzere tasarlandı. Egeblad ve Pisinger (2009) SA yöntemini kullandılar. Huang ve He (2009a) oyuk derecesi yöntemini geliştirdiler. Huang ve He (2009b) oyuk derecesi yöntemini

kullanarak yaptıkları çalışmayı geliştirdiler. Miyazawa ve Wakabayashi (2009) yakınsama algoritması ile çalışma yaptılar. Almeida ve Figueiredo (2010) doğrusal olmayan bir formülasyon ve sezgisel geliştirdiler.Amossen ve Pisinger (2010) giyotin kesme yöntemiyle bir çalışma yaptılar. Epstein ve Levy (2010) yakınsama algoritması ile çalışma yaptılar. Fanslau ve Bortfeld (2010) arama ağacı ile çözüm geliştirdiler. He ve Huang (2010) oyuk derecesi yönteminde arama alanını azaltacak bir çalışma yaptılar. Hifi vd. (2010) karmaşık tamsayılı programlama ile bir çalışma yaptılar. Kang vd. (2010) blok yükleme ile bir sezgisel çalıştılar. Parreno vd. (2010) maksimum boşluk yöntemini değişken komşuluk arama algoritması (VNS) ile birlikte kullandılar. Wu vd. (2010) kutu ve kutu rotasyonunu temsil eden kromzomların kullanıldığı, uç noktalar temelli değişken ekipman yüksekliğini göz önüne alan bir GA geliştirdiler. (2010) TS ve blok oluşturma algoritması kullanan bir sezgisel kullandılar. Ceschia ve Schaerf (2011) yerel arama tekniği kullandılar. Che vd. (2011a ve 2011b) doğrusal tam sayılı programlama ile değişken ekipman maliyetli probleme çalıştılar.

Dereli ve Das (2011) arıların yiyecek arama davranışından esinlenen GA benzeri bir çalışma yaptılar. He ve Huang (2011) oyuk derecesi yöntemine yerel arama algoritması ekleyerek bir çalışma yaptılar. Liu vd. Ren vd. (2011) ağaç arama algoritması ile birlikte bir blok yerleştirme yöntemi geliştirdiler. Crainic vd. (2011) değişken ölçü ve maliyetli ekipmanlara yükleme için alt sınırlar ve sezgisel yöntemle çözüm geliştirdiler. Burke vd. (2012) genetik programlama kullanarak bir çalışma yaptılar. Gonçalves ve Resende (2012) GA benzeri bir permütasyon sistemi ve maksimum boşluk algoritmasını kullandılar. Junqueira vd. (2012a) kartezyen koordinat sitemine dayanan bir model çalıştılar. Junqueira vd. (2012b) kartezyen koordinat sitemine dayanan çalışmalarına çoklu boşaltma noktası kısıtını eklediler. Kang vd. (2012) GA ile bir çalışma yaptılar. Lim vd. (2012) iteratif bir sezgiselle katman oluşturma yöntemini birleştirerek bir çalışma yaptılar. Thapatsuwan vd. (2012) yapay bağışıklık isstemi (AIS), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve GA kullandılar. Zhang vd. (2012) blok oluşturma sezgiseli geliştirdiler. Zhu ve Lim (2012) arama ağacı ve maksimum boşluk algoritmasını kullandılar. Zhu vd. (2012a) sütun üretimi yöntemine benzeyen, prototip sütun adını verdikleri bir yöntemle çok boyutlu ekipman-kutu paketleme problemini çözdüler. Kutu altı desteklenmesi ve değişken ekipman maliyeti gibi bir kaç yan kısıtı gözönüne aldılar. Zhu vd. (2012b) blok

oluşturma ve maksiumum boşluk yöntemi ile bir çalışma yaptılar. Baldia vd. (2012a) değişken maliyet ve hacimli ekipmanlara yükleme için bir kesin method (dal ve fiyat) ve bir sezgisel (ışın arama) çalıştılar.Liao ve Hsu (2012) problem için yeni alt sınırlar belirlediler. Gonçalves ve Resende (2013) GA ile bir çalışma yaptılar. Hasni ve Sabri (2013) melez GA ile bir çalışma yaptılar.Lim vd. (2013) aks ağırlık kısıtını barındıran bir çalışmayı sezgisel kullanarak yaptılar ancak algoritmanın içinde hem karmaşık hem de ikili doğrusal programlama formüllerinden yararlandılar. Baldia vd. (2013) temel yükleme algotritmaları için en kötü senaryo çalıştılar. Moon ve Nguyen (2013) ağırlık dengeleme kısıtını da göz önüne alarak tam sayılı programlama ile bir çalışma yaptılar. Chekanin ve Chekanin (2013) sezgisel bir yöntem geliştirdiler. Hifi vd. (2013) tamsayılı doğrusal programlama temelli sezgisel ile bir çalışma yaptılar. Feng vd. (2013) melez GA ile bir çalışma yaptılar. Valdes vd. (2013) farklı boyutlardaki ekipmanlara yükleme için tam sayılı formülasyon ve alt sınır çalıştılar.

Araya ve Riff. (2014) maksimum boşluk algoritmasını kullandılar. Paquay vd. (2014) hava kargo için karmaşık tamsayılı programlama ile bir çalışma yaptılar. Taylor vd. (2014) katman oluşturma ve karmaşık tam sayılı programlama kullandılar. Saraiva vd. (2015) katman oluşturma ile bir çalışma yaptılar. Moura ve Bortfeld (2015) GRASP ve arama ağacı kullanarak iki aşamalı bir yöntem geliştirdiler. Toffolo vd. (2016) sezgisel bir yöntem ve yerel arama ile çalışma yaptılar. Trivella ve Pisinger (2016) ağırlık dengelemeyi de gözönüne alarak yerel arama sezgiseli geliştirdiler. Sheng vd. (2017) yükleme önceliği ve tam yükleme gibi kısıtları dikkate alarak SA yöntemini de kullanarak bir çalışma yaptılar.

Literatür incelemesinde aşağıdaki çalışmaların uç noktalar (EP) yönteminden yararlandıkları belirlenmiştir;

Wu vd., (2010) değişken yüksekli ekipman yükleme için GA ile birlikte EP yöntemini kullanmışlar ve pratik kısıtlara yer vermediklerini belirtmişlerdir. Bortfeldt 2011 yılında TS ile araç rotalama problemi çözdüğü çalışmasında EP yönteminden yararlanmıştır. Toplam ağırlık limiti, istifleme (kırılgan/kırılgan değil), alt desteği ve dönme kısıtlarını göz önüne almışlardır. Perboli vd. 2011 yılında aç gözlü bir adaptif arama algoritması içinde C-EPBFD yönteminden yararlanmışlardır. Çalışmalarında çoklu ekipman yükleme problemi çözmüşler ancak pratik kısıtları göz ardı etmişlerdir.

Crainic vd. 2012 yılında yaptıkları çalışmada Perboli vd. tarafından yapılan çalışmayı birden fazla boyutlara sahip çoklu ekipman yükleme problemine genişletmişler.

Ancak yine pratik kısıtları dikkate almamışlardır. Baldia vd. (2012) karmaşık tam sayılı programlama kullanarak çözdükleri üç boyutlu sırt çantası probleminde EP'den yararlanmışlar ve ağırlığı merkezde tutmaya çalışmışlar. Wei vd. (2012) Üç boyutlu şerit paketleme probleminde EP'dan yararlandıkları bir aç gözlü arama algoritması ve blok oluşturma stratejisi geliştirdiler.

Çalışmalarında sadece kutu yönü kısıtını dikkate almışlar. Trivella ve Pisinger (2016) Küçük problemler için karmaşık tamsayılı doğrusal programlama kullanmış, büyük problemler için bu yöntemin yetersiz kalması sebebiyle aralıklı ağ ve EP'den yararlanarak ağırlığı dengeledikleri bir çalışma yapmışlar.

Paketleme problemlerinde EP temelli başlangıç çözümlerinin kullanıldığını ancak ağırlık dengelemenin zayıf olarak literatürde yer aldığını belirtmişlerdir. Ağırlık dengeleme haricindeki diğer kısıtları göz ardı etmişlerdir. Sheng vd. (2017) Üç Boyutlu, tek ekipman boyutlu sırt çantası problemini içinde C-EPBFD olan bir kutu yönü, yük sabitliği, giyotin kesme düzlemi, tam yükleme ve yükleme önceliği kısıtlarını kapsamışlar ancak ağırlık ile ilgili kısıtları gözardı etmişlerdir. Mahvash vd.(2017) üç boyutlu araç rotalama problemi için sütun üretme yöntemi ve EP kullanmışlar çoklu boşaltma noktası, yük sabitliği, kırılganlık ve toplam ağırlık kısıtlarını dikkate almışlar ancak ağırlık dağılımı ve aks ağırlığı kısıtını göz ardı etmişlerdir.

Kırılganlık ya da yük dayanımı kısıtlarını dikkate alan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Bischoff ve Ratcliff, 1998 yılında daha önceki bir çalışmalarının üstüne yük dayanımı kısıtını içeren bir çalışma yapmıştır. Gendrau vd. 2005 yük dayanımını kırılganlık olarak dikkate almış. Bischoff, E. 2006, özellikle yük dayanım kısıtını dikkate alan yapıcı bir sezgiselle üç boyutlu yükleme problemi çalışmıştır. Tarantilis vd., 2009 araç rotalama problemi için sezgisel geliştirmişler kırılganlık kısıtını dikkate almışlardır. Ceschia ve Schaerf 2011, yük dayanımı kıstını dikkate almışlar. Bortfeld, A., 2011 araç rotalama problemi çözmüşler kırılganlık kısıtını göz önüne almışlar. Junqueira

vd. 2012, ekipman yükleme problemi için matematik model kullandıkları yöntemde yükdayanımı kısıtını dikkate almışlar. Paquay vd. 2014, yük dayanımını kırılganlık olarak dikkate almışlar. Bortfeldt vd. 2015, araç rotalama problemini kırılganlık kısıtını dikkate alrak çözmüşler. Zachariadis, vd. 2015 araç rotalama problemi içinde kırılganlık kısıtını kullanmışlar.

Martinez vd. 2015 GRASP ile çoklu boşaltma noktası için yük dayanımı çalışmışlar. Mahvash vd. 2017 sütun üretme yöntemiyle kırılganlık kısıtını göz önüne almışlardır.

Yükleme problemlerinde pratik kısıtları göz önüne alan çalışmalar içinde kutu yönü, toplam ağırlık, yük sabitliği ve ağırlık dayanımı kısıtları göreceli olarak çokça yer almasına rağmen ağırlık dağılımı kısıtları göreceli olarak az çalışılmıştır.

Son yıllarda bazı araştırmacılar farklı tipteki paketleme problemlerini ağırlık dengelemeyi dikkate alarak çözmüş olsa da, muhtemelen zaten NP-Zor olan probleme ilave bir karmaşıklık kattığından literatür hala oldukça sınırlıdır (Trivella ve Pisinger 2016). Ağırlık dağılımı kısıtları içinde aks ağırlığı kısıtı çalışmalarda genel olarak göz ardı edilmiştir. Aks ağırlığı kısıtını dikkate alan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Lim vd. (2013) duvar oluşturan bir GRASP ve tamsayılı doğrusal programlama ile aks dağılımını dikkate alan bir çalışma yaptılar. Xiang vd.(2014) blok oluşturma temelli bir yöntemle ağır yüklerin yüklenmesi için aks ağırlığını da dikkate alan bir çalışma yapmışlar. Pollaris vd. (2016) kısıtlı kapasiteli araç rotalama problemini karmaşık tamsayılı doğrusal programlama ile çözmüşler ve aks ağırlığı kısıtını dikkate almışlardır. Alonso vd. (2017) matematiksel model ile aks ağırlığını dikkate alan bir çalışma ile çoklu ekipman yükleme problemi çözmüşler ancak dayanım kısıtını dikkate almamışlardır.

Literatür incelemesi sonucunda C-EPBFD temelli bir yöntemle aks ağırlığı kısıtını göz önüne alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Kutuların birbirleri üzerine yaptıkları basınç ve buna karşı kutu dayanımlarını dikkate almayı gerektiren ağırlık dayanımı kısıtı ile birlikte C-EPBFD yöntemi temelli bir çalışmaya da rastlanmamıştır. Literatürdeki kıyaslamalara göre kısa sürede oldukça iyi sonuçlar veren C-EPBFD yöntemini temel alan bir yaklaşımla aks ağırlığı ve yük dayanımı kısıtlarını dikkate almak gerçek problemlerin çözümüne katkı sağlayacaktır.

Gerçek kısıtların eklenmesi ile birlikte yavaşlaması bekelenen çözüm yönteminin temelini hızlı çözüm üreten bir algoritma ile oluşturmak zamanın çok önemli olduğu ve sürekli yüklemelerin yapıldığı günümüz endüstrisinde avantajlı olabilir. Bu çalışmada çoklu ekipman yükleme problemi için geometrik kısıtlarla birlikte aks ağırlığı, yük dayanımı, yük sabitliği ve toplam ağırlık pratik kısıtlarını da dikkate alan, C-EPBFD temelli bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. PRATİK KISITLI, UÇ NOKTALAR TEMELLİ YÜKLEME ALGORİTMASI

Yapılan araştırmalara göre meta-sezgisel yöntemler yüksek hacim verimliliği sağlamasına rağmen pratik kısıtlarla çalışma konusunda yeteri kadar etkin değiller. Bununla birlikte insan bilgisi ile yönlendirilmiş sezgisel algoritmalar, metasezgisellerle kıyaslandığında bir miktar daha düşük verimlilik sağlamasına rağmen, özellikle yük sabitliği ve yük dayanımı gibi pratik kısıtılarla yükleme yapma konusunda meta-sezgisellere üstünlük sağlamaktadır (Liu vd. 2011). C-EPBFD sezgiseli iyi sonuçlara ulaşan bir yöntem olarak literatüre girmiştir. Aynı zamanda benzer yöntemlere göre de daha kısa sürede çözüm vermektedir. Crainic ve arkadaşları tarafından 2008 yılında yapılan çalışmada geliştirilen yöntemin dikkate aldığı yükleme kısıtları aşağıdaki gibidir;

1. Tüm kutular tamamıyla ekipmanın sınırları içinde olmalıdır.
2. Ekipmana yüklenen kutular bir birleri ile çakışmamalıdır.
3. Tüm kutular bir ekipmana atanmalıdır.

Bu kısıtlar bir grup kutunun tamamının bir grup ekipmana çakışmadan yerleştirebilmesine rağmen gerçek bir taşıma için gerekli kısıtları sağlamamaktadır.

2.1. Önerilen Yöntemde Problem Kısıtları

Amaç bir yerden diğer bir yere taşınacak yüklerin yeteri kadar sayıda ekipmana yüklenmesi olduğunda geometrik kısıtların yanında bir takım ilave kısıtlar da probleme dahil olur. Bu kısıtların en yaygın olanı ekipmanlara yüklenecek malzemelerin ağırlıklarıdır. Uluslararası taşımaclık kuralları ve yükleme yapılacak ekipmanın fiziksel dayanımları doğrultusunda bir ekipmanın içine yüklenebilecek en büyük toplam ağırlık miktarı sınırlıdır. Bu çalışmada dikkate alınacak ilk ilave kısıt toplam ağırlık kısıtı olacaktır. Ağırlık kısıtının probleme dahil edilmesi ile birlikte ağırlık ve hacimin eş zamanlı olarak optimize edilmesi gerekecektir. Taşımada ağırlıkla ilgili ikinci bir kısıt yükleme yapılacak ekipmanın özelliklerine göre yükün

ekipman içindeki dağılımıdır. Konteynır gibi bir takım kaldırma araçları ile elleçlenen ve yük gemisi gibi bazı başka taşıma araçlarına yüklenen ekipmanlar için bu kısıt ekipman içinde dengeli bir ağırlık dağılımı olabileceği gibi bir çekici ile hareket ettirilen dorse benzeri taşıma ekipmanlarında, ekipman ile yol arasındaki bağlantıyı sağlayan aksların yük dayanımına ve konumlarına uygun bir dağılım da olabilir.

Eşit dağılım yapılmaya çalışılan ekipmanlarda yüklerin ağırlık merkezinin ekipmanın geometrik merkezine mümkün olduğu kadar yaklaştırılması hedeflenir (Liu vd. 2011).

Aks ağırlık dağılımında ise her ekipmanın tasarımına uygun kendine özel bir dağılımı vardır ancak bu dağlım genellikle eşit bir dağılım olmadığından ağırlık merkezine yakın dağılım belirlemek yeterli olmayacaktır. Karayolu taşımasına konu olacak tüm yüklemelerde kullanılan dorselerin her bir aksının taşıyabileceği en büyük ağırlık limitlidir (Lim vd. 2013). Çalışmada dikkate alınacak ikinci kısıt aks ağırlığı kısıtıdır. (Amiouny vd., 1992) uçak yüklemeleri için ağırlık dağılımını kısıt olarak almıştır. Tek boyutta mümkün oldugu kadar ağırlığı merkeze yaklaştırmaya çalışmışlardır. Gehring vd. (1990) duvar oluşturma yöntemi ile bir çalışma yapmışlar ve burada eşit yük dağılımı sağlamaya çalışmışlardır. Benzer bir çalışma Gehring ve Bortfeldt (1997)'de yapılmıştır. Davies ve Bischoff (1999) yaptıkları çalışmada blokların yerini değiştirerek ekipman içinde yük dengelemeye çalışmışlardır. Lim vd. (2013) duvar oluşturan bir GRASP ve tamsayılı doğrusal programlama ile aks dağılımını dikkate alan bir çalışma yaptılar. Bu çalışmada duvarların yerlerini değiştirerek aks ağırlığını dengelemeye çalıştılar. Xiang vd.(2014) blok oluşturma temelli bir yöntemle ağır yüklerin yüklenmesi için aks ağırlığını da dikkate alan bir çalışma yapmışlar. Bu çalışmalarında oluşturdukları blokların yerlerini değiştirerek ağırlık limitlerini sağlamaya çalıştılar. Pollaris vd. (2016) kısıtlı kapasiteli araç rotalama problemini karmaşık tamsayılı doğrusal programlama ile çözmüşler ve aks ağırlığı kısıtını dikkate almışlardır. Alonso vd. (2017) matematiksel model ile aks ağırlığını dikkate alan bir çalışma ile çoklu ekipman yükleme problemi çözmüşler.

Yapılan paketlemenin taşımacılık kuralları ve ekipman özelliklerine uygun olarak toplam ağırlık limitini geçmemesi ve ağırlığın ekipman içinde uygun dağılması yanında, yüklenen kutuların basınç dayanımları da uygun bir yükleme için dikkat edilmesi gereken bir kısıttır.

Yükleme problemlerinin kutu çeşitliliğine bağlı olarak farklı ağırlık ve farklı ağırlık dayanımındaki kutuların birbirleri üzerine yaptığı basınçların dikkate alınması ve belirli ağırlıktaki kutunun bu ağırlığa dayanabilecek kutular üzerine yüklenmesi gerekmektedir. Aksi taktirde dayanımından daha fazla yükle yüklenen kutunun hasarlanması, içindeki ve/veya etrafındaki yüklerin hasarlanmasına sebep olabilir.

Bununla birlikte hasarlanarak devrilmiş yüklerin boşaltma noktasında elleçlenmesi de güçleşmekte, iş güvenliği riskleri oluşturmaktadır. Yük dayanımı bir kutunun hasarlanmadan üzerinde taşıyabileceği ağırlık dayanımının ölçüsüdür. Ratcliff ve Bischoff, 1998 yılında blok oluşturmayı içeren ve ağırlık dayanımını kısıt olarak alan sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu sezgiselde kullanıcı tarafından ağırlıkları belirlenen iki kriter kullanmışlardır. Kriterlerden biri yükleme alanının ne kadar verimli kullanıldığı ile ilgili iken ikinci kriter yüklenecek kutunun yeni yüklenecek kutuları ne kadar desteklediğidir (Ratcliff ve Bischoff, 1998). Yapılan bir diğer çalışmada yükleme alanının yüksekliği de bir önceki amaç fonksiyonuna ilave edilmiştir (Davies, 1999). Yükleme noktası yükseldikçe yük dayanımı önemini yitirmektedir. Bischoff, 2006 yılında bir çalışma daha yayınlamıştır ve bu çalışmada da yük dayanımı alttaki kutuların dayanımı ve yükleme yüksekliği ile yüklenecek kutu yüksekliğini göz önüne alan bir kriterle amaç fonksiyonunda göz önüne alınmıştır. Çalışmada dikkate alacağımız üçüncü kısıt yük dayanımı kısıtıdır.

Ekipman içine yapılacak paketlemede dikkate alınması gereken diğer bir kısıt da yükün sabitliğidir. Yükün sabitliği iki boyutludur. Birinci boyut aynı zamanda durağan sabitlik olarak da adlandırılan dikey sabitliktir. Yüklenen kutuların tabanının ekipman tabanı veya altındaki diğer kutular tarafından tamamen desteklenmesi gereklidir. Ekipman içine yüklenen kutuların tabanları tam olarak desteklenmediğinde yükler taşıma sırasında birbirlerine zarar verebilmektedir. Ayrıca tam desteklenmeyen kutular yükleme veya boşaltma esnasında devrilme riski oluşturmaktadır. Devrilen ekipmanlar; içindeki malzemelerin hasarlanması, yükleme ekipmanının hasarlanması veya elleçleme yapan ekipman veya personelin zarar görmesine sebep olabilir. İkinci boyut dinamik sabitlik olarak da adlandırılan yatay sabitliktir.

Ekipman hareket ettiğinde yükün sabit kalabilmesi, X ve Y eksenleri boyunca hareket etmemesi için gerekli sabitlik türü olduğundan dinamik sabitlik olarak

adlandırılmıştır. Yüklü kutuların kenarlarının da diğer kutular veya ekipman duvarları tarafından desteklenmesi de bir yük sabitlemesi kısıtı olarak alınabilir. Ancak uluslararası taşıma kuralları gereğince tüm yükler sabitleme ekipmanları tarafından bağlanmak zorunda olduğundan bu kısıt bazı durumlarda önemini yitirmektedir. Bu sebeple çalışmada dikkate alınacak diğer bir kısıt kutu tabanının diğer kutu yüzeyleri veya ekipman tabanı tarafından desteklenmesidir.

Eklenecek pratik kısıtların bir diğeri istifleme kısıtıdır. Bu kısıt yük dayanımı ve alt desteğinden bağımsız olarak tasarımları gereği biri diğerinin üzerine yüklenemeyen kutuların aynı ekipmana yüklenmesini kapsar. Her kutunun alt yüzeyinde zemine değecek alanları ve üst yüzey alanları farklı tasarıma sahip olabilir. Örneğin bir kutu tipi sadece 4 ayak üzerinde zemin üzerinde dururken diğer bir kutu tipi zemine bir palet yüzeyiyle temas etmek durumunda olabilir. Üst yüzeyleri de benzer şekilde üstüne yüklenecek kutuya farklı dayanım alanı sunan bir tasarıma sahip olabilir. Her bir kutunun altındaki kutuya basınç yapacağı alanlara basınç alanı ve üstündeki kutuya dayanım göstereceği alanlara da dayanım alanı dersek tüm kutuların basınç ve dayanım alanlarına göre birbirleri üzerine yüklenip yüklenemeyecekleri tanımlanmalıdır.

Bischoff ve Ratcliff (1995) yaptıkları çalışmada bazı kısıtların paketleme örüntüsünü direkt etkilediklerini ve tek ekipmanı yüklerken doğrudan göz önüne alınması gerektiğini diğer kısıtların kutuların ekipmanlara dağıtılması ile alakalı olduğunu belirtmişlerdir. Yük sabitliği, istifleme kısıtları, yük dayanımı ve ekipman içi ağırlık dağılımı birinci gruba girerken. Ağırlık ve hacim dengesi, tam-yükleme gibi kısıtlar ikinci gruptadır.

Yukarıda sayılan pratik yükleme kuralları rota üzerinde herhangi bir yerde karaloyu ile taşınacak bir ekipmana yüklenen bir çok üç boyutlu kutu paketleme problemi için geçerlidir.

Bu sebeple yüklemede kısa sürede iyi çözümler veren yapıcı bir sezgisel olan uç noktalar temelli C-EPBFD yöntemine yukarıda bahsi geçen kısıtların eklenmesiyle yapılacak bir çalışma pratik yükleyiciler için verimlilik yaratacak bir araç olabilir. Ayrıca C-EPBFD yöntemi diğer yöntemlere göre daha kısa sürede sonuç verdiğinden, pratik yükleme kıstılarının eklenmesi için diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır.

Yeni kısıtlar ilave edilen yöntem daha fazla hesaplama işlemi yapacağından kısıtsız çalışan yöntemlere göre yavaş çalışacaktır. Gerçek yükleme problemlerinde zaman kısıtı olması sebebiyle, C-EPBFD algoritmasının büyük ölçekli gerçek yükleme problemleri için kendisinden daha yavaş sonuç veren yöntemlere göre avantajlı olması beklenmektedir.

Buna göre C-EPBFD yönteminin gerçek bir taşımaya temel oluşturabilmesi için; aşağıdaki kısıtların tamamını kapsayacak şekilde geliştirilmesi planlanmıştır. 3D-BPP için karılaşılabilecek yükleme kısıtlarına daha önceki bölümlerde detaylı olarak bahsedilmiştir. Yeni yöntemde bu kısıtlardan sadece yukarıda açıklanan en genel olanların kapsanması amaçlanmıştır. Buna göre çalışmada kapsanacak kısıtlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Tüm kutular herhangi bir bir ekipmana atanmalıdır. i=1...n yüklenecek kutular ve S çözüm olmak üzere; Her i ϵ S olmalıdır.
2. Tüm kutular Denklem (2.1)'de tanımlandığı gibi tamamıyla ekipmanın sınırları içinde olmalıdır.

$$y_e + d_i <= D,\ x_e + w_i <= W,\ z_e + h_i <= H \quad (2.1)$$

3. Ekipmana yüklenen kutular bir birleri ile çakışmamalıdır. Diğer bir ifade ile üç eksende aynı anda kesişim noktası olmamalıdır. Denklem (2.2) kutu uzantılarını tanımlamaktadır.Denklem (2.3), (2.4) ve (2.5) üç eksende aynı anda çakışma olmaması gerektiğini tanımlar.

$$A= ye,\ B= ye + di,\ C= xe,\ D= xe + wi,\ E= ze,\ F= ze + hi \text{ olmak üzere;} \quad (2.2)$$

İki farklı n ve k kutularına ait doğru parçaları $ABn \cap ABk \neq 0$ ve $CDn \cap CDk \neq 0$ ise;

$$EFn \cap EFk = 0 \text{ olmalıdır.} \quad (2.3)$$

İki farklı n ve k kutularına ait doğru parçaları $ABn \cap ABk \neq 0$ ve $EFn \cap EFk \neq 0$ ise;

$$CDn \cap CDk = 0 \text{ olmalıdır.} \quad (2.4)$$

İki farklı n ve k kutularına ait doğru parçaları CDn∩CDk ≠ 0 ve EFn∩EFk ≠ 0 ise;

ABn∩ABk = 0 olmalıdır. (2.5)

4. Yüklenen her kutunun tabanı ya ekipman tabanı tarafından ya da altındaki kutular (Sk) tarafından tamamen desteklenmelidir. Eğer ze ≠ 0 ise;

∑ (YASk∩YAi) = YAi olmalıdır. (2.6)

5. Ekipman E'ye yüklenen toplam kutu ağırlığı ekipman ağırlık limitini geçmemelidir. Her k ϵ E olmak üzere;

∑ gk < = G olmalıdır. (2.7)

6. Aks ağırlık sınıfına yüklenen kutuların toplam ağırlığı aks grubu toplam ağırlık limitini geçmemelidir. Her k ϵ Ggi olmak üzere;

∑ gk < = Ggi (gi = 1....4) (2.8)

7. Yüklenecek kutu i'nin basınç alanı ile altını destekleyen kutu bSk'ların basınç-dayanım alarındaki dayanımların en küçüğü, i kutusunun o noktaya uyguladığı basınç (pi)'den büyük veya eşit olmalıdır.

En Küçük (bSk) > = pi, k = 1...n (2.9)

8. Basınç ve dayanım alanlarına göre, kutu tasarımı gereği sadece bir birleri üzerine yüklenmesine izin verilen kutular üst üste yüklenebilir. AKL alt kutu listesi olmak üzere; i kutusunu destekleyen her b_{sk} ϵ AKLi olmalıdır.

2.2. Problem Girdileri

Yeni modelin tüm kısıtları sağlayarak uygun bir çözüm sunabilmesi için aşağıdaki girdiler modele tanımlanmıştır.

1. Yüklenecek ekipmanın boyutları : Yükleme yapılacak ekipmanın boyutları girdi olarak modele tanımlanmıştır. Test problemi olarak kullanılacak gerçek yüklemelerde kullanılmış olan ekipmanın derinlik (D), genişlik (W) ve yükseklik (H) ölçüleri sırasıyla 1360 cm, 240 cm ve 300 cm olmak üzere boyutları modele girilmiştir.

2. Yüklenecek ekipmanın toplam ağırlık limiti : Test problemi olarak kullanılacak gerçek yüklemelerde kullanılmış olan ekipmanın teknik özellikleri ve taşıma yapılan rotada izin verilen azami ağırlık olan 24000 kg ekipman toplam ağırlık limiti olarak modele girilmiştir.

3. Yüklenecek ekipman aks yoğunluk grubu hacim ve ağırlık limiti : Her bir ekipmanın kendine özgü aks sayısı ve akslar arasındaki mesafesi vardır. Bu mesafelere uygun olarak ekipmanın her bir yükleme metresinde olması gereken en büyük ağırlık dağılımı çıkarılabilir. Bu çalışmada ağırlık dağılımı aşağıdaki gibi olan bir ekipman örnek olarak alınmıştır. Tablo 2.1.'deki ilk satır ekipmanın uzunluğunu, ikinci satır her bir yükleme metresine düşen ağırlık limitini ifade etmektedir. Üçüncü satırda ekipmanlar arasında dengelemeyi kolaylaştırmak amacıyla ağırlık limitleri birbirine yakın olan yükleme metreleri gruplanmıştır. Ağırlık dağılımındaki ortalama yük taşıma limiti akslara olan uzaklık veya yakınlıkla değiştiğinden birbirine yakın noktalarda ağırlık limiti de birbirine yakın olacaktır. Bu durum bize her bir yükleme noktasını ağırlık limiti anlamında gruplama imkanı tanır. Birbirine yakın ağırlık limiti olan bölgeler aynı gruba dahil edilebilir. Tablo 2.1.'deki aks ağırlık grubu satırı 4 farklı grubu göstermektedir. Ekipmanın uzunluğu boyunca birbirine yakın ağırlık limiti olan 0-300, 301-600, 601-1000, 1001-1360 metreler arası 4 farklı gruba ayrılmıştır. Yüklenebilir ağırlık limiti sırasıyla 1., 2., 3. ve 4. gruplarda toplam 3600, 5400, 10200 ve 4800 kg olarak tanımlanmıştır. Tablo 2.1.'de aks grubu yoğunluk sınıfları (AGYS) ve limitleri tanımlanmıştır.

Tablo 2.1. Aks grubu yoğunluk sınıfları

Ekipman Uzunluğu (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13,6
Yük Limiti (ton)	1,1	1,2	1,3	1,7	1,8	1,9	2,5	2,5	2,7	2,5	1,4	1,4	1,3	0,7	
Aks Ağırlık Grubu	Grup 1			Grup 2			Grup 3				Grup 4				
Toplam Ağırlık Limiti (ton)	3,6			5,4			10,2				4,8				
Ağırlık Grubu Yoğunluğu (kg/m3)	166,7			250,0			354,2				185,2				



4. Yüklenecek kutu boyutları ve ağırlıkları : Yüklenecek kutulara ait derinlik (d_i) genişlik (w_i), yükseklik (h_i) ve ağırlık (g_i) bilgileri her bir problem ve her bir kutu için modele tanımlanmıştır.

5. Kutu yük dayanımları : Her bir problem için yüklenecek kutuların her birinin üzerine konan yüke karşı gösterebildiği basınç dayanımları cm^2 başına kg cinsinden modele tanımlanmıştır. Problemlerde yer alan kasalara ait dayanım bilgileri aşağıdaki tablodaki gibidir. Kutu türü 5 değişken boyut ve dayanımlara sahip karton kutu türünü temsil etmektedir. Bu kutulara ait dayanımlar, ekipman yüksekliğinin kutu yüksekliğine oranının ağırlığı ile çarpılması ve sonucun kutu dayanım alanına oranlanması ile bulunur.

Tablo 2.2. Kutu dayanımları tablosu

Kutu Türü	Basınç Dayanımı (kg/cm^2)
1	1,04
2	1,04
3	1,04
4	0,74
5	$(H/h_i * g_i) /(2*2*d_i*w_i)$
6	27
7	27
8	18
9	36
10	0,957
11	36
12	0,34
13	0,34

6. Kutu türü ve istifleme kuralları: Her bir kutunun tarasımı gereği alt yüzeyinde basınç alanları ve üst yüzeyinde basınç-dayanım alanları mevcuttur. Bu alanlar her bir kutu için modele tanımlanmıştır. Ayrıca her bir kutu türü içinn tasarım gereği hangi kutuların altını detekleyebileceği bilgisi de modele tanımlanmıştır. EK-C kutu türlerine ait basınç dayanım alanları tanımları ile altına yüklenebilecek kutu listesi tanımlarını göstermektedir. Kutu türü ve istifleme kuralları ile ilgili bir diğer detay;

direkli kutu olarak adlandırılan dört kenarında taşıyıcı sütunların olduğu ve yük dayanımlarının bu sütunlarda olduğu kutu tiplerinin altına sadece bir kutu yüzde yüz çakışma koşuluyla konulabilir. Diğer kutu tiplerinin altı basınç dayanımları kutuyu taşımak şartıyla bir kaç farklı kutu tarafından desteklenebilir.

2.3. Yeni Kısıtlarla Birlikte Yüklenecek Kutuların Sıralanması

Ağırlık kısıtının probleme dahil edilmesiyle birlikte gerçek verimlilik ancak hacim ve ağırlık kısıtlarının eş zamanlı en iyilenmesi ile sağlanabilir. Aksi taktirde bir ekipman ağır ancak hacim olarak küçük malzemelerle yüklenirken diğer bir ekipman hacimli ancak hafif malzemelerle yüklenebilir.

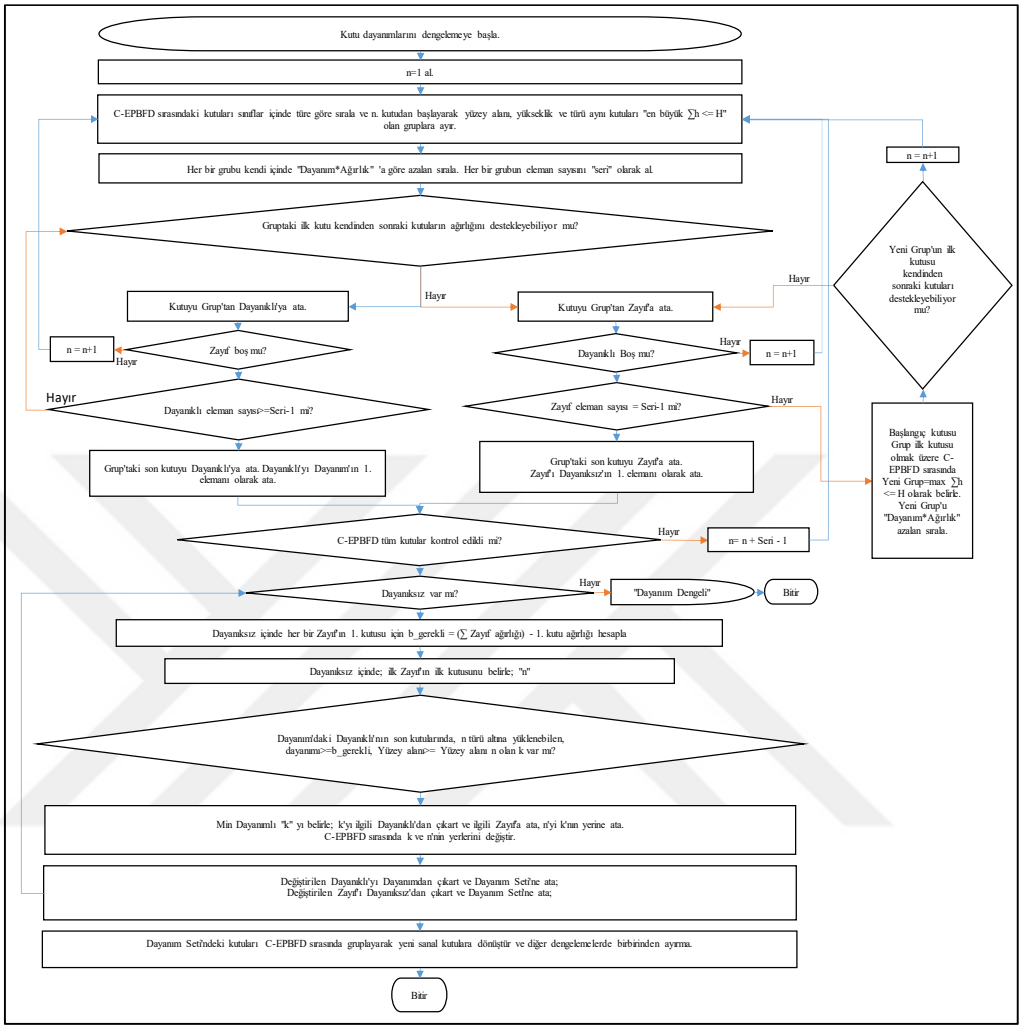
Sırasıyla ilk ekipman hacim anlamında verimsiz yüklenmişken ikinci ekipman ağırlık limitini verimsiz kullanmış olur. Bunun yerine hacim ve ağırlığın dengeli dağıtılması ekipman kullanımını en verimli hale getirecektir.

Yüklenecek toplam ağırlık ve toplam hacimin ekipmanlar arsında dengeli dağıtılmasına benzer olarak kutu dayanımlarının da ekipmanlar arasında mümkün olduğu kadar dengeli dağıtılması yükleme verlimliliğini arttıracaktır. Başlangıç sıralamasını yüzey alanı ve yüksekliğe göre yapan C-EPBFD yöntemindeki başlangıç sıralamasında ekipmanlara atanan kutular arasında dayanım dengesizlikleri olabilir. Bu sebeple ekipman içindeki ağırlık/ağırlık dayanımlarını gerektiği kadar dengeleyecek bir başlangıç sıralamasına ihtiyaç vardır.

İyi çözümlere kısa sürede ulaşan C-EPBFD yönteminin avantajlarından birisi başlangıç sıralamasıdır. Bu sebeple ağırlık ve ağırlık dayanımını dengelerken mümkün olduğu kadar C-EPBFD yönteminde belirlenen sıralamanın en az değiştirilmesi amaçlanmıştır. Hem hacim hem de ağırlık limitlerinden kısıta giren yükler öncelikle C-EPBFD yöntemindeki sınıflandırılmış alan-yükseklik sıralamasına göre sıralanır. Sonrasında bu ilk sıraya uygun olarak ağırlık dayanımı ve hacim/ağırlık dengelemeleri sırayı en az değiştirecek şekilde yapılır.

2.4. Dayanım Dengeleme

Kutu dayanımları C-EPBFD yönteminin verdiği başlangıç sırasında ard arda gelen kutularda birbirini desteklemeyecek kadar dengesiz dağıtılmış olabilir. Bu sebeple bu



Şekil 2.1. Dayanım dengeleme algoritması

başlangıç sıralamasında zayıf kutuları destekleyecek dayanıklı kutuları sırasal olarak zayıf kutulara yaklaştıracak bir sıra değişikliği yapmak amaçlanmıştır. Sırasal olarak kendinden sonra gelen aynı tür ve eşit yüzey alanına sahip kutuların toplam yüksekliği ekipman yükseklik limitini geçmeyecek şekilde en büyük yüksekliğe ulaşıncaya kadar gruplanmıştır. Her bir grup içindeki kutuların yük dayanımları ve ağırlıkları çarpımları azalan sıralanmıştır. Bu sıralamada grup içinde kendinden sonraki kutuların ağırlığını ekipman tavanına kadar yüklendiğinde destekleyebilen ve destekleyemeyen kutular tespit edilerek sırasıyla dayanıklı ve zayıf seriler olarak sınıflandırılmıştır. Kendinden sonraki kutuların ağırlığını destekleyebilen kutular dayanıklı kutu serisi, destekleyemeyen kutular zayıf kutu serisi olarak belirlenmiştir. Bir kutu grubunun zayıf bir seri olarak belirlenmesi için her bir grup üyesinin ekipman tavanına kadar

kendinden sonraki kutuların ağırlığını destekleyemiyor olması şartı aranır. Zayıf ve dayanıklı serilerin tanımlaması yapıldığında zayıf seriler dayanıksız olarak adlandırılan bir kümeye, dayanıklı seriler dayanım olarak adlandırılan bir kümeye atanır. Eğer dayanıksız kümesi boş değilse dayanıksız ve dayanım kümeleri elemanları arasında bir değişim yapılarak dayanım dengelenmeye çalışılır.

Dayanıksız kümesi içinde ilk zayıf serisinin ilk kutusu "n" belirlenir. Bu kutunun kendinden sonraki kutuları taşıyabilmesi için sahip olması gerekli dayanım (gd) taşıyacağı kutuların ağırlıkları toplamının dayanıklı kutunun toplam dayanım alanı ile n'in basınç alanı çakışma yüzeyine bölünmesiyle hesaplanır. Dayanım kümesindeki dayanıklı serilerinin son kutularında istifleme kısıtlarına göre n türü altına yüklenebilen, dayanımı gd'ye eşit ya da daha büyük, yüzey alanı n'nin yüzey alanına eşit ya da daha büyük olan "k" kutuları belirlenir. Eğer birden fazla "k" varsa içlerinden en küçük dayanımlı olan seçilir ve n ile k karşılıklı değiştirilir. k ilgili zayıf serisinin, n ilgili dayanıklı serisinin elemanı olarak tespit edilir. Yeni seriler dayanım seti olarak tanımlanır ve zayıf seri dayanıksız kümesinden dayanım setine, dayanıklı seri dayanım kümesinden çıkartılarak dayanım seti kümesine atanır. Değişim yapılan her bir dayanıklı ve dayanıksız seri C-EPBFD yönteminin verdiği başlangıç sırasında gruplanmıştır. Gruplanan yeni kutular sanal kutu olarak adlandırılmıştır. Her bir sanal kutunun ağırlığı kendisini oluşturan kutuların toplam ağırlığı, hacmi de kendisini oluşturan kutuların toplam hacmi olarak belirlenmiştir. Dayanım dengeleme algoritması Şekil 2.1'deki gibidir.

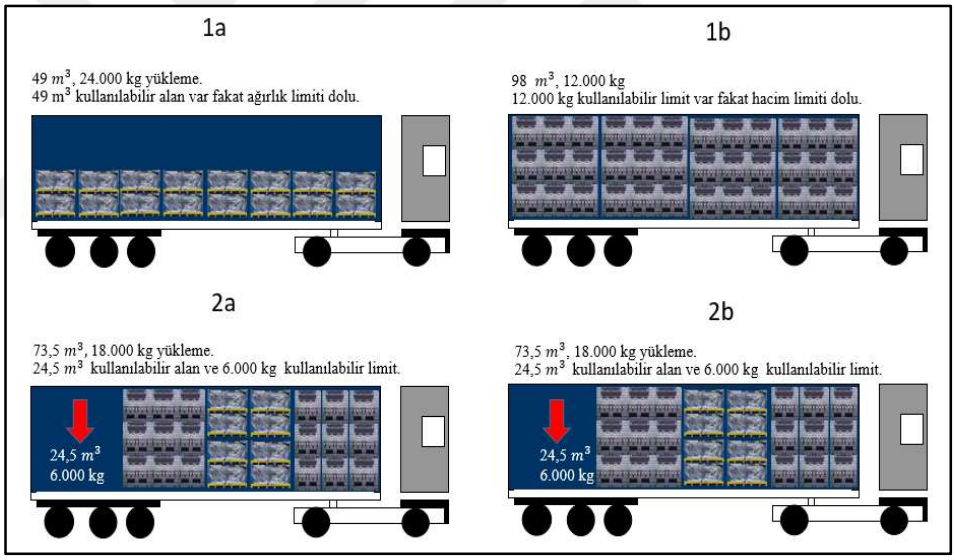
2.5. Hacim ve Ağırlığın Dengelenmesi

Ağırlık veya hacimin tek başına en iyilenmesi bazı yükler için verimsizlik anlamına gelmektedir. Örneğin Şekil 2.2'de 98 m^3 ve 24000 kg limitli bir ekipmanın hacim/ağırlık dengesini dikkate alan ve almayan yükleme durumu gösterilmiştir. Şekil 2.2-1a ve Şekil 2.2-1b'de iki farklı kutu türünden toplam 36.000 kg ağırlığında ve 147 m^3 hacimli bir yükün ağırlık/hacim dengelenmeden yüklenmesi gösterilmiştir. Şekil 2.2-2a ve Şekil 2.2-2b'de ise aynı yükün hacim ve ağırlık dengeli olarak yüklenmesi durumu gösterilmiştir. Şekil 2.2-1a'daki ekipman 49 m^3 ve 24.000 kg yükle yüklenmiş, ağırlık limiti olan 24.000 kg'ı doldurduğu için içinde müsait hacim

olmasına rağmen ilave bir kutu yüklenememektedir. 49 m^3'lük kullanılabilir hacimden faydalanılamamıştır.

Şekil 2.2-1b'deki ekipman 98 m^3 ve 12.000 kg yükle yüklenmiş ve hacim limiti olan 98m3'ü doldurduğu için ilave bir kutu yüklenememektedir. 12.000 kg kullanılabilir ağırlık limitinden faydalanılamamıştır. Şekil 2.2-2a ve Şekil 2.2-2b'de aynı yükler hacim/ağırlık dengesini dikkate alarak dağıtılmış ve yüklenmiştir. Böylece her bir ekipmanda 24,5 m^3 hacim ve 6.000 kg ağırlık kapasitesi oluşmuştur. Böylece iki ekipmanda toplam 49 m^3 ve 12.000 kg'lık bir yükleme kapasitesi yaratılmıştır.

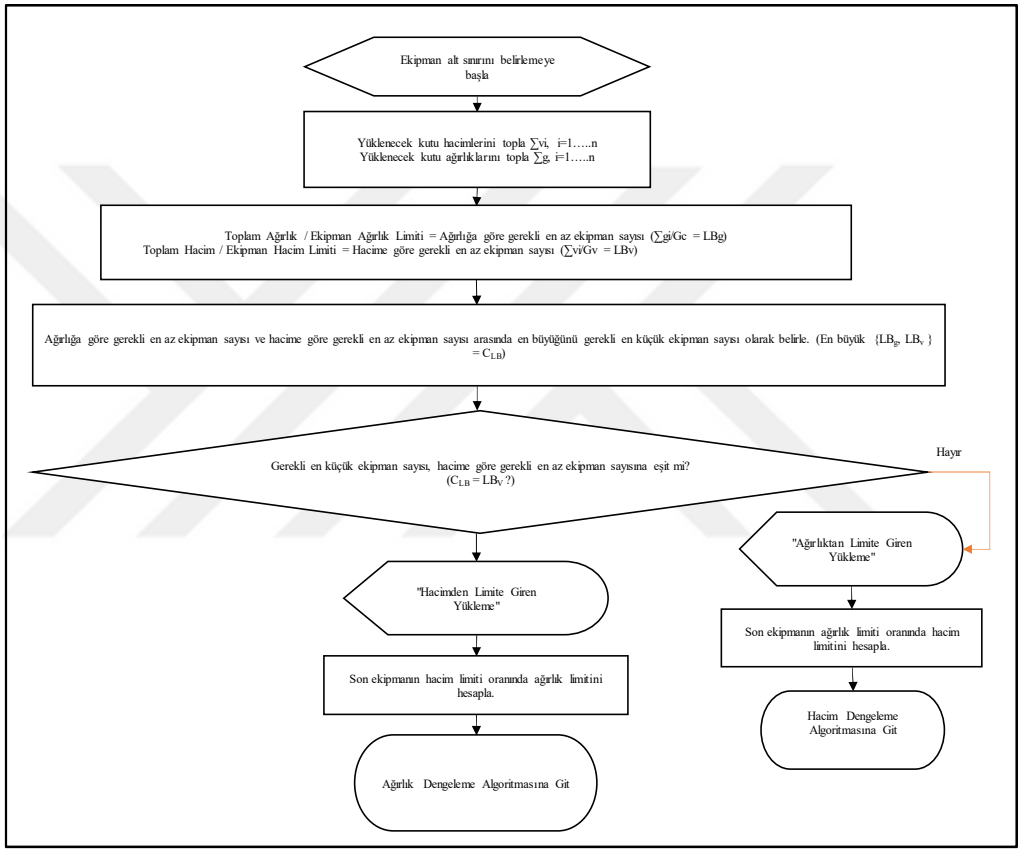
Hacim ve ağırlığın ekipmanlara dengeli dağıtılabilmesi için öncelikle yüklenecek kutuların yüklenebileceği en az sayıdaki ekipmanı belirlememiz gerekir.



Şekil 2.2. Ağırlık ve hacmin eş zamanlı en iyilenmesi

Elimizdeki yükün toplam ağırlık ve toplam haciminin sırasıyla ekipman ağırlık ve hacim limitine bölünmesinden elde edilecek sayılardan en büyüğü, %100 verimlilikle, yüklenecek kutuları taşıyabileceğimiz en küçük ekipman sayısını bize vermektedir. En küçük ekipman sayısı yüklenecek kutuların toplam haciminin ekipman hacim limitine oranı ile elde ediliyorsa, bir başka deyimle, yüklenecek kutular hacim kısıtından limiti dolduruyorsa bu kutular hacimlerine göre ekipmanlara atanacak ve her bir ekipman için ağırlık dengesi kontrol edilecektir.

Aynı mantıkla en küçük ekipman sayısı toplam ağırlığın ekipman ağırlık limitine oranı ile elde ediliyorsa, bir başka deyimle, yüklenecek kutular ağırlık kısıtından limiti dolduruyorsa bu kutular ağırlıklarına göre ekipmanlara atanacak ve her bir ekipman için hacim dengesi kontrol edilecektir. Şekil 2.3'te gerekli en küçük ekipman sayısı ve ağırlık/hacim dengeleme ihtiyacının belirlenmesi yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. En az ekipman sayısı ve hacim/ağırlık dengeleme ihtiyacının belirlenmesi

2.5.1. Ağırlık dengeleme

En az ekipman sayısının kutuların toplam hacmi ile belirlendiği yüklerde kutular ekipman hacmini doldurana kadar ekipmanlara ön atanır. Sonrasında herhangi bir ekipmana ön atanan kutuların ağırlık limitini aşıp aşmadığı kontrol edilir. Ekipman ağırlık limitini aşan bir ön atama yoksa ağırlık dengeleme sürecine gerek kalmaz. Herhangi bir akipmana ön atanan yüklerin toplam ağırlığı ekipman toplam ağırlık limitini aşıyorsa ağırlık dengeleme işlemi uygulanır. İlk sırayı koruyabilmek amacıyla ekipmanlar arasında tam bir dengeleme yapmak yerine tüm ekipmanları hacim/ağırlık ve dayanım kısıtları bakımından yüklenebilir seviyeye çekecek değişim

amaçlanmaktadır. Ağırlık dengeleme yapılırken dikkat edilmesi gereken iki limit vardır. Bunlardan birincisi ekipmanın toplam ağırlık limiti iken ikincisi aks ağırlık limitinin aşılmamasıdır. İkinci kısıt birinci kısıtı kapsadığından öncelikli amaç ekipman aks ağırlık limiti kısıtını sağlayacak dengelemenin ekipmanlar arasında yapılmasıdır.

Böylece her bir grubun toplam ağırlığının hacimine oranından belirli bir ortalama yoğunluk değerine ulaşılabilir. Tablo 2.3'teki ağırlık grubu yoğunluğu her bir gruptaki ortalama yoğunluğu ifade etmektedir.

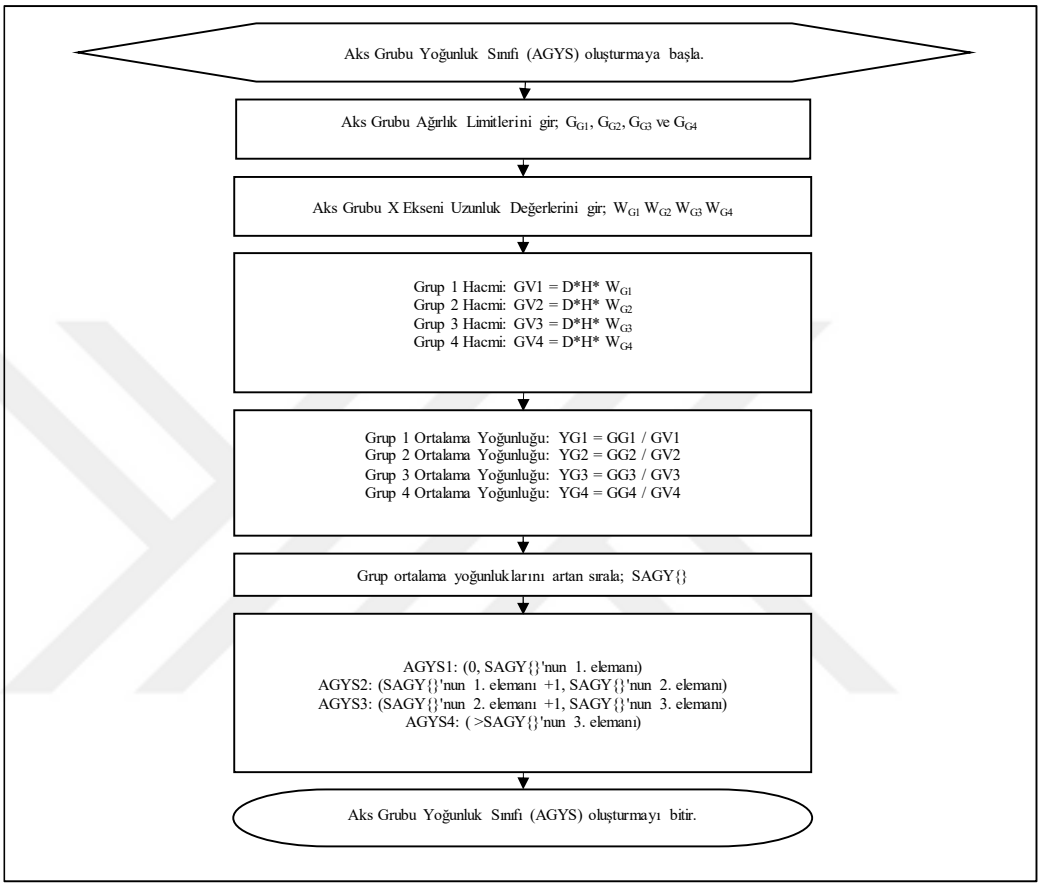
Tablo 2.3. Aks grubu ağırlık ve yoğunluk limitleri

Grup No	D (cm)	W (cm)	H (cm)	Ağırlık Limiti (kg)	Ortalama Yoğunluk (kg/m3)
1	240	300	300	3600	166,7
2	240	300	300	5400	250,0
3	240	400	300	10200	354,2
4	240	360	300	4800	185,2

Her bir aks ağırlık grubunun ortalama yoğunluğu belirlendikten sonra yükleri yoğunluklarına göre sınıflandırabilmek amacıyla ortalama yoğunluklar artan sırayla sıralanmış ve sıfırlar ilk yoğunluk arası birinci aks grubu yoğunluk sınıfı (AGYS1), birinci yoğunluktan 1 fazlası ile ikinci ortalama yoğunluk arası ikinci aks grubu yoğunluk sınıfı (AGYS2) şeklinde tüm yoğunluklar sınıflandırılmıştır. Şekil 2.4 aks grubu yoğunluk sınıflarının oluşturulmasını göstermektedir. Çalışmada 4 aks grubu yoğunluk sınıfı sırasıyla 0-167, 168-185, 186-250, 251 ve üzeri (kg/m3) olarak belirlenmiştir.

Ekipmanların aks grubu yoğunluk sınıfları arasında dengeleme yapmadan önce her bir yüklenecek kutuyu ekipmanlara ön atama yapmamız gerekir. Ön atama öncesinde; C-EPBFD sırasındaki kutulardan dayanım dengelemek için gruplanan sanal kutular dışında kalan kutuların yüzey alanı, yükseklik ve türü aynı olanları, toplam yükseklikleri ekipman yükseklik limitini aşmayacak şekilde gruplanarak yeni sanal kutular oluşturulur. Böylece ağırlık dengeleme amaçlı değişimler yapılırken üst üste yüklenme/istiflenme kolaylığı bulunan kutuları bir birinden ayırmamak

amaçlanmıştır. Sanal kutuların ağırlığı kendini oluşturan kutuların toplam ağırlığı, hacmi de kendini oluşturan kutuların hacmi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.4. Aks grubu yoğunluk sınıflarının belirlenmesi

C-EPBFD yöntemindeki sıralamaya göre hem gerçek hem sanal kutuların ekipmanlara ön ataması yapılır. İlk ekipmanın hacim limiti dolduğunda yeni ekipman açılır. Böylece tüm kutular bir ekipmana atanır. Her bir ekipmana atanan kutular ağırlıklarına göre AGYS'larına atanır. Ekipman toplam ağırlık limitini aşan ekipman var mı kontrol edilir. Ağırlık limitini aşan ekipman yoksa ağırlık denegeleme süreci sonlandırılır. Ekipman toplam ağırlık limitini aşan ekipman veya ekipmanlar varsa bunlar dengelenmemiş ekipmanlar olarak işaretlenir. Ekipman toplam ağırlık limitini en çok aşan ekipman ile ağırlık limitini aşmayan ekipmanlar arasında kutuların karşılıklı değişimi yapılır. Böylece ağırlık limitini en çok aşan ekipman (YE)'a yüklenen toplam ağırlığın ekipman toplam ağırlık limiti altına düşürülmesi amaçlanır. Dengeleme; (YE)'dan yoğun kutuların diğer müsait ekipmanlara atanması ve bu müsait ekipmanlardan daha az yoğun kutuların benzer hacimlerde geri alınması olmak üzere

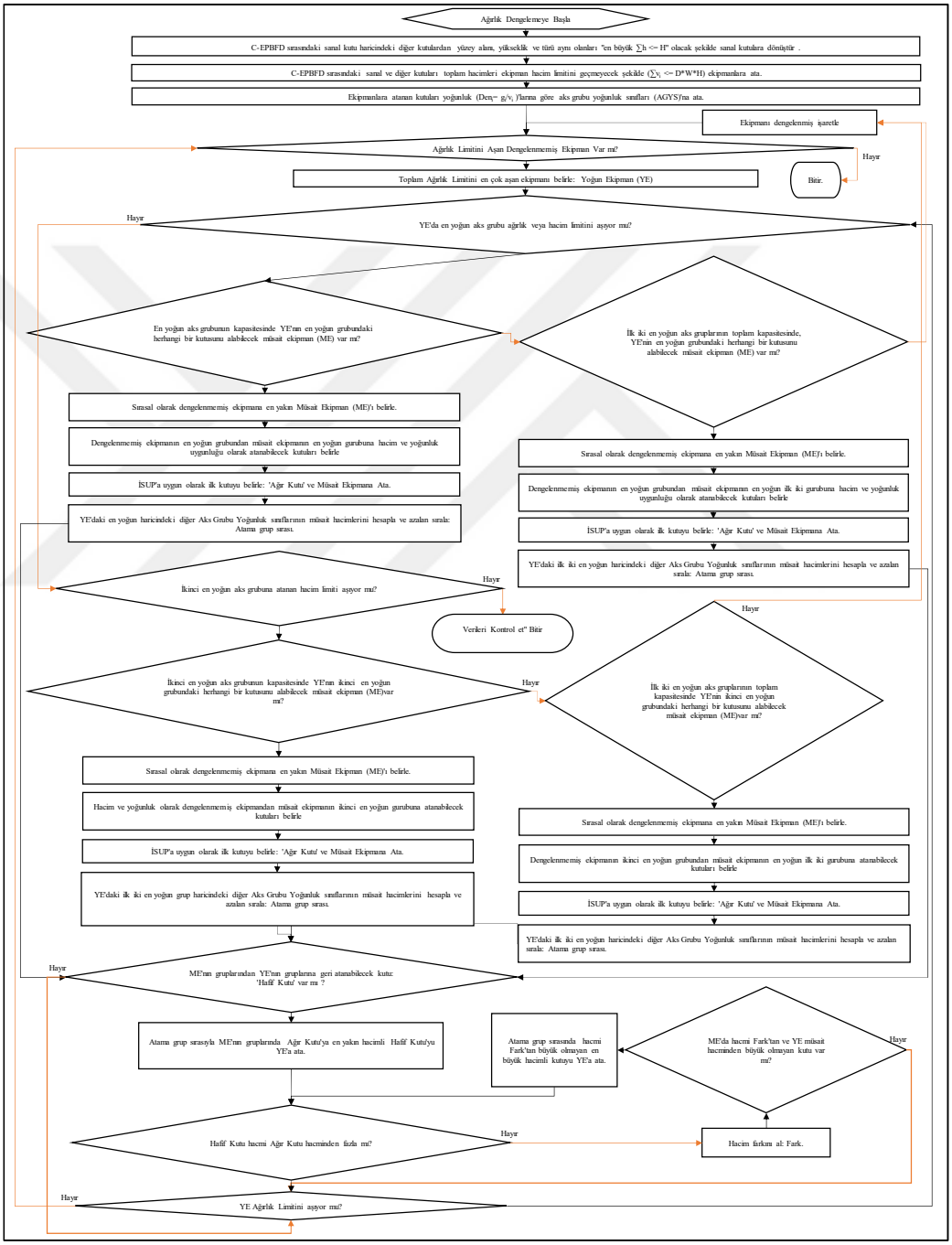
iki aşamada yapılır. YE'nın sırasıyla en yoğun ve ikinci en yoğun aks grubu yoğunluk sınıfları (AGYS4 ve AGYS3) ağırlık veya hacim limitini aşıyor mu kontrol edilir. Bu yoğunluk sınıfları olması gereken ağırlık veya hacimden fazla ise ağırlık limitini aşmayan diğer ekipmanların AGYS4 ve AGYS3'lerine atama yapılır.

YE'da en yoğun aks grubu ağırlık veya hacim limitini aşıyorsa; diğer ekipmanların en yoğun aks grubu yoğunluk sınıfları arasında ağırlık ve hacim kapasitesi, YE'nın en yoğun grubundaki herhangi bir kutusunu alabilecek müsaitliği olan var mı kontrol edilir. YE'nın ilgili grubundan herhangi bir kutu kendisine atandığında hem ekipman toplam ağırlık limiti hem de ilgili AGYS hacim ve ağırlık limitlerini aşmıyorsa, bu ekipmana YE'dan atama yapılabilir. Birden fazla atama yapılabilecek ekipman varsa sırasal olarak YE'a en yakın müsait ekipman (ME) belirlenir. YE'nın en yoğun grubundan, ME'nın en yoğun gurubuna hacim ve yoğunluk uygunluğu olarak atanabilecek kutular içinde İSUP'a uygun olarak ilk kutu (Ağır Kutu) belirlenir ve ME'a atanır. Eğer YE'nın en yoğun aks grubu ağırlık ve hacim limitlerinin ikisini de aşmıyorsa, YE'nın ikinci en yoğun aks grubu içinden atanabilecek kutular belirlenir ve ME'a atanır.

En yoğun aks grubu yoğunluk sınıfı hacim veya ağırlık limitini aşan ekipmandan diğer ekipmanların öncelikle en yoğun aks grubu yoğunluk sınıfı olmak üzere en yoğun veya ikinci en yoğun aks grubu yoğunluk sınıflarına atama yapılmaya çalışılır. Benzer şekilde ikinci en yoğun aks grubu yoğunluk sınıfı limiti aşan ekipmandan da öncelikle ikinci en yoğun aks grubu yoğunluk sınıfı olmak üzere diğer ekipmanların ikinci en yoğun ve en yoğun aks grubu yoğunluk sınıflarına atama yapılmaya çalışılır. Bunun amacı ME'lar içinde atama yapılması en uygun ekipmanı belirleyerek ona atama yapılmasıdır. Böylece ekipmanlar arasında daha uygun bir AGYS dengelemesi yapılmış olur.

ME'a atama yapıldıktan sonra, YE'da kendisinden atama yapılan AGYS'ndan daha az yoğunluk limiti olan AGYS'larının boş hacimleri hesaplanır ve azalan sıralanır. Böylece ME'nın hangi aks grubu yoğunluk sınıflarından YE'a geri atama yapılacağının öncelik sıralanması yapılmış olur. Bu sıralamaya atama grup sırası denir. Atama grup sırası ile ME'nın ilgili gruplarından YE'a geri atanabilecek uygun yoğunluk ve hacimde kutu olup olmadığı kontrol edilir. Bu kutular Hafif Kutu (HK)

olarak adlandırılır. Varsa grup sırasıyla ME'nın gruplarında AK'ya en yakın hacimli HK YE'a atanır. Geri atanan HK hacmi AK hacminden fazlaysa geri atama tamamlanır. Fazla deilse ME'da hacmi AK ve HK arasındaki hacim farkından küçük



Şekil 2.5. Ağırlık dengeleme algoritması

veya eşit ve YE toplam boş hacminden büyük olmayan kutu olup olmadığı kontrol edilir. Uygun kutu varsa atama grup sırasında en büyük hacimli kutu YE'a atanır. Fark kapanana ya da geri atanabilecek uygun kutu kalmayana kadar geri atamaya devam edilir.

Atama ve geri atama tamamlandığında yoğun ekipmanın hala ekipman ağırlık limitini aşıp aşmadığı kontrol edilir. Eğer limiti aşıyorsa ME varlığı kontrol edilir. Atama yapılabilecek ME varsa atama ve geri atama sürecine devam edilir. Böylece iki ekipman arasında toplam hacimleri benzer ağırlıkları farklı kutular değiştirilerek ağırlıkları ilk duruma göre daha dengeli hale getirilir.

Kendisine atama yapılabilecek ME yoksa veya atama ve geri atama süreçleri sonunda YE'a atanmış kutuların toplam ağırlığı ekipman toplam ağırlık limitini geçmiyorsa, ekipman dengelenmiş olarak işaretlenir. Dengelenmemiş ekipman kalmayana kadar yukarıda anlatılan sürece devam edilir.

Her bir atama ve geri atama işleminden sonra ağırlık limitini aşan ekipmanın ağırlığı kontrol edilir. Toplam ağırlık ekipman ağırlık limitinin altına düştüğü anda dengeleme bırakılır. Buradaki amaç başlangıç sıralamasını en az bozarak tüm ekipmanların ağırlık limitleri içinde olmasını sağlamaktır. Şekil 2.5 ağırlık dengeleme sürecini göstermektedir.

Aktarma yapılacak ekipmanlar sırasal olarak mümkün olduğu kadar en yakın ekipmanlardan seçilir. Eğer seçilen ekipmanlar sırasal olarak önceki bir ekipmansa bu ekipmana atanacak kutuların seçimi sırasal olarak ekipmana ilk atamanın yapıldığı sıra takip edilerek yapılır. Eğer sırasal olarak kendinden sonraki bir ekipmana atama yapılacaksa, atanacak kutuların seçimi ilk atama sırasının tersi sırayı izleyerek yapılır. Bu prensip ilk sıralamaya uyum prensibi (İSUP) olarak adlandırılmıştır ve hacim ve dayanım dengelemede de benzer prensibe uygun atamalar yapılacaktır.

2.5.2. Hacim dengeleme

En az gerekli ekipman sayısının ağırlık limitinden oluştuğu kutu kümesinin ekipmana yüklenmesi öncesinde kutu/kutu setleri ekipmanların toplam ağırlık limitini aşmayacak şekilde maksimum ağırlıkla ekipmanlara ön atanır. Ön atama sonrasında

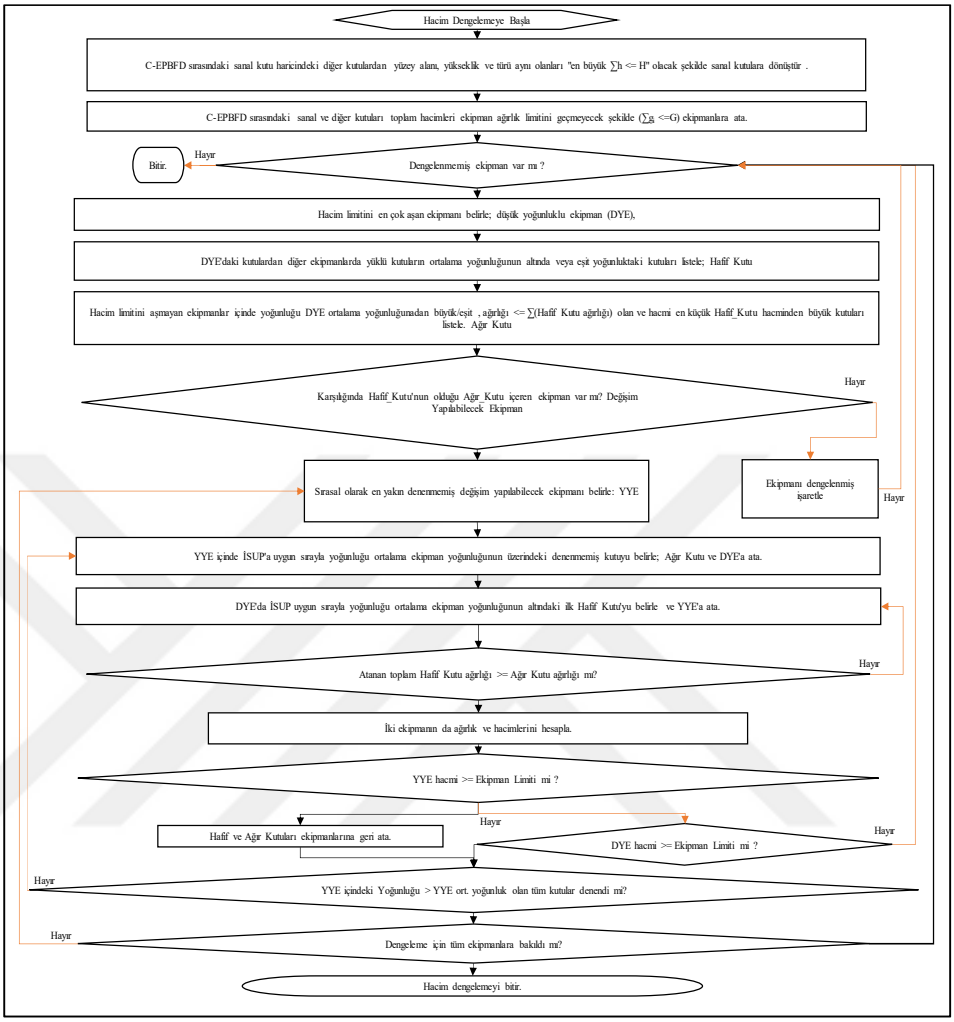
herhangi bir ekipmana atanan kutuların toplam hacmi ekipmanın hacim limitini aşmıyorsa hacim dengeleme işlemine gerek kalmaz. Herhangi bir ekipmana atanan yüklerin toplam hacmi ekipman hacim limitini aşıyorsa bu ekipmanla diğer ekipmanlar arasında değişim yapılarak tüm ekipmanların limitin altına düşürülmesi amaçlanır.

Ön atama öncesinde; C-EPBFD sırasındaki kutulardan dayanım dengelemek için gruplanan sanal kutular dışında kalan kutuların yüzey alanı, yükseklik ve türü aynı olanları, toplam yükseklikleri ekipman yükseklik limitini aşmayacak şekilde gruplanarak yeni sanal kutular oluşturulur. Böylece hacim dengeleme amaçlı değişimler yapılırken üst üste yüklenme/istiflenme kolaylığı bulunan kutuları bir birinden ayırmamak amaçlanmıştır.

Sanal ve gerçek kutuların her biri ekipmanın ağırlık limitini aşmayacak şekilde bir ekipmana atanır. Ekipmanın toplam ağırlık limiti dolduğunda yeni ekipman açılır ve yüklenecek tüm kutular bir ekipmana atanana kadar atamaya devam edilir. Ön atama sonucunda herhangi bir ekipmanın hacim limitini geçip geçmediği kontrol edilir. Hacim limitini aşan ekipman varsa bunlar dengelenmemiş ekipmanlar olarak işaretlenir. Limiti en fazla aşan ekipman belirlenir ve düşük yoğunluklu ekipman (DYE) olarak adlandırılır. DYE'a ön atanan kutular ile diğer limiti aşmayan ekipmanlara ön atanan kutular arasında değişim yapılarak tüm ekipmanların limit altına çekilmesi amaçlanmaktadır.

DYE'a atanmış bulunan kutuların yoğunlukları diğer hacim limitini aşmayan ekipmanlara ön atanan tüm kutuların ortalama yoğunlukları ile kıyaslanır. DYE'a atanmış kutulardan yoğunlukları diğer ekipman ortalama yoğunluklarından büyük olmayan kutular o ekipmana atanabilir kutular olarak belirlenir ve Hafif Kutu (HK) olarak adlandırılır. Sonrasında HK'lar karşılığında Hacim limitini aşmayan ekipmanlardan DYE'a atanabilecek kutular belirlenir ve bu kutular Ağır Kutu (AK) olarak adlandırılır. AK'lar aşağıdaki şartları sağlamalıdır;

- Yoğunluğu DYE ortalama yoğunluğundan büyük veya eşit olmalı,
- Ağırlığı ait olduğu ekipmana, DYE'dan atanabilecek HK'ların toplam ağırlığından küçük veya eşit olmalı,
- Hacmi en küçük HK hacminden büyük olmalı.



Şekil 2.6. Hacim dengeleme algoritması

Hafif ve Ağır kutular belirlendikten sonra karşılığında HK'nun olduğu AK içeren ekipman olup olmadığı kontrol edilir. Eğer karşılıklı değişim yapılabilecek hiç bir ekipman yoksa DYE ekipman dengelenmiş olarak işaretlenir.

Değişim yapılabilecek ekipman varsa sırasal olarak en yakın denenmemiş değişim yapılabilecek ekipman belirlenir ve yüksek yoğunluklu ekipman (YYE) olarak adlandırılır. YYE içinde İSUP'a uygun sırayla ilk denenmemiş AK belirlenerek DYE'a atanır. DYE'da İSUP'e uygun sırayla ilk HK belirlenerek YYE'a geri atanır. Geri atanan toplam HK ağırlığı AK ağırlığından büyük veya eşit olana dek geri atamaya devam edilir. Geri atanan toplam HK ağırlığı AK ağırlığına eşit ya da büyük olduğunda iki ekipmanın da atama-geri atama süreci sonrasındaki yeni ağırlık ve hacimleri hesaplanır. Eğer YYE'a atanan kutuların toplam hacmi ekipman hacim

limitini aşıyorsa Hafif ve AK'lar ilk durumdaki ekipmanlarına geri atanır ve YYE içinde denenmemiş AK varsa atama ve geri atama süreci tekrar eder. YYE içinde denenmemiş AK yoksa denenmemiş başka değişim yapılabilecek ekipmanların varlığı kontrol edilir Denenmemiş ekipman varsa sırasal en yakın ekipmanla DYE arasında atama ve geri atama süreci devam eder. Atama ve geri atama sonucunda YYE'a atanan kutuların toplam hacmi ekipman hacim limitini aşmıyorsa DYE'nın ekipman toplam hacim limitini aşıp aşmadığı kontrol edilir. DYE atama geri atama süreci sonunda ekipman toplam hacim limitini hala aşıyorsa atama geri atama sürecine devam edilir. Hacim limitini aşan dengelenmemiş ekipman olduğu sürece eğer denenmemiş AK veya denenmemiş limiti aşmayan ekipman varsa atama geri atama devam eder. Tüm AK'lar ve tüm ekipmanlar denendiği halde hala limiti aşan ekipman varsa bu ekipman dengelenmiş olarak işaretlenir. Şekil 2.6'da hacim dengeleme algoritması detaylı olarak gösterilmiştir.

2.6. Ekipman Açma Stratejisi

Ekipman açma stratejisi olarak ön atamalı strateji kullanılmıştır. Kutular öncelikle sınıflandırılmış alan-yükseklik kuralına göre sıralanır ve hacim veya ağırlıklarına göre ekipmanlara atanır. Ekipmanlar arasında hacim veya ağırlık ve dayanım dengelemesi ihtiyacı kontrol edilir. Dengeleme ihtiyacı varsa ekipmanlara atanmış olan kutular arasında değişimler yapılarak dengeleme süreçleri işletilir. Dengelenmiş durumda elde edilen ekipman atamaları sadece ön bir atamadır. İlk ekipmana atanmış olan kutular atama sırasına uygun olarak ilk ekipmana mümkün olan en yüksek sayıda yüklenir.

Ekipmana atanan kutuların tamamının o ekipmana yüklenmesi beklenemez. Sadece %100 verimlilik durumunda o ekipmana atanan kutular aynı ekipmana yüklenebilir. Kalan tüm kutular için sıralama ve dengeleme kuralları yeniden işletilir. Böylece eldeki kutular mümkün olan en dengeli şekilde yüklenmeye çalışılır.

2.7. Yüklenecek Kutu-Uç Nokta Seçimi için Amaç Fonksiyonu

Yeni eklenen kısıtlarla birlikte amaç fonksiyonu da revize edilmelidir. C-EPBFD yönteminde tek amaç ekipman içindeki hacim kullanımının en büyüklenmesidir. Bu sebeple amaç fonksiyonu sıradaki ilk kutunun yükleneceği noktayı seçerken her bir EP etrafındaki müsait alanı en verimli şekilde kullanmayı amaçlamıştır.

Yeni yöntemde hacim optimizasyonuna ilave olarak kutu ağırlık dayanımı, toplam ekipman ağırlığı, aks ağırlık dağılımı, düşey kutu sabitliği ve istiflenebilme kısıtları eklendiğinden amaç fonksiyonuna bu kısıtların bazıları ile ilgili parametreler ilave edilerek yükleme noktasına en uygun kutunun seçilmesi sağlanmıştır.

Yeni kısıtlarla birlikte amaç fonksiyonunda yer alacak kriterler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Kriter-1 Yükleme Noktası Etrafındaki Müsait Alan ve Yüzey Alanı : Amaç fonksiyonunda kullanılacak ilk kriter iki kısımdan oluşmaktadır. Denklemdeki ilk kısım EP-BFD'de de amaç fonksiyonunu oluşturan kriter olan yükleme noktasının etrafındaki müsait alanın kullanımını en büyükleyen kısımdır. Uç noktanın x ve z eksenleri doğrultusunda ekipman duvarları veya diğer kutulara olan uzaklığı ile yüklenecek kutu boyutları arasındaki farka eşittir. Amaç bu farkın mümkün olduğu kadar az olması olduğundan bu değerin en küçüklenmesi amaçlanır.

Denklemin ikinci kısmı yüzey alanı nisbeten büyük olan kutunun öncelikli yüklemesini desteklemek amacıyla kritere eklenmiştir. Yükleme için değerlendirilecek tüm kutuların ortalama yüzey alanlarının ilgili kutunun yüzey alanınına oranının yarısı olarak tanımlanmıştır.

$$K1 = [(RS_{e,x} - w_i) + (RS_{e,z} - h_i) + [\ YA_{ort}\ (DK) / 2 \times YA_i] \quad (2.10)$$

Kriter-2 Kutu Dayanımının Yükleme Alanı Dayanımına Yakın Olması: Kutuyu bir noktaya yüklerken dikkat edilmesi gereken değişkenlerden biri de kutu dayanımıdır. Yüklenecek kutunun dayanımı altını destekleyen kutuların dayanımına göre mümkün olduğu kadar orantılı olmalıdır. Yüklenecek kutu dayanımı, kendisi yüklendikten sonra altını destekleyen kutuların kalan en küçük dayanımına göre yüksek olursa, toplam dayanım alttaki kutular sebebiyle düşük olacağından, yüksek dayanımlı kutudan başka bir yükleme noktasında faydalanma fırsatı kaçırılmış olabilir. Bununla birlikte altını destekleyen kutulara göre dayanımı çok düşük olan kutunun yüklenmesi de alttaki kutuların dayanımından daha iyi faydalanma fırsatının yakalanamamasına sebep olacaktır. Bu sebeple kutu dayanımının; kutunun yapacağı basınç çıkarıldıktan sonra altını destekleyen kutularda kalan en küçük dayanıma yakın olması gerekir. Yükleme noktası ekipman zemininde ise veya yüklenmemiş kutuların en büyük

basıncı yüklenmiş kutuların en küçük dayanımından daha düşükse bu kriter "0" değerini almaktadır. Diğer durumlarda kutu dayanımı olması istenen dayanımdan uzaklaştıkça amaç fonksiyonuna bir ilave getirecek ve en küçüklenmek istenen amaç fonksiyonu değerini arttıracaktır. Bu kriter aynı zamanda benzer tip kutuların bir biri üzerine yüklenmesini de destekleyecektir. Eğer Pmax > min(b_{sk}) ve h > 0 ise;

$$K2 = | (b_i – (\min(b_{sk}) – p_i)) | \times (H – EP_h – h_i) \quad (2.11)$$

değilse 0 alınır.

Yüklenmemiş kutuların en büyük basıncı yüklenecek kutunun veya bu kutuyu destekleyecek kutuların en küçüğünün basıncından büyükse bu değer ilk kısımdaki formülizasyonla hesaplanır. Formül kutu dayanımından altını destekleyen kutulardan en küçük dayanımlı olanın dayanımının farkını aldıktan sonra yüklenen kutunun da basıncı bu dayanımdan çıkartır ve kalan dayanıma en yakın dayanımlı kutuyu seçmeye yönlendirir. Formülün ikinci kısmında ekipman yüksekliği ile yüklenen kutunun ulaştığı noktanın farkı çarpan olarak kullanılmıştır. Bunun sebebi yüklenen kutudan sonra kalan yükleme boşluğu ile orantılı olarak bu kriterin etkisinin belirlenmesidir.

Kalan boşluk azaldıkça üzerine yapılacak yükleme miktarı azaldığından dayanım ihtiyacı da azalacaktır.

Kriter-3 Aks Dağılımına Uygun Yoğunluk: Yüklenecek kutuyu ve yükleme noktasını seçerken dikkate almamız gereken bir diğer husus yükleme ekipmanının aks ağırlık dayanımı dağılımıdır. Yükleme ekipmanı aks ağırlık dayanımına uygun olarak bölümlere ayrılmıştır. Her bir grubun toplam ağırlık, hacim ve ağırlığın hacime oranından elde edilen yoğunluğu vardır. Gruba yüklenen kutuların ortalama yoğunluğu mümkün olduğu kadar grup ortalamasına yaklaştırması beklenir. Bu sebeple yüklenecek kutunun yoğunluğunun grupta kalan yoğunluktan farkının mutlak değeri amaç fonksiyonuna ilave edilecektir. Aynı zamanda sadece zemine yapılan yüklemelerde kutunun Y eksenindeki yükleme noktasının aks grubu başlangıç noktasından farkı da bir ağırlık olarak eklenmiştir.

Böylece grubun ön kısımlarında daha esnek bir dengesizliğe izin verilirken grup sonuna yaklaşıldığında ceza miktarı arttırılmış olacaktır. Bu çarpanın sadece zemine

yapılan yüklemelerde kullanılmasının amacı kutuları üst üste yüklerken istifleme ve dayanım kısıtlarına esneklik sağlamaktır. Bu formülle grupta kalan yoğunluğa en yakın yoğunluklu kutunun amaç fonksiyonunu en küçüklemesi beklenir. Eğer $EP_h = 0$ ise; Denklem (2.12)'deki gibi değilse Denklem (2.13)'deki gibi hesaplanır.

$$K3 = [(g_i/v_i) – (G_g - \sum g_{gr})/(G_v - \sum v_{gr})] \text{ x } EP_y – G_y \quad (2.12)$$

$$K3 = [(g_i/v_i) – (G_g - \sum g_{gr})/(G_v - \sum v_{gr})] \quad (2.13)$$

Her bir i kutusunun EP'daki amaç fonksiyonu değeri aşağıdaki Denklem (2.14)'de gösterildiği şekilde hesaplanır. Burada A1, A2 ve A3 sırasıyla 3 kriter için denenecek olan katsayı değerleridir. N1, N2 ve N3 kriter değerlerini normalize etmek için kullanılan katsayılardır. En küçük yüklenecek kutu ve uç nokta seçimi (fb) değerini veren i, EP eşleşmesi seçilir ve i kutusu EP noktasına yüklenir.

$$fb\{i\}(EP) = (A1 \text{ x } K1 / N1) + (A2 \text{ x } K2 / N2) + (A3 \text{ x } K3 / N3) \quad (2.14)$$

2.8. Kutuların Yükleme Noktalarına Atanması

Geliştirilen yöntemde yüklenecek ilk kutunun seçimi EPBFD yönteminden farklı olarak bir amaç fonksiyonu ile belirlenir. Bu amaç fonksiyonu Denklem (2.15)'de gösterildiği gibi iki kısımdan oluşur. İlk kısım değerlendirilecek kutular içinde yüzey alanı daha büyük olan kutunun seçimini kolaylaştırmak amacıyla; değerlendirilecek kutuların yüzey alanlarının en büyüğünü değerlendirilen kutunun yüzey alanına oranlar ve bu değerin yarısını denkleme yerleştirir. İkinci kısım değerlendirilen kutunun yoğunluğunun yükleme noktası yoğunluğuna yakın olmasını sağlamak amacıyla; yükleme noktasındaki ekipman yoğunluk kapasitesinden değerlendirilen kutunun yoğunluğunun farkının mutlak değerini alır ve denkleme ilave eder. Bir ekipmanın toplam hacminin 2/3'ü oranında toplam hacime ulaşılana kadar yükleme sırasındaki tüm kutular değerlendirilecek kutuları oluşturur. En küçük ilk kutu seçimi amaç fonksiyonu (ff) değerini veren kutu (0, 0, 0) noktasına yüklenir. İlk kutu yüklendikten sonra EPL'nin belirlenmesi ve RS'ların hesaplanması EPBFD yönteminde olduğu gibidir. Daha sonraki yüklemeler için EPL'indeki uç noktaların tamamında yükleme sırasındaki bir grup kutu Denklem (2.14)'e göre değerlendirilir. Yükleme sırasıyla değerlendirilen kutuların toplam hacimi bir ekipmanın toplam

hacimine ulaştığında değerlendirme sonlandırılır. En iyi sonucu veren yükleme noktası ve kutu eşleşmesi seçilir ve o kutu ilgili noktaya yüklenir. Yeni kutunun yüklenmesi ile birlikte EPL ve RS'lar Ek-A ve Ek-B'de yazılım özeti verilen algoritmaya göre güncellenir. Tüm kutular yükleninceye kadar bu işleme devam edilir. Sıradaki ekipman dolduğunda yeni ekipman açıldığında ilk kutu seçimi, ilk ekipmana yüklenecek ilk kutu seçiminde kullanılan yöntemle yapılır.

$$ff = (\max(YA_{DK}) \,/\, 2 \times YA_i) + (g_i/v_i - G_g/G_v) \tag{2.15}$$

3. MODELİN TEST EDİLMESİ

Modelin test edilmesi için bir otomotiv firmasına ait gerçek yükleme verileri kullanılmıştır. Firmanın yurtdışında bulunan deposundan son bir yılda yapılan tüm yüklemeleri analiz edilmiştir. Bu yüklemelere ait ekipman yükleme hacmi, ekipman yükleme ağırlığı, ekipman içindeki kutu türü, boyutları, ağırlığı ve adedi bilgileri alınmıştır.

3.1. Verilerin Analizi

Toplam 2325 yüklemeye ait veriler analiz edilmiştir. Bu yüklemelere ait bazı verilerin verimli bir yüklemeyi yansıtmayacak şekilde ortalama ve standart sapmadan uzak olduğu tespit edilmiştir. Tüm verilere ait ortalama yükleme hacmi 71,91 m^3 standart sapması 13,79 m^3'tür. +/- 2 standart sapmanın dışında kalan 44,33 m3'ün altında bir hacimle yüklenmiş veya 99,48 m3'ün üzerinde yüklenmiş araçlar verilerden çıkartılmıştır. Benzer şekilde tüm ekipmanların ortalama yükleme ağırlığı 1713,38 kg, standart sapması 4812,29 kg'dır. +/- 2 standart sapmanın dışında kalan; 7548,79 kg'ın altında bir ağırlıkla yüklenmiş veya 26797,96 kg'ın üzerinde bir ağırlıkla yüklenmiş görünen yüklemeler kullanılmamıştır. Bu sebeple toplam 2325 yüklemenin 122 adedi verilerden çıkartılarak yığın büyüklüğü 2203 olarak belirlenmiştir. Tablo 3.1. tüm yüklemelere ait ortalama ve standart sapmaları göstermektedir.

3.2. Örneklerin Belirlenmesi

2203 adetlik yığını temsil edecek yüklemelerin belirlenmesi için tabakalı örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde veriler belirli özelliklerine göre gruplandırılır ve her grubu temsil edecek belirli sayıda örnek alınır. Gruplardan alınacak örnek sayıları gruba giren verilerin sıklığı orantısında yapılır. Yüklemeleri temsil eden karakteristik olan yükleme ağırlığı ve yükleme hacmine göre verilerin sınıflandırılabilmesi için 40 m3 ile 100 m3 arasında 10 m3 artışla toplam 6 hacim sınıfı, 7000 kg'dan başlayarak 2000 kg artışla en fazla 25000 kg olmak üzere toplam 9 ağırlık sınıfı oluşturulmuştur. Tüm ağırlık ve hacim sınıflarının ikili kombinasyonları ile 54 adet ağırlık hacim

Tablo 3.1. Yükleme verileri analizi

İstatistik	m^3	kg
Aritmetik Oritalama	71,91	17173,38
Standart Sapma (σ)	13,79	4812,29
Aritmetik Ortalama + 2 (σ)	99,48	26797,96
Aritmetik Ortalama - 2 (σ)	44,33	7548,79
İki Sigma İçinde Kalanlar	44,33 <= m^3 <= 99,48	7548,79 <= kg <= 26797,96

Tablo 3.2. Yükleme ağırlık ve hacim kombinasyon sıklıkları

Problem Türü	Hacim&Ağırlık Kombinasyonu	Sıklık	%Sıklık	Kümülatif Toplam	Yüzde Kapsama
PT1	50,01-60,00 ve 23001-25000 kg	199	9,03%	199	9,03%
PT2	80,01-90,00 ve 15001-17000 kg	159	7,22%	358	16,25%
PT3	80,01-90,00 ve 17001-19000 kg	134	6,08%	492	22,33%
PT4	80,01-90,00 ve 13001-15000 kg	126	5,72%	618	28,05%
PT5	80,01-90,00 ve 11001-13000 kg	93	4,22%	711	32,27%
PT6	80,01-90,00 ve 19001-21000 kg	90	4,09%	801	36,36%
PT7	70,01-80,00 ve 17001-19000 kg	89	4,04%	890	40,40%
PT8	70,01-80,00 ve 15001-17000 kg	86	3,90%	976	44,30%
PT9	50,01-60,00 ve 21001-23000 kg	83	3,77%	1059	48,07%
PT10	70,01-80,00 ve 13001-15000 kg	71	3,22%	1130	51,29%
PT11	60,01-70,00 ve 23001-25000 kg	70	3,18%	1200	54,47%
PT12	70,01-80,00 ve 19001-21000 kg	61	2,77%	1261	57,24%
PT13	60,01-70,00 ve 21001-23000 kg	56	2,54%	1317	59,78%
PT14	70,01-80,00 ve 11001-13000 kg	56	2,54%	1373	62,32%
PT15	80,01-90,00 ve 9001-11000 kg	56	2,54%	1429	64,87%
PT16	60,01-70,00 ve 19001-21000 kg	52	2,36%	1481	67,23%
PT17	80,01-90,00 ve 21001-23000 kg	51	2,32%	1532	69,54%
PT18	60,01-70,00 ve 15001-17000 kg	49	2,22%	1581	71,77%
PT19	60,01-70,00 ve 17001-19000 kg	49	2,22%	1630	73,99%
PT20	70,01-80,00 ve 21001-23000 kg	43	1,95%	1673	75,94%
PT21	50,01-60,00 ve 19001-21000 kg	35	1,59%	1708	77,53%
PT22	60,01-70,00 ve 13001-15000 kg	34	1,54%	1742	79,07%
PT23	70,01-80,00 ve 23001-25000 kg	33	1,50%	1775	80,57%
PT24	50,01-60,00 ve 15001-17000 kg	31	1,41%	1806	81,98%
PT25	90,01-100,00 ve 15001-17000 kg	31	1,41%	1837	83,39%
PT26	60,01-70,00 ve 11001-13000 kg	30	1,36%	1867	84,75%
PT27	40,01-50,00 ve 23001-25000 kg	27	1,23%	1894	85,97%

kombinasyonu oluşturulmuş ve yüklemelerin ağırlık ve hacimlerine göre hangi sınıfa ait olduğu belirlenmiştir. Tüm kombinasyonların sıklıkları EK-D'de sunulmuştur. Tablo 3.2. 2203 yüklemenin %85,97'sini kapsayan 1894 adet yüklemeye ait ağırlık

hacim kombinasyonlarını göstermektedir. Toplamda 27 farklı kombinasyon verilerin %85,97'sini kapsamaktadır. Böylece Tablo 3.2.'daki 27 adet kombinasyonu temsil eden birer örnek yüklemelerin %85'ini temsil edecektir. Ancak merkezi limit teoremine göre de tam bir temsil yakalabilmek için örnek sayısı 32 olarak belirlenmiştir. 27 temsilden arta kalan 5 temsil ağırlıkları oranında ilk 4 problem türüne dağıtılmıştır. Buna göre ilk problem türü 3 farklı örnekle, 2,3 ve 4. problem türlerinin her biri iki farklı örnekle diğer problem tüleri 1'er tesadüfi örnekle temsil edilecektir.

Tablo 3.3. Problem türlerinin sıklığı ve alınacak örnek adedi

Problem Türü	Kombinasyon	Sıklık	% Sıklık	Ağırlıklı Sıklık	Örnek Adedi
PT1	50,01-60,00 ve 23001-25000 kg	199	9,03%	2,9	3
PT2	80,01-90,00 ve 15001-17000 kg	159	7,22%	2,3	2
PT3	80,01-90,00 ve 17001-19000 kg	134	6,08%	1,9	2
PT4	80,01-90,00 ve 13001-15000 kg	126	5,72%	1,8	2
PT5	80,01-90,00 ve 11001-13000 kg	93	4,22%	1,4	1
PT6	80,01-90,00 ve 19001-21000 kg	90	4,09%	1,3	1
PT7	70,01-80,00 ve 17001-19000 kg	89	4,04%	1,3	1
PT8	70,01-80,00 ve 15001-17000 kg	86	3,90%	1,2	1
PT9	50,01-60,00 ve 21001-23000 kg	83	3,77%	1,2	1
PT10	70,01-80,00 ve 13001-15000 kg	71	3,22%	1,0	1
PT11	60,01-70,00 ve 23001-25000 kg	70	3,18%	1,0	1
PT12	70,01-80,00 ve 19001-21000 kg	61	2,77%	0,9	1
PT13	60,01-70,00 ve 21001-23000 kg	56	2,54%	0,8	1
PT14	70,01-80,00 ve 11001-13000 kg	56	2,54%	0,8	1
PT15	80,01-90,00 ve 9001-11000 kg	56	2,54%	0,8	1
PT16	60,01-70,00 ve 19001-21000 kg	52	2,36%	0,8	1
PT17	80,01-90,00 ve 21001-23000 kg	51	2,32%	0,7	1
PT18	60,01-70,00 ve 15001-17000 kg	49	2,22%	0,7	1
PT19	60,01-70,00 ve 17001-19000 kg	49	2,22%	0,7	1
PT20	70,01-80,00 ve 21001-23000 kg	43	1,95%	0,6	1
PT21	50,01-60,00 ve 19001-21000 kg	35	1,59%	0,5	1
PT22	60,01-70,00 ve 13001-15000 kg	34	1,54%	0,5	1
PT23	70,01-80,00 ve 23001-25000 kg	33	1,50%	0,5	1
PT24	50,01-60,00 ve 15001-17000 kg	31	1,41%	0,5	1
PT25	90,01-100,00 ve 15001-17000 kg	31	1,41%	0,5	1
PT26	60,01-70,00 ve 11001-13000 kg	30	1,36%	0,4	1
PT27	40,01-50,00 ve 23001-25000 kg	27	1,23%	0,4	1

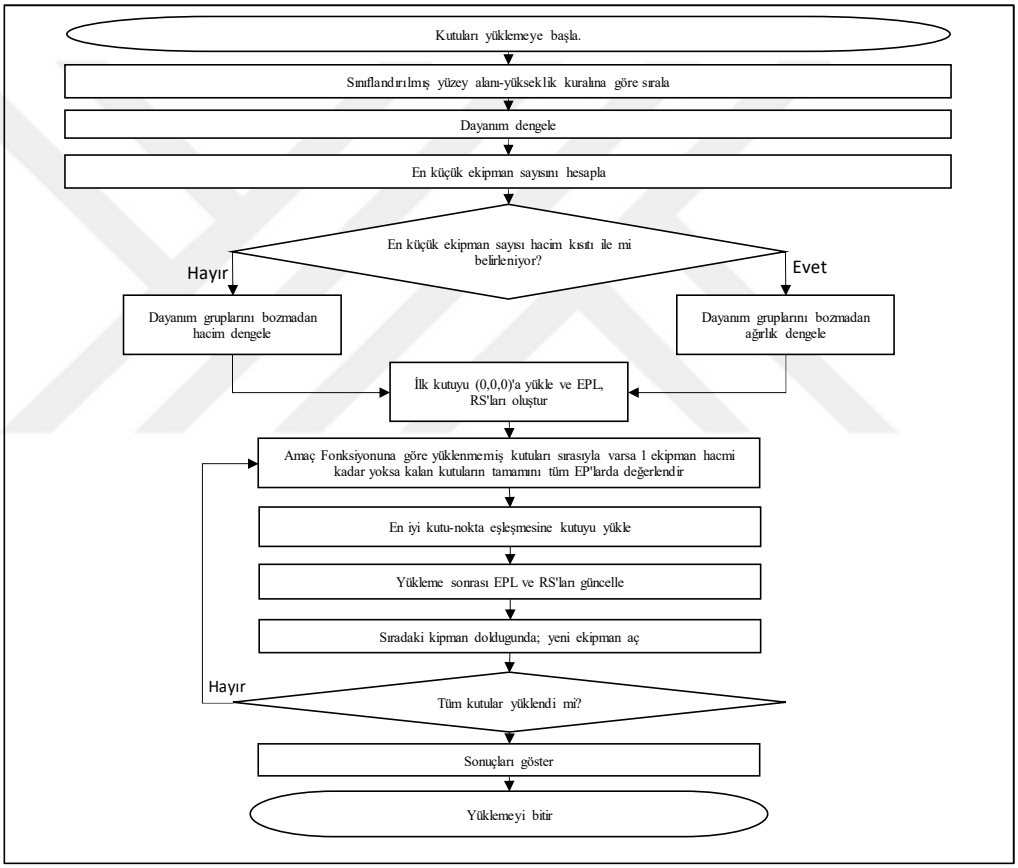
3.3. Modelin Bilgisayar Ortamına Aktarılması

Önerilen yöntem Matlab paket programı R2016a versiyonu yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Problem girdileri olan yüklenecek ekipmanın boyutları, toplam ağırlık limiti, aks yoğunluk grubu hacim ve ağırlık limitleri, istifleme kısıtları, kutu

Tablo 3.4. Yükleme problemleri ağırlık, hacim, kutu çeşitliliği ve sayısı

Pr. No	Problem Türü	Hacim & Ağırlık Kombinasyonu	Ekipman1 (m^3)	Ekipman1 (kg)	Ekipman2 (m^3)	Ekipman2 (kg)	Farklı Boyut	Adet
1	PT1 P1	50,01-60,00 ve 23001-25000 kg	58809920	23555	92916000	8914	15	121
2	PT1 P2	50,01-60,00 ve 23001-25000 kg	50694240	23748	89646000	18618	27	115
3	PT1 P3	50,01-60,00 ve 23001-25000 kg	53813760	23370	62297640	17466	42	109
4	PT2 P1	80,01-90,00 ve 15001-17000 kg	82568924	16790	77004000	12603	37	142
5	PT2 P2	80,01-90,00 ve 15001-17000 kg	84888000	16893	81228000	17884	16	148
6	PT3 P1	80,01-90,00 ve 17001-19000 kg	82728000	17212	81498000	16496	11	156
7	PT3 P2	80,01-90,00 ve 17001-19000 kg	80552000	18104	79580000	16225	33	161
8	PT4 P1	80,01-90,00 ve 13001-15000 kg	87021500	14007	75843000	21684	54	161
9	PT4 P2	80,01-90,00 ve 13001-15000 kg	82620004,8	13696	86400005	16224	7	152
10	PT5 P1	80,01-90,00 ve 11001-13000 kg	85715000	12755	51240000	23388	39	148
11	PT6 P1	80,01-90,00 ve 19001-21000 kg	85573620	19383	75785995	11170	61	158
12	PT7 P1	70,01-80,00 ve 17001-19000 kg	79092000	18600	81864000	17424	19	157
13	PT8 P1	70,01-80,00 ve 15001-17000 kg	76728000	16679	71834120	21197	43	145
14	PT9 P1	50,01-60,00 ve 21001-23000 kg	59543000	22103	87888000	19484	37	153
15	PT10 P1	70,01-80,00 ve 13001-15000 kg	74837228	13414	80454000	10994	80	156
16	PT11 P1	60,01-70,00 ve 23001-25000 kg	66693000	23840	89940000	13141	43	154
17	PT12 P1	70,01-80,00 ve 19001-21000 kg	79954789,8	19240	54742784	23370	30	113
18	PT13 P1	60,01-70,00 ve 21001-23000 kg	66224893	22338	58854600	22410	29	118
19	PT14 P1	70,01-80,00 ve 11001-13000 kg	71121120	11399	61503600	23070	51	143
20	PT15 P1	80,01-90,00 ve 9001-11000 kg	85670950	9656	59359900	15375	72	150
21	PT16 P1	60,01-70,00 ve 19001-21000 kg	63385400	19594	88365100	14010	45	150
22	PT17 P1	80,01-90,00 ve 21001-23000 kg	87491596	21492	79735725	12521	69	167
23	PT18 P1	60,01-70,00 ve 15001-17000 kg	62914500	15201	71820152	14115	66	140
24	PT19 P1	60,01-70,00 ve 17001-19000 kg	67022900	17253	87168000	16823	28	131
25	PT20 P1	70,01-80,00 ve 21001-23000 kg	70152000	21849	66264000	15185	33	129
26	PT21 P1	50,01-60,00 ve 19001-21000 kg	53832633	19133	53989004	23485	20	96
27	PT22 P1	60,01-70,00 ve 13001-15000 kg	66451266	14224	83647188	12176	58	148
28	PT23 P1	70,01-80,00 ve 23001-25000 kg	79692000	23992	75960620	18860	36	162
29	PT24 P1	50,01-60,00 ve 15001-17000 kg	51297160	16029	56419200	23757	50	106
30	PT25 P1	90,01-100,0 ve 15001-17000 kg	90234000	15319	47857584	22922	25	116
31	PT26 P1	60,01-70,00 ve 11001-13000 kg	61898060	12986	90049620	10467	34	116
32	PT27 P1	40,01-50,00 ve 23001-25000 kg	48240000	23185	65343753	16828	26	131

türlerinin yük dayanımı bilgileri bir defaya mahsus olmak üzere Bölüm 2'de anlatıldığı şekilde modele tanımlanmıştır.Bölüm 2.1. de anlatılan, önerilen modeldeki kısıtlar; her bir yüklenecek kutunun bir ekipmana herhangi bir başka kutu ile çakışmayacak ve ekipman sınırları içinde kalacak şekilde yüklenmiş olması, kutu tabanlarının başka kutular veya ekipman zemini tarafından desteklenmiş olması, ekipman toplam ağırlık ve aks ağırlık kısıtlarına uyum, basınç dayanımı ve istifleme kısıtlarına uyum kuralları yazılıma kısıt olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.1. Önerilen yöntemin genel akış algoritması

Bölüm 2'de detaylı şekilde tanımlanan sıralama, dayanım dengeleme, hacim, dengeleme, ağırlık dengeleme, yüklenecek kutu-nokta kombinasyonunu seçecek amaç fonksiyonu değerlendirmesi, kutuların yükleme noktalarına atanması, yeni ekipman açma, EPL ve RS'ların güncellenmesi algoritmaları modele yansıtılmıştır. Şekil 3.1. Önerilen yöntemin genel akış algoritmasını göstermektedir. Benzer şekilde 32 gerçek yükleme problemlerine ait kutuların derinliği, genişliği, yüksekliği, ağırlığı ve kutu türü bilgisi her bir problem için ayrı ayrı modele tanımlanmıştır. Tablo 3.4'te

problemlerle ilgili hacim, ağırlık, kutu sayısı ve ağırlık ve uzunluk olarak kaç farklı kutu olduğu gösterilmiştir.

Her bir problem Bölüm 2.7'de tanımlanan 3 amaç fonksiyonu kriterinin 0, 25, 50, 75, ve 100 olmak üzere 5 farklı ağırlık değeri ile çalıştırılmıştır. Koşumlar Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU @ 1.80 GHz işlemci 8GB ram bellekli bir makinada gerçekleştirilmiştir. Ortalama 120 kutulu bir problemin her bir koşumu modelin çalışması 60sn, 125 koşum yaklaşık 2 saat sürmektedir.

3 kriterin 5 farklı değerlerinin tüm kombinasyonları olan 125 adet koşum sonrası en iyi değer problem çözümünü vermektedir. EK-E birinci örnek problemdeki kutulara ait derinlik, genişlik, yükseklik, ağırlık ve kutu türü bilgilerini göstermektedir. EK-F 1. Örnek probleme ait 3 kriterin (K1, K2, K3) 5 farklı kombinasyonları (0, 25, 50, 75, 100) ile elde edilen 125 çözümün sonuçlarını göstermektedir. Tablo 3.5. bu 125 kombinasyon içinde en iyi ve aynı sonucu veren 7 kombinasyonu göstermektedir. Tablodaki ilk sütun çözümde kullanılan toplam ekipman sayısını ifade etmektedir. İkinci sütun son ekipmanın Y ekseni boyunca ulaştığı en son noktayı göstermektedir. Üçüncü ve dördüncü sütunlarda sırasıyla son ekipmana yüklenmiş olan toplam hacim ve toplam ağırlık listelenmiştir. Son üç sütun sırasıyla üç kriterin o çözüm sırasındaki ağırlık katsayısını göstermektedir. En iyi çözümü veren kombinasyonlardan biri olan K1:75, K2:0 ve K3:50 kombinasyonunun verdiği çözümün bir kesiti Tablo 3.6.'da, çözümün tamamı EK-G'de gösterilmiştir. Tablo 3.6.'nın ilk sütununda çözümde yüklenen kutu numarası, ikinci sütunda o kutunun yüklendiği ekipman numarası, sonraki 3 sütunda sırasıyla kutunun ekipman içindeki hangi Y, X, Z koordinatlarına yüklendiğini göstermektedir.

Tablo 3.5. En iyi çözüm kombinasyonları

Ekipman Sayısı	Y Uzantısı	Hacim	Ağırlık	K1	K2	K3
2	1081	64608320	12947	75	0	50
2	1081	64608320	12947	75	25	50
2	1081	64608320	12947	100	0	75
2	1081	64608320	12947	100	25	75
2	1081	64608320	12947	100	50	75
2	1081	64608320	12947	100	75	75
2	1081	64608320	12947	100	100	75

Tablo 3.6. En iyi çözümden bir kesit

Kutu No	Ekipman	Y	X	Z
8	1	0	0	0
7	1	0	120	0
112	1	0	120	98
111	1	0	120	198
110	1	0	0	98
109	1	0	0	198
107	1	100	120	0
101	1	100	120	100
98	1	100	120	200
97	1	100	0	0
94	1	100	0	100
93	1	100	0	200
88	1	200	120	0
87	1	200	120	100
86	1	200	120	200

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde 32 gerçek yükleme probleminin mecut çözümleri ile geliştirilen model tarafından önerilen çözümlerine ait sonuçlar analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

4.1. Sonuçların Analizi

Önerilen çözümde 1. Problem mevcut yüklemede olduğu gibi iki ekipmana yüklenebilmiştir. Tablo 4.1.'de mevcut yükleme ile önerilen yükleme arasında 1. Ekipmanların yükleme verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Mevcut yüklemede hacim ve ağırlığın ortalama verimi %79,10 olarak gerçekleşirken önerilen çözümde 1. Ekipmanın ortalama kullanım verimi %85,15 olarak gerçekleşmiştir. Böylece önerilen çözümde ilk ekipmanın %6,05 oranında daha verimli yüklendiği söylenebilir. Bu verimlilik 2. Ekipmanda elde edilecek potansiyel yükleme boşluğu için temel oluşturmuştur.

Tablo 4.1. Birinci ekipman yükleme verim artışı

Mevcut Yükleme Verimi			**Önerilen Yöntemde Yükleme Verimi**			
E1 Hacim Verimi	**E1 Ağırlık Verimi**	**E1 Ort. Verimi**	**E1 Hacim Verimi**	**E1 Ağırlık Verimi**	**E1 Ort. Verimi**	**E1 Ort. Verim Artışı**
60,06%	98,15%	79,10%	88,97%	81,34%	85,15%	**6,05%**

Tablo 4.2. 32 adet probleme dair 1. Ekipmanların hem mevcut yükleme hem de önerilen çözümle yüklendiği durumdaki ağrlık ve hacim ve ağırlık ve hacimin oratalama kullanım oranlarını göstermektedir. Tek başına birinci ekipmandaki verimliliğe bakarak çözümün iyiliğini değerlendirmek doğru olmasa bile toplamda elde edilecek iyi çözümün bir parçası olması sebebiyle burada yer verilmiştir.

Sonuçlara göre önerilen yöntem 32 problemin 25 adedinde birinci ekipmanı, ortalama ağırlık ve hacim kullanımı anlamında mevcut yüklemelerden %12,6 oranında, tüm problemlerin ortalamasında %9,07 oranında daha verimli yüklenmiştir. Önerilen yöntem dayanım, hacim ve ağırlığı dengeleyerek bir yükleme yapmaya çalıştığından tek başına birinci ekipmanın daha verimli yüklenmesi doğru bir gösterge olmamasına

rağmen baskın bir iyileşme olması toplam yükleme verimliliğine katkı sağlancağını göstermektedir.

Tablo 4.2. 32 probleme ait birinci ekipman kullanım oranları

Prob. No	Problem Türü	Mevcut Yükleme Bilgileri				Önerilen Yükleme Bilgileri				Mevcut	Önerilen	
		Ekipman1 (m^3)	Ekipman1 (kg)	Ekipman2 (m^3)	Ekipman2 (kg)	Ekipman1 (m^3)	Ekipman1 (kg)	Ekipman2 (m^3)	Ekipman2 (kg)	E1 Ort. Verimi	E1 Ort. Verimi	E1 Ort. Verim Artışı
1	PT1 P1	58809920	23555	92916000	8914	87117600	19522	64608320	12947	79,10%	85,15%	**6,05%**
2	PT1 P2	50694240	23748	90048000	18618	90871200	22535	49871040	19831	75,36%	93,35%	**17,99%**
3	PT1 P3	53813760	23370	62297640	17466	69486760	23715	46624640	17121	76,17%	84,89%	**8,72%**
4	PT2 P1	82635500	16790	77004000	12603	78090500	14817	81549000	14576	77,17%	70,74%	**-6,43%**
5	PT2 P2	84888000	16893	81228000	17884	90300000	19773	75816000	15004	78,54%	87,30%	**8,76%**
6	PT3 P1	82728000	17212	81432000	16556	83544000	16947	80616000	16821	78,10%	77,97%	**-0,14%**
7	PT3 P2	80552000	18104	79580000	16225	87344000	21294	72788000	13035	78,85%	88,96%	**10,11%**
8	PT4 P1	87021500	14007	75843000	21684	90667500	22509	72197000	13182	73,62%	93,19%	**19,57%**
9	PT4 P2	87324000	13696	91104000	16224	93600000	11970	84828000	17950	73,12%	72,73%	**-0,39%**
10	PT5 P1	85670950	12755	51240000	23388	83753000	17638	53157950	18505	70,32%	79,51%	**9,19%**
11	PT6 P1	85699620	19383	75845995	11170	81517615	19134	80028000	11419	84,14%	81,49%	**-2,65%**
12	PT7 P1	79092000	18600	81864000	17424	84696000	16786	76260000	19238	79,14%	78,22%	**-0,92%**
13	PT8 P1	76728000	16679	71834120	21197	86976000	21819	61586120	16057	73,93%	89,87%	**15,94%**
14	PT9 P1	59983000	22103	87888000	19484	84690000	21011	63181000	20576	76,68%	87,02%	**10,34%**
15	PT10 P1	75333251	13414	80454000	10994	91980000	15437	63807251	8971	66,41%	79,13%	**12,71%**
16	PT11 P1	66693000	23840	89940000	13141	87249000	19976	69384000	17005	83,72%	86,17%	**2,45%**
17	PT12 P1	79970000	19240	54752640	23370	80043600	21515	54679040	21095	80,92%	85,69%	**4,78%**
18	PT13 P1	66532760	22338	59211000	22410	78312000	23223	47431760	21525	80,51%	88,37%	**7,86%**
19	PT14 P1	71157120	11399	61503600	23070	82713120	20701	49947600	13768	60,08%	85,36%	**25,28%**
20	PT15 P1	85670950	9656	59359900	15375	91881950	16385	53148900	8646	63,86%	81,05%	**17,19%**
21	PT16 P1	63433400	19594	88627900	14010	89251900	15228	62809400	18376	73,21%	77,30%	**4,09%**
22	PT17 P1	87787584	21492	80109000	12521	81515584	19091	86381000	14922	89,60%	81,40%	**-8,20%**
23	PT18 P1	62914500	15201	72000152	14115	84132652	19162	50782000	10154	63,79%	82,88%	**19,09%**
24	PT19 P1	67022900	17253	87168000	16823	85934900	20612	68256000	13464	70,17%	86,82%	**16,65%**
25	PT20 P1	70152000	21849	66264000	15185	86052000	21751	50364000	15283	81,34%	89,25%	**7,91%**
26	PT21 P1	53880000	19133	54016560	23485	65733248	23015	42163312	19603	67,37%	81,51%	**14,14%**
27	PT22 P1	66453420	14224	83755188	12176	79504608	15415	70704000	10985	63,57%	72,71%	**9,15%**
28	PT23 P1	79776000	23992	76086620	18860	89281620	19197	66581000	23655	90,72%	85,58%	**-5,14%**
29	PT24 P1	51297160	16029	56419200	23757	72955560	20900	34760800	18886	59,59%	80,79%	**21,21%**
30	PT25 P1	90552000	15319	48225600	22922	86448600	21502	52329000	16739	78,15%	88,94%	**10,79%**
31	PT26 P1	61958060	12986	90049620	10467	86726460	17731	65281220	5722	58,69%	81,22%	**22,53%**
32	PT27 P1	48240000	23185	65343753	16828	76143753	21973	37440000	18040	72,93%	84,66%	**11,72%**
											Ortalama	**9,07%**

Tablo 4.2.'de sunulan birinci problem çözümde kullanılan ikinci ekipmanın toplam hacim kapasitesi 97920000 cm^3'ün 64608320 cm^3'ü, başka bir deyişle %65,98'i kullanılmıştır. %34,01'lik hacim kapasitesi müsaittir. Ağırlık olarak da 24000 kg ağırlık kapasitesinin 12947 kg'ı yani %53,95'i kullanılmıştır. %46,05'lik bir müsait ağırlık kapasitesi vardır. Kalan ağırlık ve hacim kapasitesinin tamamının ilave bir yükleme için kullanılması dayanım, istifleme ve uygun yükleme boşluğu anlamında mümkün olmadığından bu kapasitelerin tamamı verimlilik olarak alınamaz. Ancak üretilen çözümün Y eksenindeki en uç uzantısı sonrasında kalan yükleme alanı dayanım ve istifleme kısıtlarından bağımsız olarak yüklemeye müsait alandır. Bu yüklemeye müsait alandaki kısıtlar; toplam ağırlık kısıtı, toplam hacim kısıtı, AGYS ağırlık limitidir. Bu sebeple bu kısıtların sağladığı oransal müsaitliğin en küçüğü

modelin ürettiği çözümün sağladığı net verimlilik olacaktır. Önerilen çözümde 1360 cm uzunluğundaki Y ekseninin 1081 cm'si yükleme için kullanılmıştır. Böylece ekipmanın 1081/1360 = %79,48'i kullanılmış, %20,51'i yüklenebilir müsait alan olarak kalmıştır.

Y ekseninde 1000. cm'den itibaren AGYS4 alanına girildiğinden ve çözümün Y ekseni uzantısı 1081. cm olduğundan AGYS4' te kalan ağırlık limiti AGYS ile ilgili olan kısıttır. Tablo 4.3. birinci probleme ait çözümün 1. ve 2. Ekipman AGYS'larına atadığı ağırlıkları göstermektedir. Buna göre 4800 kg olan AGYS4'ün ağırlık kapasitesinin 58,32 kg'ı kullanılmıştır. 4800 kg ile 58,32 kg'ın farkını alırsak AGYS4'te yüklemeye müsait 4741,68 kg müsait ağırlık vardır. Bunu toplam ekipman ağırlık limiti olan 24000 kg'a oranlarsak, %19,76 oranında bir yükleme müsaitliği olduğunu buluruz.

Tablo 4.3. Birinci problem çözümünde AGYS'na atanan ağırlıklar

Ekipman 1 AGYS'na Atanan Ağırlıkları				Ekipman 2 AGYS'na Atanan Ağırlıkları			
1	2	3	4	1	2	3	4
2665	4870,38	9906,43	2080,19	3035,874	4967,726	4885,08	58,32

Özetle çözümde sunulan 2. ekipmanın toplam hacim kapasitesinin %34,01'i, toplam ağırlık kapasitesinin %46,05'i ilave yüklemeye müsaittir. Aynı zamanda çözümün Y ekseni uzantısından ekipman sonuna kadar bir ekipmanın %20,51'i kadar müsait hacim olduğundan ve aks ağırlık limiti açısından çözümün Y ekseni uzantısı sonrasında bir ekipmanın %19,76'sı kadar müsait bir yükleme kapasitesi olduğundan, 2. ekipmanda bu sayıların en küçüğü olan %19,76 ekipman kadar net bir verimlilik sağlandığı söylenebilir. Diğer bir ifade ile mevcut çözümde iki tam ekipmana yüklenebilen yükler önerilen çözümde 2 - 0,1976 = 1,80 ekipmana yüklenebilir. Tablo 4.4.'de çözümde sunulan 2. Ekipman (E2)' a ait hacim ve ağırlık bakımından yüklemeye müsait kapasiteler gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Birinci problem çözümünde yüklemeye müsait kapasite

E2 Toplam Ağırlık Müsaitlik %'si	**E2 Toplam Hacim Müsaitlik %'si**	**E2 Y Ekseni Müsaitlik %'si**	**E2 Aks Grubu Ağırlık Müsaitlik %'si**	**E2 Müsait En Küçük Ekipman Yüzdesi**
46,05%	34,02%	20,51%	19,76%	**19,76%**

Tablo 4.5'de 32 adet gerçek yükleme problemine ait, önerilen modelle üretilen çözümlerin sonucunda orataya çıkan toplam ekipman sayısı, son ekipmanda ulaşılan en uç Y ekseni değeri, son ekipmana yüklenen toplam hacim, son ekipmana yüklenen toplam ağırlık ve bu çözüme ulaşmayı sağlayan amaç fonksiyonu kriterlerine ait ağırlık katsayıları gösterilmiştir. Buna göre gerçek yüklemelerde iki tam ekipmana yüklenen problemlerin tamamı en fazla iki ekipmana yüklenebilmiştir. Üstelik kutu dayanımı ve aks ağırlık limitine uyum gibi gerçek yüklemelerin garanti edemediği ve zaman zaman problemlere sebep olabilen kısıtlar da bu çözümlerde garanti edilmiştir.

Tablo 4.6.'da tüm örnek problemlere ait ikinci ekipman kullanımlarından arta kalan müsaitlik bilgilerini göstermektedir. Buna göre tüm kısıtların ardından önerilen yöntem gerçek yüklemelere göre daha iyi sonuç vermiştir ve ikinci ekipmanlarda müsait yükleme boşluğu kazanılmıştır. 32 problemde ortalama %13,17 ekipmanlık yüklemeye müsait hacim ve ağırlık kazancı sağlanmıştır. Tablo 4.7. ikinci ekipmanda önerilen çözümlerle birlikte elde edilen kazanca dair istatistikler gösterilmiştir. Buna göre geliştirilen yöntem ile 32 mevcut yükleme için önerilen çözümler, mevcut yüklemelere oranla en az %0,4, en çok %41,18 ve ortalamada %13,17 oranında ekipman kazancı sağlamaktadır.

Özetle önerilen yöntem ve gerçek yüklemeler kıyaslandığında gerçek yüklemelerde iki ekipmanın tamamına yerleştirilen yüklemeler önerilen yöntemle yerleştirilseydi 1. ekipmanlarda ortalama %9,07, birinci ve ikinci ekipmanların toplamında %13,17 ekipmanlık bir kazanç sağlanabilir.

Toplam yükleme verimliliğine baktığımızda gerçek yüklemelerin 2 tam ekipman kullandığını bildiğimizden ikinci ekipmanda elde edilen net kazancı iki ekipmanlık toplam kullanımdan çıkartarak 2'ye böldüğümüzde her bir problem için elde edilen net kazanç %'sini buluruz. Tablo 4.8 ve Tablo 4.9.'de her bir yükleme problemi için elde edilen kazanç oranları ve buna ait istatistikler verilmiştir. Buna göre 32 problemin önerilen çözümlerinde ortalaması %6,59, standart sapması %4,82 olan bir kazanç önerilmektedir.

Önerilen yöntemde ekipman kazancı sağlanmasının yanında mevcut yüklemelerde garanti edilemeyen ve zaman zaman sınırları aştığı için çeşitli problemlere sebep olan

AGYS limitlerine uyum da garanti edilmektedir. Tablo 4.10'da her bir problem için 1. ve 2. ekipmanların AGYS'larına atanan ağırlıklar gösterilmiştir. AGYS ağırlık limitlerinin sırasıyla 3600, 5400, 10200 ve 4800 kg olsuğunu göz önüne aldığımızda hiç bir yüklemeye ait AGYS ataması limitleri geçmemektedir. Tüm kutu yüklemeleri AGYS ağırlık limitlerine uygun olarak yapılmıştır. EK-H'ta tüm yüklemelerin ağırlık merkezi ve ağırlık merkezi yeri uygunluğu gösterilmiştir.

Tablo 4.5. 32 problemin çözüm

Problem Türü	Ekipman Sayısı	E2 Y Uzantısı	E2 Toplam Hacim	E2 Toplam Ağırlık	K1	K2	K3
PT1 P1	2	1081	64608320	12947	75	0	50
PT1 P2	2	1030	48482400	18658	0	100	25
PT1 P3	2	906	47316640	16914	25	0	0
PT2 P1	2	1270	81549000	14576	0	0	0
PT2 P2	2	1300	75816000	15004	25	100	25
PT3 P1	2	1300	80616000	16821	25	50	25
PT3 P2	2	1300	72788000	13035	75	0	50
PT4 P1	2	1200	72197000	13182	50	75	50
PT4 P2	2	1300	84828000	17950	0	25	0
PT5 P1	2	1200	53157950	18505	25	100	75
PT6 P1	2	1300	80028000	11419	100	75	75
PT7 P1	2	1300	76260000	19238	50	25	25
PT8 P1	2	1007	44515560	11873	100	0	25
PT9 P1	2	1170	63181000	20576	75	50	50
PT10 P1	2	1153	63807251	8971	25	0	0
PT11 P1	2	1100	69384000	17005	25	50	50
PT12 P1	2	1104	51703040	20981	75	50	75
PT13 P1	2	1278	46963760	21258	25	0	0
PT14 P1	2	1060	49947600	13768	0	25	75
PT15 P1	2	1020	53148900	8646	100	75	25
PT16 P1	2	1124	61945400	18262	25	25	0
PT17 P1	2	1300	86381000	14922	50	75	25
PT18 P1	2	800	50782000	10154	25	50	25
PT19 P1	2	1100	68256000	13464	25	100	25
PT20 P1	2	900	50364000	15283	0	25	25
PT21 P1	2	1035	42163312	19603	75	0	25
PT22 P1	2	1100	70704000	10985	25	100	75
PT23 P1	2	1300	66581000	23655	75	100	0
PT24 P1	2	1081	34760800	18886	25	100	75
PT25 P1	2	878	50385000	16314	25	0	25
PT26 P1	2	1190	65281220	5722	50	0	25
PT27 P1	2	1100	37440000	18040	75	0	25

Tablo 4.6. Önerilen yöntemle ikinci ekipmanda kazanılan yükleme kapasitesi

Prob. No	Problem Türü	E2 Toplam Ağırlık Müsaitlik %'si	E2 Toplam Hacim Müsaitlik %'si	E2 Y Ekseni Müsaitlik %'si	E2 Aks Grubu Ağırlık Müsaitlik %'si	E2 Yüklemeye Müsait En Küçük Ekipman Yüzdesi
1	PT1 P1	46,05%	34,02%	20,51%	19,76%	19,76%
2	PT1 P2	17,37%	49,07%	17,94%	14,41%	14,41%
3	PT1 P3	28,66%	52,38%	33,38%	27,01%	27,01%
4	PT2 P1	39,27%	16,72%	93,38%	5,83%	5,83%
5	PT2 P2	37,48%	22,57%	4,41%	10,27%	4,41%
6	PT3 P1	29,91%	17,67%	95,59%	1,10%	1,10%
7	PT3 P2	45,69%	25,67%	4,41%	11,57%	4,41%
8	PT4 P1	45,08%	26,27%	11,76%	15,84%	11,76%
9	PT4 P2	25,21%	13,37%	4,41%	2,28%	2,28%
10	PT5 P1	22,90%	45,71%	11,76%	3,44%	3,44%
11	PT6 P1	52,42%	18,27%	95,59%	17,55%	17,55%
12	PT7 P1	19,84%	22,12%	95,59%	2,61%	2,61%
13	PT8 P1	33,10%	37,11%	9,26%	19,41%	9,26%
14	PT9 P1	14,27%	35,48%	13,97%	1,73%	1,73%
15	PT10 P1	62,62%	34,84%	15,22%	17,12%	15,22%
16	PT11 P1	29,15%	29,14%	19,12%	4,80%	4,80%
17	PT12 P1	12,10%	44,16%	18,82%	9,82%	9,82%
18	PT13 P1	10,31%	51,56%	6,03%	7,52%	6,03%
19	PT14 P1	42,63%	48,99%	22,06%	19,02%	19,02%
20	PT15 P1	63,98%	45,72%	25,00%	19,24%	19,24%
21	PT16 P1	23,43%	35,86%	17,35%	15,01%	15,01%
22	PT17 P1	37,83%	11,78%	95,59%	14,62%	11,78%
23	PT18 P1	57,69%	48,14%	41,18%	51,54%	41,18%
24	PT19 P1	43,90%	30,29%	19,12%	17,94%	17,94%
25	PT20 P1	36,32%	48,57%	33,82%	33,78%	33,78%
26	PT21 P1	18,32%	56,94%	23,90%	16,64%	16,64%
27	PT22 P1	54,23%	27,79%	19,12%	19,04%	19,04%
28	PT23 P1	1,44%	32,00%	95,59%	0,40%	0,40%
29	PT24 P1	21,31%	64,50%	20,51%	14,15%	14,15%
30	PT25 P1	30,25%	46,56%	35,44%	28,57%	28,57%
31	PT26 P1	76,16%	33,33%	12,50%	19,40%	12,50%
32	PT27 P1	24,83%	61,76%	19,12%	10,84%	10,84%
Ortalama		**34,49%**	**36,51%**	**32,86%**	**14,76%**	**13,17%**

Tablo 4.7. İkinci ekipmanda önerilen kazanç istatistikleri

min	0,40%
max	41,18%
Ortalama	13,17%
Std. Sapma	9,65%

Tablo 4.8. Önerilen yöntemle sağlanan toplam kazanç %'si

Prob. No	Problem Türü	Mevcut Yükleme Kullanılan Ekipman Sayısı	Önerilen Yöntemde Kullanılan Ekipman Sayısı	Toplam Kazanç %'si
1	PT1 P1	**2,00**	1,80	9,88%
2	PT1 P2	**2,00**	1,86	7,21%
3	PT1 P3	**2,00**	1,73	13,51%
4	PT2 P1	**2,00**	1,94	2,91%
5	PT2 P2	**2,00**	1,96	2,21%
6	PT3 P1	**2,00**	1,99	0,55%
7	PT3 P2	**2,00**	1,96	2,21%
8	PT4 P1	**2,00**	1,88	5,88%
9	PT4 P2	**2,00**	1,98	1,14%
10	PT5 P1	**2,00**	1,97	1,72%
11	PT6 P1	**2,00**	1,82	8,78%
12	PT7 P1	**2,00**	1,97	1,30%
13	PT8 P1	**2,00**	1,91	4,63%
14	PT9 P1	**2,00**	1,98	0,87%
15	PT10 P1	**2,00**	1,85	7,61%
16	PT11 P1	**2,00**	1,95	2,40%
17	PT12 P1	**2,00**	1,90	4,91%
18	PT13 P1	**2,00**	1,94	3,01%
19	PT14 P1	**2,00**	1,81	9,51%
20	PT15 P1	**2,00**	1,81	9,62%
21	PT16 P1	**2,00**	1,85	7,51%
22	PT17 P1	**2,00**	1,88	5,89%
23	PT18 P1	**2,00**	1,59	20,59%
24	PT19 P1	**2,00**	1,82	8,97%
25	PT20 P1	**2,00**	1,66	16,89%
26	PT21 P1	**2,00**	1,83	8,32%
27	PT22 P1	**2,00**	1,81	9,52%
28	PT23 P1	**2,00**	2,00	0,20%
29	PT24 P1	**2,00**	1,86	7,07%
30	PT25 P1	**2,00**	1,71	14,28%
31	PT26 P1	**2,00**	1,88	6,25%
32	PT27 P1	**2,00**	1,89	5,42%
Ortalama		**2,00**	**1,87**	**6,59%**

Tablo 4.9. Sağlanan toplam kazanç istatistikleri

min	0,20%
max	20,59%
Ortalama	6,59%
Std. Sapma	4,82%

Tablo 4.10. Önerilen çözümde AGYS'larına atanan ağırlıklar

		Ekipman 1 AGYS Ağırlıkları				Ekipman 2 AGYS Ağırlıkları			
Prob. No	**Problem Türü**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
1	PT1 P1	2665	4870	9906	2080	3036	4968	4885	58
2	PT1 P2	3184	4987	9295	4791	3060	5120	9786	692
3	PT1 P3	3371	5367	10200	4778	3453	5151	8517	0
4	PT2 P1	2108	3262	5311	4136	2064	3844	5266	3402
5	PT2 P2	3413	5111	8474	2775	3150	4510	5009	2335
6	PT3 P1	3078	4409	5998	3462	2688	4038	5559	4536
7	PT3 P2	3175	5265	8955	3899	2709	3827	4475	2024
8	PT4 P1	3389	4453	10034	4633	3207	3694	5283	998
9	PT4 P2	2745	2700	3759	2766	3407	4203	6088	4252
10	PT5 P1	2534	4182	9029	1893	2610	4360	7560	3975
11	PT6 P1	2286	4837	9314	2697	2168	3422	5242	587
12	PT7 P1	3023	4797	5992	2974	3138	4395	7531	4174
13	PT8 P1	3459	5139	9647	4151	3600	3596	4674	3
14	PT9 P1	3335	4957	8083	4636	3551	4518	8123	4384
15	PT10 P1	3530	3110	4899	3898	3518	2999	1764	690
16	PT11 P1	3280	4663	9229	2804	2726	3350	7282	3647
17	PT12 P1	3545	4678	8624	4782	3261	5140	10137	2443
18	PT13 P1	3577	5389	9469	4788	3540	4954	10035	2996
19	PT14 P1	1909	5258	9243	4291	2722	2892	7918	235
20	PT15 P1	3541	4028	6737	2079	2793	3333	2338	182
21	PT16 P1	3596	2702	5186	3744	3591	5089	8498	1198
22	PT17 P1	2194	5399	8460	3038	2699	4677	6254	1292
23	PT18 P1	2949	4167	7792	4254	3442	4081	2631	0
24	PT19 P1	2406	5379	8693	4134	3155	4275	5540	494
25	PT20 P1	3440	4891	8628	4792	3295	5094	6894	0
26	PT21 P1	3553	5382	9308	4772	3583	5150	10064	807
27	PT22 P1	2640	4497	5644	2634	2124	2575	6056	230
28	PT23 P1	3253	3652	7508	4784	3539	5279	10134	4703
29	PT24 P1	2964	4206	9077	4653	3588	5138	8756	1404
30	PT25 P1	3538	5024	9531	3519	3531	5064	7719	0
31	PT26 P1	3082	5019	6644	2987	2368	1742	1468	144
32	PT27 P1	3343	5394	9060	4176	3430	5145	7267	2198

Bu kısıta uyum firmaları denetim istasyonlarında yapılan kontrollerde aks ağırlık limitini aşım durumunda alacakları para cezası ve diğer yaptırımlardan koruyacaktır.

AGYS kısıtına benzer şekilde gerçek yüklemelerde kutu yük dayanımı kısıtına uyum yükleme yapan operatörün insiyatif ve bilgisi doğrultusunda yapılmaktadır. Bu sebeple yük dayanım kısıtına uyulmadığı bazı durumlarda kutular ve dolayısıyla içindeki malzemeler yükleme, taşıma veya boşaltma sırasında hasarlanabilmektedir. Mevcut yüklemelerde garanti edilemeyen kutu dayanım kısıtına uyum önerilen

çözümlerin tamamında garanti altındadır. İlk dört problemin çözümü öncesindeki ve sonrasındaki kutu yük dayanımları EK-I'da örnek olarak sunulmuştur.

4.2. Öneriler

Çalışma kapsamında çoklu ekipman yükleme problemi için uç noktalar temelli pratik kısıtları dikkate alan bir yöntem geliştirilmiş ve 32 gerçek yükleme problemi üzerinde test edilmiştir. Test sonuçları önerilen yöntemin mevcut yükleme sonuçlarına göre tüm örnek problemler için daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Önerilen yöntem dayanım, istifleme, hacim ve ağırlıkla ilgili kısıtları eş zamanlı değerlendirip tüm problemlerde ortalama %6,59 oranında bir verimlilik sağlamıştır. Yıllık yaklaşık 2200 sevkiyatın düzenlendiği bir bölgeden ortalama %6,59 verimlilik sağlamak yaklaşık 145 sevkiyattan tasarruf etmek anlamına gelmektedir. Taşıma yapılan bölgeden ortalama taşıma ücretlerinin 3000 eur civarında olduğu düşünülürse yıllık 435.000 eur tasarruf etme imkanı doğmaktadır. Ayrıca çevreye verilen zararlarda aynı nisbette azaltılmış olacaktır.

Sevkiyat sayısındaki tasarrufun yanında aks ağırlık limiti aşımı kaynaklı aygulanacak cezalardan tasarruf edilecektir. Dayanım kısıtına tamamen uyulması da bu kısıt sebepli yaşanan hasarların önüne geçecektir. Miktarı firma, taşınan malzeme ve yapılan yükleme uygunluğuna bağlı olarak bu maliyetler de on binlerce eur'ları bulabilmektedir.

Çalışma pratik bir yükleme için gerekli tüm kısıtları sağlamaktadır. İki ekipmanlık bir yük için 2 saat gibi bir sürede çözüm üretilmesi modelin kullanılabilirliğini arttırmaktadır. Firmaların bu modeli kendi problemlerine girdileri değiştirerek rahatlıkla uygulayabilirler.

Modelin kullanılabilirliğinin önündeki en büyük engel yüklenecek kutuların istenen sırada yükleyici operatöre gönderilmesi ve bu operatörün kutuyu doğru yere koymasının sağlanmasıdır. Gelişen sensör, radyo frekans tanımlama ve robot sistemleri sayesinde gerekli tasarımların yapılması bu engelin aşımını önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde yıkacaktır.

KAYNAKLAR

Alvarez-Martinez D., Alvarez-Valdes R., Parreno F., A Grasp Algorithm for the Container Loading Problem with Multi-drop Constraint, *Sobrapo*, 2015, **35**(1), 1-24.

Alonso M.T., Alvarez-Valdes R., Lori M., Parreno F., Tamarit J.M., Mathematical Models for Multi Container Loading Problems, *Technical report submitted to Optimization-Online repository, Omega*, 2017, **66**, 106–117.

Amiouny S.V., Bartholdi J.J., Vande Vate, J.H., and Zhang J., Balanced Loading, *Operations Research*, 1992, **40(**2), 239-246.

Araya I., Riff M.C., A Beam Search Approach to the Container Loading Problem, *Computers & Operations Research*, 2014, **43**, 100–107.

Baldia M.M., Crainic T.G., Perboli G., Tadei R., Asymptotic Results for the Generalized Bin Packing Problem, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, **111**, 663 – 671.

Bischoff E.E., Ratcliff M.S.W., Issues in the Development of Approaches to Container Loading, *Omega*, 1995, **23**, 377–390.

Bischoff E.E., Three-Dimensional Packing of Items with Limited Load Bearing Strength, *European Journal of Operational Research*, 2006, **168**, 952–966.

Bortfeldt A., A Hybrid Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-Dimensional Loading Constraints, *Computers & Operations Research,* 2012, **39**, 2248–2257.

Bortfeldt A., Gehring H., A Hybrid Genetic Algorithm for the Container Loading Problem, *European Journal of Operational Research*, 2002, **131**, 143–161.

Bortfeldt A., Gehring H., Applying Tabu Search to Container Loading Problems, *Operations Research Proceedings*, 1997, **1**, 533–538.

Bortfeldt A., Hahn T., Männela D., Mönch L., Hybrid Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Clustered Backhauls and 3D Loading Constraints, *European Journal of Operational Research*, 2015, **243**, 82–96.

Bortfeldt A., Wäscher G., Constraints in Container Loading – A State of the Art Review, *Research Gate*, 2013, **229**,1–20.

Bortfeldt A., Wäscher G., Container Loading Problems - A State-of-the-Art Review, *Research Gate*, 2012, **7**, 1-48.

Boschetti M.A., New Lower Bounds for the Three-Dimensional finite Bin Packing Problem, *Discrete Applied Mathematics*, 2004, **140**, 241–258.

Brunetta L., Grégoire P., A General Purpose Algorithm for Three-Dimensional Packing, *INFORMS Journal on Computing*, 2005, **17**, 328–338.

Ceschia S., Schaerf A., Local Search for A Multi-Drop Multi-Container Loading Problem, *Journal of Heuristics*, 2011, **19**, 275–294.

Chekanin A.V., Chekanin V. A., Efficient Algorithms for Orthogonal Packing Problems, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2013, **53**, 10, 1457–1465.

Chen C.S., Lee S.M., Shen Q.S., An Analytical Model for the Container Loading Problem, *European Journal of Operational Research*, 1995, **80**, 68–76.

Crainic T.G., Perboli G., Tadei R., A Greedy Adaptive Search Procedure for Multi-Dimensional Multi-Container Packing Problems, *Cirrelt*, 2012, **10**, 1-19.

Crainic T.G., Perboli G., Tadei R., Extreme point-based heuristics for three-dimensional bin packing, *INFORMS Journal on Computing*, 2008, **20**, 368–384.

Crainic T.G., Perboli G., Tadei R., TS2PACK, A Two-Level Tabu Search for the Three-Dimensional Bin Packing Problem, *European Journal of Operational Research*, 2009, **195**, 744–760.

Crainic T.G., Perboli G., Tadei R., Unipack A New Heuristic Framework for Multi-Dimensional Packing Problems, *Proceedings of MIC 2007 the Seventh Metaheuristics International Conference MIC*, 2007, Austria, 12.02.20017.

Davies A.P., Bischoff E.E., Weight Distribution Considerations in Container Loading, *European Journal of Operational Research*, 1999, **114**, 509–527.

Eley M., A Bottleneck Assignment Approach to the Multiple Container Loading Problem, *OR Spectrum*, 2003, **25**, 45–60.

Farøe O., Pisinger D., Zachariasen M., Guided Local Search for the Three-Dimensional Bin-Packing Problem, *INFORMS Journal on Computing*, 2003, **15**, 267–283.

Feng X., Moon I., Shin J., Hybrid Genetic Algorithms for the Three-Dimensional Multiple Container Packing Problem, *Flex Serv Manuf J*, 2013, **27**, 451–477.

Fraser H.J., George J.A., Integrated Container Loading Software for Pulp and Paper Industry, *European Journal of Operational Research*, 1994, **77**, 466–474.

Gehring H., Bortfeldt A., A Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem, *International Transactions in Operational Research*, 1997, **4**, 401–418.

Gehring H., Menschner K., Meyer M., A Computer-Based Heuristic for Packing Pooled Shipment Containers, *European Journal of Operational Research*, 1990, **44**, 277–288.

George J.A., Robinson D.F., A Heuristic for Packing Boxes into A Container, *Computers & Operations Research*, 1980, **7**, 147–156.

Ivancic N., Mathur K., Mohanty B., An Integer Programming Based Heuristic Approach to the Three-Dimensional Packing Problem, *Journal of Manufacturing and Operations Management*, 1989, **2**, 268–298.

Jin Z., Ito T., Ohno K., The Three-Dimensional Bin Packing Problem Ve İts Practical Algorithm, *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements ve Manufacturing,* 2003, **46**, 60–66.

Junqueira L., Morabito R., Sato Yamashita D., MIP-Based Approaches for the Container Loading Problem with Multi-Drop Constraints, *Annals of Operations Research*, 2012, **199**, 51–75.

Junqueira L., Morabito R., Sato Yamashita D., Three-Dimensional Container Loading Models with Cargo Stability Ve Load Bearing Constraints, *Computers & Operations Research*, 2012, **39**, 74–85.

Lai K.K., Xue J., Xu B., Container Packing in A Multi-Customer Delivering Operation, *Computers & Industrial Engineering*, 1997, **35**, 323–326.

Lim A., Ma H., Qiu C., Zhu W., The Single Container Loading Problem with Axle Weight Constraints, *Int. J. Production Economics*, 2013, **144**, 358–369.

Liu J., Yue Y., Dong Z., Maple C., Keech M., A Novel Hybrid Tabu Search Approach to Container Loading, *Computers & Operations Research,* 2011, **38**, 797–807.

Lodi A., Martello S., Vigo D., Heuristic Algorithms for the Three-Dimensional Bin Packing Problem, *European Journal of Operational Research*, 2002b, **141**, 410–420.

Lodi A., Martello S., Vigo D., Tspack A Unified Tabu Search Code for Multi-Dimensional Bin Packing Problems, *Annals of Operations Research*, 2002a, **131**, 203–213.

Mahvash B., Awasthi A., Chauhan S., A Column Generation Based Heuristic for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-Dimensional Loading Constraints, *International Journal of Production Research*, 2017, **55(**6), 1730–1747.

Martello S., Pisinger D., Vigo D., The Three-Dimensional Bin Packing Problem, *Operations Research*, 2000, **48**, 256–267.

Moura A., Bortfeldt A., A Two-Stage Packing Problem Procedure, *International Transactions in Operational Research*, 2015, **24**, 43–58.

Paquay C., Schyns M., Limbourg S., A Mixed Integer Programming Formulation for the Three-Dimensional Bin Packing Problem Deriving From An Aircargo Application, *International Transactions in Operational Research*, 2014, **23**, 187–213.

Perboli G., Crainic T.G., Tadei R., An Efficient Metaheuristic for Multi-Dimensional Multi-Container Packing, *Proceedings of seventh annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, IEEE CASE*, Italy, 24.08.2011.

Pollaris H., Braekers Caris K., Janssens G., Limbourg S., Capacitated Vehicle Routing Problem with Sequence-Based Pallet Loading and Axle Weight Constraints, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2016, **5**, 231–255.

Ratcliff M.S.W., Bischoff E.E., Allowing for Weight Considerations in Container Loading, *OR Spektrum*, 1998, **20**, 65–71.

Ren J., Tian Y., Sawaragi T., A Tree Search Method for the Container Loading Problem with Shipment Priority, *European Journal of Operational Research*, 2011, **214**, 526–535.

Saraiva R.D., Nepomuceno N., Pinheiro P.R., A Layer-Building Algorithm for the Three-Dimensional Multiple Bin Packing Problem, a case study in an automotive company, *Science Direct IFAC PapersOnline,* 2015, **48**(3), 490-495.

Sheng L., Xiuqin S., Changjian C., Hongxia Z., Dayong S., Feiyue W., Heuristic Algorithm for the Container Loading Problem with Multiple Constraints, *Computers & Industrial Engineering*, 2017, **108**, 149–164.

Takahara S., A Simple Meta-Heuristic Approach for the Multiple Container Loading Problem, *IEEE International Conference on Systems, Man ve Cybernetics*, 2006 (SMC 06), Taipei, 16.07.2006.

Taylor G.S., Chan Y., Rasool G., A Three-Dimensional Bin-Packing Model, Exact Multicriteria Solution and Computational Complexity, *Ann Oper Res*, 2014, **251**, 397–427.

Tata Steel Tecnical Information Sheet, Axle Weights and Load Distribution, *TIS-0012, Issue 1*, 2013.

Terno J., Scheithauer G., Sommerweiß U., Riehme J., An Efficient Approach for the Multi-Pallet Loading Problem, *European Journal of Operational Research*, 2000, **123**, 372–381.

Trivella A., Pisinger D., The Load-Balanced Multi-Dimensional Bin-Packing Problem, *Computers & Operations Research*, 2016, **74**, 152–164.

Túlio A., Toffolo M., Esprit E., Wauters T., Berghe G.V., A Two-Dimensional Heuristic Decomposition Approach to A Three-Dimensional Multiple Container Loading Problem, *European Journal of Operational Research*, 2016, **257**, 526–538.

Wascher G., Haußner H., Schumann H., An İmproved Typology Of Cutting and Packing Problems, *European Journal of Operational Research*, 2007, **183**, 1109–1130.

Wei L., Oon W.C., Zhu W., Lim A., A Reference Length Approach for the 3D Strip Packing Problem, *European Journal of Operational Research*, 2012, **220**, 37–47.

Westerlund J., Papageorgiou L.G., Westerlund T., A Problem Formulation for Optimal Mixed-Sized Box Packing, *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 2005, **15**, 913–918.

Wu Y., Li W., Goh M., de Souza R., Three-Dimensional Bin Packing Problem with Variable Bin Height, *European Journal of Operational Research*, 2010, **202**, 347–355.

Xue J., Lai K.K., Effective Methods for A Container Packing Operation, *Mathematical ve Computer Modelling*, 1996, **25**, 75–84.

Xiang Z., Lei D., Zhang Y.,Freights Loading Optimization with Balanced and Unconcentrated Loading Constraints, 2014, **21**, 3386−3395.

Zachariadis E.E., Tarantilis C.D., Kiranoudis C.T., The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-Ups and Deliveries and Two Dimensional Loading Constraints, *European Journal of Operational Research*, 2016, **251**, 369–386.

Zhao X., Bennell J.A., Bektas T., Dowsland K., A Comparative Review Of 3D Container Loading Algorithms, *International Transactions in Operational Research*, 2016, **23**, 287–320.

Zhu X., Lei D.Y., Zhang Y.G., Freights Loading Optimization with Balanced and Unconcentrated Loading Constraints, *Springer*, 2014, **21**, 3386−3395.

EKLER

EK-A

3D-EPL güncelleme algoritması yazılım özeti

3DEPL'i güncelle
Girdi 1: Ekipmana mevcutta yüklenmiş olan kutuların listesi
Girdi 2: 3DEPL, Ekipman I'daki mevcut kutuların oluşturduğu 3DEPL
Girdi 3: k, ($x_k y_k z_k$) noktasına konan kutu
ProjeksiyonAlınabilir: Eğer bir EP k, k kutusunun kenarında yer alıyorsa doğru cevabı dönen fonksiyon
maxsınır[6]= [−1−1−1−1−1−1]
Tüm $i \in I$ için yap
Eğer ProjeksiyonAlınabilir (k,i,Y_X) ve
($x_i + w_i > maxsınır[Y_X]$) o halde
YeniEP[Y_X] = ($x_i + w_i, y_k + d_k, z_k$)
maxsınır[Y_X] = $x_i + w_i$
Eğeri sonlandır
Eğer ProjeksiyonAlınabilir(k,i,Y_Z,) ve
($z_i + h_i > maxsınır[Y_Z]$ o halde
YeniEP[Y_Z]=($x_k, y_k + d_k, z_i + h_i$)
maxsınır[Y_Z]=$z_i + h_i$
Eğeri sonlandır
Eğer ProjeksiyonAlınabilir(k,i,X_Y) ve
($y_i + d_i$ >maxsınır[X_Y] o halde
YeniEP[X_Y]=($x_k + w_k y_i + d_i z_k$) maxsınır[X_Y] = $y_i + d_i$
Eğeri sonlandır
Eğer ProjeksiyonAlınabilir(k,i,X_Z)and ($z_i + h_i > maxsınır[X_Z]$) o halde
YeniEP[X_Z]= ($x_k + w_k y_k z_i + h_i$) maxsınır[X_Z]= $z_i + h_i$
Eğeri sonlandır
Eğer ProjeksiyonAlınabilir(k,i,Z_X) and ($x_i + w_i > maxsınır[Z_X]$) o halde
YeniEP[Z_X]= ($x_i + w_i, y_k, z_k + h_k$)maxsınır[$Z_X$]=$x_i + w_i$
Eğeri sonlandır
Eğer ProjeksiyonAlınabilir(k,i,Z_Y)and ($y_i + d_i > maxsınır[Z_Y]$ o halde
YeniEP[Z_Y]= ($x_k y_i + d_i, z_k + h_k$) maxsınır[Z_Y] = $y_i + d_i$
Eğeri sonlandır
Tümü için yap'ı sonlandır
Tüm EP ∈neweps [] için yap
3DEPL = 3DEPL ∪ {EP} Tümü sonlandır
O3DEPL z, y, x in azalan değerlerine göre sırala,
Çift EP'leri sil
3DEPL'i ver.

EK-B

Artık Alan (RS) güncelleme algoritması yazılım özeti

Girdi 1: kutu_n, ekipmana yeni yüklenen kutu
Girdi 2: 3DEPL, : Ekipmandaki uç nokta (EP) listesi
Tümü için yap EP ∈3DEPL;
Eğer zEP ≥zkutu_n ve zEP <zkutu_n +hkutu_n ohalde
Eğer xEP ≤ xkutu_n ve Kenarındaysa(nltem,Y) ohalde
EPxRSx = minEPXRS Xkutu_n – XEP
Eğeri sonlandır
Eğer yEP ≤ykutu_n ve Kenarındaysa(EP,kutu_n,X) ohalde
EpyRS = minEPyRS,ykutu_n −yEP
Eğeri sonlandır
Eğeri sonlandır
Eğer zEP ≤zkutu_n ve Kenarındaysa(kutu_n,XY) ohalde
EPzRS = minEPzRSzkutu_n −zEP
Eğeri sonlandır
Tümü için yap'ı sonlandır

EK-C

Kutu türlerine ait basınç ve dayanım alanları

Kutu Türü	Kutu Adı	Basınç Alanı	Dayanım Alanı	Altına Kutu Listesi
1	KLT64	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + (Boyut(2) / 2) - 5; BAXS(2) = Lok(2) + (Boyut (2) / 2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut (2); BAYB(4) = Lok(1) BAYS(4) = Lok(1) + 10; BAXB(4) = Lok(2)+10; BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(5) = Lok(1) BAYS(5) = Lok(1) + 10; BAXB(5) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(5) = Lok(2) + Boyut(2) - 10 BAYB(6) = Lok(1) + Boyut(1)-10 BAYS(6) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(6) = Lok(2)+10; BAXS(6) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(7) = Lok(1) + Boyut(1) - 10 BAYS(7) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(7) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(7) = Lok(2) + Boyut(2) - 10	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 2; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 2; DAXB(2) = Lok(2); DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1); DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 2; DAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 2; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2); DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(5) = Lok(1); DAYS(5) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(5) = Lok(2) + 58; DAXS(5) = Lok(2) + 62; DAYB(6) = Lok(1) + 38; DAYS(6) = Lok(1) + 42; DAXB(6) = Lok(2); DAXS(6) = Lok(2) + 60; DAYB(7) = Lok(1) + 78; DAYS(7) = Lok(1) + 82; DAXB(7) = Lok(2); DAXS(7) = Lok(2) + 60; DAYB(8) = Lok(1) + 58; DAYS(8) = Lok(1) + 62; DAXB(8) = Lok(2) + 62; DAXS(8) = Lok(2) + 98;	1,2,3, 4, 5

2	KLT32	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + (Boyut(2) / 2) - 5; BAXS(2) = Lok(2) + (Boyut (2) / 2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut (2); BAYB(4) = Lok(1) BAYS(4) = Lok(1) + 10; BAXB(4) = Lok(2)+10; BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(5) = Lok(1) BAYS(5) = Lok(1) + 10; BAXB(5) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(5) = Lok(2) + Boyut(2) - 10 BAYB(6) = Lok(1) + Boyut(1)-10 BAYS(6) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(6) = Lok(2)+10; BAXS(6) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(7) = Lok(1) + Boyut(1) - 10 BAYS(7) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(7) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(7) = Lok(2) + Boyut(2) - 10	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 2; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 2; DAXB(2) = Lok(2); DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 2; DAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1); DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 2; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2); DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(5) = Lok(1); DAYS(5) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(5) = Lok(2) + 18; DAXS(5) = Lok(2) + 22; DAYB(6) = Lok(1); DAYS(6) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(6) = Lok(2) + 38; DAXS(6) = Lok(2) + 42; DAYB(7) = Lok(1); DAYS(7) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(7) = Lok(2) + 68; DAXS(7) = Lok(2) + 72; DAYB(8) = Lok(1) + 28; DAYS(8) = Lok(1) + 32; DAXB(8) = Lok(2) + 2; DAXS(8) = Lok(2) + 38; DAYB(9) = Lok(1) + 58; DAYS(9) = Lok(1) + 62; DAXB(9) = Lok(2) + 2; DAXS(9) = Lok(2) + 38; DAYB(10) = Lok(1) + 88; DAYS(10) = Lok(1) + 92; DAXB(10) = Lok(2) + 2; DAXS(10) = Lok(2) + 38; DAYB(11) = Lok(1) + 18; DAYS(11) = Lok(1) + 22; DAXB(11) = Lok(2) + 42; DAXS(11) = Lok(2) + 98; DAYB(12) = Lok(1) + 38; DAYS(12) = Lok(1) + 42; DAXB(12) = Lok(2) + 42; DAXS(12) = Lok(2) + 98; DAYB(13) = Lok(1) + 58; DAYS(13) = Lok(1) + 62; DAXB(13) = Lok(2) + 42; DAXS(13) = Lok(2) + 98; DAYB(14) = Lok(1) + 78; DAYS(14) = Lok(1) + 82; DAXB(14) = Lok(2) + 42; DAXS(14) = Lok(2) + 98; DAYB(15) = Lok(1) + 98; DAYS(15) = Lok(1) + 102; DAXB(15) = Lok(2) + 42; DAXS(15) = Lok(2) + 98;	1, 2, 3, 4, 5

3	KLT43	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + (Boyut(2) / 2) - 5; BAXS(2) = Lok(2) + (Boyut (2) / 2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut (2); BAYB(4) = Lok(1) BAYS(4) = Lok(1) + 10; BAXB(4) = Lok(2)+10; BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(5) = Lok(1) BAYS(5) = Lok(1) + 10; BAXB(5) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(5) = Lok(2) + Boyut(2) - 10 BAYB(6) = Lok(1) + Boyut(1)-10 BAYS(6) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(6) = Lok(2)+10; BAXS(6) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(7) = Lok(1) + Boyut(1) - 10 BAYS(7) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(7) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(7) = Lok(2) + Boyut(2) - 10	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 2; DAXB(2) = Lok(2); DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 2; DAYB(3) = Lok(1); DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 2; DAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); DAXB(4) = Lok(2); DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 2; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAYB(5) = Lok(1); DAYS(5) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(5) = Lok(2) + 28; DAXS(5) = Lok(2) + 32; DAYB(6) = Lok(1); DAYS(6) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(6) = Lok(2) + 58; DAXS(6) = Lok(2) + 62; DAYB(7) = Lok(1) + 28; DAYS(7) = Lok(1) + 32; DAXB(7) = Lok(2) + 62; DAXS(7) = Lok(2) + 98; DAYB(8) = Lok(1) + 58; DAYS(8) = Lok(1) + 62; DAXB(8) = Lok(2) + 62; DAXS(8) = Lok(2) + 98; DAYB(9) = Lok(1) + 88; DAYS(9) = Lok(1) + 92; DAXB(9) = Lok(2) + 62; DAXS(9) = Lok(2) + 98; DAYB(10) = Lok(1) + 38; DAYS(10) = Lok(1) + 42; DAXB(10) = Lok(2) + 2; DAXS(10) = Lok(2) + 58; DAYB(11) = Lok(1) + 78; DAYS(11) = Lok(1) + 82; DAXB(11) = Lok(2) + 2; DAXS(11) = Lok(2) + 58;	1,2,3, 4, 5
4	FXC	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + (Boyut(2) / 2) - 5; BAXS(2) = Lok(2) + (Boyut (2) / 2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut (2);	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 4,25; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 4,25; DAXB(2) = Lok(2); DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1); DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 4,25; DAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 4,25; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2); DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	1, 2, 3, 4, 5, 10

5	COP	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + (Boyut(2) / 2) - 5; BAXS(2) = Lok(2) + (Boyut (2) / 2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut (2); BAYB(4) = Lok(1) BAYS(4) = Lok(1) + 10; BAXB(4) = Lok(2)+10; BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(5) = Lok(1) BAYS(5) = Lok(1) + 10; BAXB(5) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(5) = Lok(2) + Boyut(2) - 10 BAYB(6) = Lok(1) + Boyut(1)-10 BAYS(6) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(6) = Lok(2)+10; BAXS(6) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(7) = Lok(1) + Boyut(1) - 10 BAYS(7) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(7) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(7) = Lok(2) + Boyut(2) - 10	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 2,5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 2,5; DAXB(2) = Lok(2); DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1); DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 2,5; DAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 2,5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2); DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	1, 2, 3, 4, 5, 10
6	ODXX	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + 5; BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 5; BAYB(2) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2); BAXS(2) = Lok(2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + 5; BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); BAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; BAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(4) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + 5; DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 5; DAXB(2) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2); DAXS(3) = Lok(2) + 5; DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	6,7
7	UZE5	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(2) = Lok(2) + Boyut (2);	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + 5; DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 5; DAXB(2) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2); DAXS(3) = Lok(2) + 5; DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	1, 2, 3, 6, 7, 10

8	FE13999	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 5; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + 5; BAXB(2) = Lok(2); BAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); BAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; BAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(4) = Lok(2); BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + 5; DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 5; DAXB(2) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2); DAXS(3) = Lok(2) + 5; DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	8
9	TM00080	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 5; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + 5; BAXB(2) = Lok(2); BAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); BAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; BAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(4) = Lok(2); BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + 5; DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 5; DAXB(2) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2); DAXS(3) = Lok(2) + 5; DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	9, 11
10	FE13589	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + (Boyut(2) / 2) - 5; BAXS(2) = Lok(2) + (Boyut (2) / 2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut (2); BAXB(4) = Lok(2)+10; BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(4) = Lok(1) BAYS(4) = Lok(1) + 10; BAXB(5) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(5) = Lok(2) + Boyut(2) - 10 BAYB(5) = Lok(1) BAYS(5) = Lok(1) + 10; BAXB(6) = Lok(2)+10; BAXS(6) = Lok(2) + Boyut(2)/2 - 5; BAYB(6) = Lok(1) + Boyut(1)-10 BAYS(6) = Lok(1) + Boyut(1) BAXB(7) = Lok(2)+ Boyut(2)/2 + 5; BAXS(7) = Lok(2) + Boyut(2) - 10 BAYB(7) = Lok(1) + Boyut(1) - 10 BAYS(7) = Lok(1) + Boyut(1)	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 2,5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 2,5; DAXB(2) = Lok(2); DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1); DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 2,5; DAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 2,5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2); DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(5) = Lok(1) + 40,5 DAYS(5) = Lok(1) + 44,5; DAXB(5) = Lok(2); DAXS(5) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(6) = Lok(1); DAYS(6) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(6) = Lok(2) + 48; DAXS(6) = Lok(2) + 52; DAYB(7) = Lok(1); DAYS(7) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(7) = Lok(2) + 98; DAXS(7) = Lok(2) + 102;	1, 2, 3, 4, 5, 10

11	TM000352	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 5; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + 5; BAXB(2) = Lok(2); BAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); BAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; BAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(4) = Lok(2); BAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + 5; DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 5; DAXB(2) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2); DAXS(3) = Lok(2) + 5; DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2) + Boyut(2) - 5; DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2);	9, 11
12	FE13700	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + (Boyut(2) / 2) - 5; BAXS(2) = Lok(2) + (Boyut (2) / 2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut (2);	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 2,5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 2,5; DAXB(2) = Lok(2); DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1); DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 2,5; DAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 2,5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2); DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(5) = Lok(1); DAYS(5) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(5) = Lok(2) + 48; DAXS(5) = Lok(2) + 52;	1, 2, 3, 4, 5, 10, 12, 13
13	FE13025	BAYB(1) = Lok(1); BAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(1) = Lok(2); BAXS(1) = Lok(2) + 10; BAYB(2) = Lok(1); BAYS(2) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(2) = Lok(2) + (Boyut(2) / 2) - 5; BAXS(2) = Lok(2) + (Boyut (2) / 2) + 5; BAYB(3) = Lok(1); BAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); BAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 10; BAXS(3) = Lok(2) + Boyut (2);	DAYB(1) = Lok(1); DAYS(1) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(1) = Lok(2); DAXS(1) = Lok(2) + 2,5; DAYB(2) = Lok(1); DAYS(2) = Lok(1) + 2,5; DAXB(2) = Lok(2); DAXS(2) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(3) = Lok(1); DAYS(3) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(3) = Lok(2) + Boyut(2) - 2,5; DAXS(3) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(4) = Lok(1) + Boyut(1) - 2,5; DAYS(4) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(4) = Lok(2); DAXS(4) = Lok(2) + Boyut(2); DAYB(5) = Lok(1); DAYS(5) = Lok(1) + Boyut(1); DAXB(5) = Lok(2) + 48; DAXS(5) = Lok(2) + 52;	1, 2, 3, 4, 5, 10, 12, 13

EK-D

Mevcut yüklemelere ait hacim ağırlık kombinasyonları ve sıklığı

Problem Türü	Hacim&Ağırlık Kombinasyonu	Sıklık	%Sıklık	Kümülatif Toplam	Yüzde Kapsama
PT1	50,01-60,00 ve 23001-25000 kg	199	9,03%	199	9,03%
PT2	80,01-90,00 ve 15001-17000 kg	159	7,22%	358	16,25%
PT3	80,01-90,00 ve 17001-19000 kg	134	6,08%	492	22,33%
PT4	80,01-90,00 ve 13001-15000 kg	126	5,72%	618	28,05%
PT5	80,01-90,00 ve 11001-13000 kg	93	4,22%	711	32,27%
PT6	80,01-90,00 ve 19001-21000 kg	90	4,09%	801	36,36%
PT7	70,01-80,00 ve 17001-19000 kg	89	4,04%	890	40,40%
PT8	70,01-80,00 ve 15001-17000 kg	86	3,90%	976	44,30%
PT9	50,01-60,00 ve 21001-23000 kg	83	3,77%	1059	48,07%
PT10	70,01-80,00 ve 13001-15000 kg	71	3,22%	1130	51,29%
PT11	60,01-70,00 ve 23001-25000 kg	70	3,18%	1200	54,47%
PT12	70,01-80,00 ve 19001-21000 kg	61	2,77%	1261	57,24%
PT13	60,01-70,00 ve 21001-23000 kg	56	2,54%	1317	59,78%
PT14	70,01-80,00 ve 11001-13000 kg	56	2,54%	1373	62,32%
PT15	80,01-90,00 ve 9001-11000 kg	56	2,54%	1429	64,87%
PT16	60,01-70,00 ve 19001-21000 kg	52	2,36%	1481	67,23%
PT17	80,01-90,00 ve 21001-23000 kg	51	2,32%	1532	69,54%
PT18	60,01-70,00 ve 15001-17000 kg	49	2,22%	1581	71,77%
PT19	60,01-70,00 ve 17001-19000 kg	49	2,22%	1630	73,99%
PT20	70,01-80,00 ve 21001-23000 kg	43	1,95%	1673	75,94%
PT21	50,01-60,00 ve 19001-21000 kg	35	1,59%	1708	77,53%
PT22	60,01-70,00 ve 13001-15000 kg	34	1,54%	1742	79,07%
PT23	70,01-80,00 ve 23001-25000 kg	33	1,50%	1775	80,57%
PT24	50,01-60,00 ve 15001-17000 kg	31	1,41%	1806	81,98%
PT25	90,01-100,00 ve 15001-17000 kg	31	1,41%	1837	83,39%
PT26	60,01-70,00 ve 11001-13000 kg	30	1,36%	1867	84,75%
PT27	40,01-50,00 ve 23001-25000 kg	27	1,23%	1894	85,97%
PT28	80,01-90,00 ve 23001-25000 kg	25	1,13%	1919	87,11%
PT29	90,01-100,00 ve 17001-19000 kg	25	1,13%	1944	88,24%
PT30	50,01-60,00 ve 13001-15000 kg	22	1,00%	1966	89,24%
PT31	60,01-70,00 ve 7000-9000 kg	22	1,00%	1988	90,24%
PT32	50,01-60,00 ve 17001-19000 kg	20	0,91%	2008	91,15%
PT33	70,01-80,00 ve 9001-11000 kg	20	0,91%	2028	92,06%
PT34	90,01-100,00 ve 13001-15000 kg	20	0,91%	2048	92,96%
PT35	50,01-60,00 ve 11001-13000 kg	18	0,82%	2066	93,78%
PT36	50,01-60,00 ve 9001-11000 kg	16	0,73%	2082	94,51%
PT37	60,01-70,00 ve 9001-11000 kg	16	0,73%	2098	95,23%
PT38	40,01-50,00 ve 21001-23000 kg	15	0,68%	2113	95,91%
PT39	90,01-100,00 ve 19001-21000 kg	15	0,68%	2128	96,60%

PT40	80,01-90,00 ve 7000-9000 kg	13	0,59%	2141	97,19%
PT41	40,01-50,00 ve 19001-21000 kg	9	0,41%	2150	97,59%
PT42	50,01-60,00 ve 7000-9000 kg	9	0,41%	2159	98,00%
PT43	90,01-100,00 ve 11001-13000 kg	8	0,36%	2167	98,37%
PT44	90,01-100,00 ve 21001-23000 kg	7	0,32%	2174	98,68%
PT45	40,01-50,00 ve 15001-17000 kg	5	0,23%	2179	98,91%
PT46	40,01-50,00 ve 13001-15000 kg	4	0,18%	2183	99,09%
PT47	90,01-100,00 ve 23001-25000 kg	4	0,18%	2187	99,27%
PT48	90,01-100,00 ve 9001-11000 kg	4	0,18%	2191	99,46%
PT49	40,01-50,00 ve 17001-19000 kg	3	0,14%	2194	99,59%
PT50	40,01-50,00 ve 7000-9000 kg	3	0,14%	2197	99,73%
PT51	40,01-50,00 ve 9001-11000 kg	2	0,09%	2199	99,82%
PT52	70,01-80,00 ve 7000-9000 kg	2	0,09%	2201	99,91%
PT53	40,01-50,00 ve 11001-13000 kg	1	0,05%	2202	99,95%
PT54	90,01-100,00 ve 7000-9000 kg	1	0,05%	2203	**100,00%**
Toplam		**2203**	**100,00%**	**2203**	**100,00%**

EK-E

1. Problem yüklenecek kutu bilgileri

Derinlik (d)	Genişlik (w)	Yükseklik (h)	Ağırlık (g)	Kutu Türü
100	120	50	99	4
100	120	50	99	4
100	120	50	99	4
100	120	60	71	5
100	120	60	71	5
100	120	98	72	1
100	120	98	210	4
100	120	98	210	4
100	120	98	100	1
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
100	120	98	380	4
127	220	56	723	9
100	120	98	380	4
127	220	56	723	9
100	120	98	380	4
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
100	120	98	380	4
127	220	56	723	9
100	120	98	380	4
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
127	220	56	723	9

127	220	56	723	9
127	220	56	723	9
100	120	98	380	4
80	120	75	40	5
100	120	100	116	12
100	120	100	116	12
100	120	100	116	12
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	116	12
100	120	100	116	12
100	120	100	75	5
100	120	100	75	5
100	120	100	75	5
100	120	100	116	12
100	120	100	102	13
100	120	100	147	5
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	75	5
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	116	13
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	75	5
100	120	100	75	5
100	120	100	75	5
100	120	100	147	5
100	120	100	102	13
100	120	100	147	5
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	147	5
100	120	100	116	12
100	120	100	116	12
100	120	100	75	5
100	120	100	116	12
100	120	100	116	12
100	120	100	75	5
100	120	100	75	5

100	120	100	75	5
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	116	12
100	120	100	75	5
100	120	100	116	12
100	120	100	75	5
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	116	12
100	120	100	116	12
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	102	13
100	120	100	75	5
100	120	100	147	5
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	100	147	5
100	120	100	75	5
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	147	5
100	120	100	102	13
100	120	100	102	13
100	120	98	101	1
100	120	98	155	1
100	120	98	155	1
100	120	98	155	1
100	120	98	155	1
100	120	98	155	1
100	120	95	108	12

EK-F

1. Problemin 125 koşumunun sonuçları

Ekipman Sayısı	Y Uzantısı	Hacim	Ağırlık	K1	K2	K3
3	508	15646400	7230	0	0	0
3	1270	43809920	20244	0	25	0
3	1270	43809920	20244	0	50	0
3	1270	43809920	20244	0	75	0
3	1270	43809920	20244	0	100	0
3	127	6258560	2892	25	0	0
3	254	6258560	2892	25	25	0
3	381	6258560	2892	25	50	0
3	381	6258560	2892	25	75	0
3	381	6258560	2892	25	100	0
3	127	6258560	2892	50	0	0
3	254	6258560	2892	50	25	0
3	127	6258560	2892	50	50	0
3	508	6258560	2892	50	75	0
3	381	6258560	2892	50	100	0
3	127	6258560	2892	75	0	0
3	254	6258560	2892	75	25	0
3	127	6258560	2892	75	50	0
3	254	6258560	2892	75	75	0
3	127	6258560	2892	75	100	0
3	127	6258560	2892	100	0	0
3	254	6258560	2892	100	25	0
3	127	6258560	2892	100	50	0
3	254	6258560	2892	100	75	0
3	127	6258560	2892	100	100	0
2	1081	65376320	12883	0	0	25
2	1081	65376320	12883	0	25	25
2	1081	65376320	12883	0	50	25
2	1081	65376320	12883	0	75	25
2	1081	65376320	12883	0	100	25
2	1081	65328320	12987	25	0	25
2	1081	65328320	12987	25	25	25
2	1081	65328320	12987	25	50	25
2	1081	65328320	12987	25	75	25
2	1081	65328320	12987	25	100	25
2	1081	65328320	12987	50	0	25
2	1081	65328320	12987	50	25	25
2	1081	65328320	12987	50	50	25
2	1081	65328320	12987	50	75	25
2	1081	65328320	12987	50	100	25

2	1081	66528320	13075	75	0	25
2	1081	66528320	13075	75	25	25
2	1081	66528320	13075	75	50	25
2	1081	66528320	13075	75	75	25
2	1081	66528320	13075	75	100	25
2	1081	66528320	13075	100	0	25
2	1081	66528320	13075	100	25	25
2	1081	66528320	13075	100	50	25
2	1081	66528320	13075	100	75	25
2	1081	66528320	13075	100	100	25
2	1081	65376320	12883	0	0	50
2	1081	65376320	12883	0	25	50
2	1081	65376320	12883	0	50	50
2	1081	65376320	12883	0	75	50
2	1081	65376320	12883	0	100	50
2	1081	65328320	12987	25	0	50
2	1081	65328320	12987	25	25	50
2	1081	65328320	12987	25	50	50
2	1081	65328320	12987	25	75	50
2	1081	65328320	12987	25	100	50
2	1081	65328320	12987	50	0	50
2	1081	65328320	12987	50	25	50
2	1081	65328320	12987	50	50	50
2	1081	65328320	12987	50	75	50
2	1081	65328320	12987	50	100	50
2	1081	64608320	12947	75	0	50
2	1081	64608320	12947	75	25	50
2	1081	65328320	12987	75	50	50
2	1081	65328320	12987	75	75	50
2	1081	65328320	12987	75	100	50
2	1081	65328320	12987	100	0	50
2	1081	65328320	12987	100	25	50
2	1081	65328320	12987	100	50	50
2	1081	65328320	12987	100	75	50
2	1081	65328320	12987	100	100	50
2	1081	65376320	12883	0	0	75
2	1081	65376320	12883	0	25	75
2	1081	65376320	12883	0	50	75
2	1081	65376320	12883	0	75	75
2	1081	65376320	12883	0	100	75
2	1081	65328320	12987	25	0	75
2	1081	65328320	12987	25	25	75
2	1081	65328320	12987	25	50	75
2	1081	65328320	12987	25	75	75
2	1081	65328320	12987	25	100	75

2	1081	65328320	12987	50	0	75
2	1081	65328320	12987	50	25	75
2	1081	65328320	12987	50	50	75
2	1081	65328320	12987	50	75	75
2	1081	65328320	12987	50	100	75
2	1081	65328320	12987	75	0	75
2	1081	65328320	12987	75	25	75
2	1081	65328320	12987	75	50	75
2	1081	65328320	12987	75	75	75
2	1081	65328320	12987	75	100	75
2	1081	64608320	12947	100	0	75
2	1081	64608320	12947	100	25	75
2	1081	64608320	12947	100	50	75
2	1081	64608320	12947	100	75	75
2	1081	64608320	12947	100	100	75
2	1081	65376320	12883	0	0	100
2	1081	65376320	12883	0	25	100
2	1081	65376320	12883	0	50	100
2	1081	65376320	12883	0	75	100
2	1081	65376320	12883	0	100	100
2	1081	65328320	12987	25	0	100
2	1081	65328320	12987	25	25	100
2	1081	65328320	12987	25	50	100
2	1081	65328320	12987	25	75	100
2	1081	65328320	12987	25	100	100
2	1081	65328320	12987	50	0	100
2	1081	65328320	12987	50	25	100
2	1081	65328320	12987	50	50	100
2	1081	65328320	12987	50	75	100
2	1081	65328320	12987	50	100	100
2	1081	65328320	12987	75	0	100
2	1081	65328320	12987	75	25	100
2	1081	65328320	12987	75	50	100
2	1081	65328320	12987	75	75	100
2	1081	65328320	12987	75	100	100
2	1081	65328320	12987	100	0	100
2	1081	65328320	12987	100	25	100
2	1081	65328320	12987	100	50	100
2	1081	65328320	12987	100	75	100
2	1081	65328320	12987	100	100	100

EK-G

1. Problemin çözümü

Kutu No	Ekipman	Y	X	Z
8	1	0	0	0
7	1	0	120	0
112	1	0	120	98
111	1	0	120	198
110	1	0	0	98
109	1	0	0	198
107	1	100	120	0
101	1	100	120	100
98	1	100	120	200
97	1	100	0	0
94	1	100	0	100
93	1	100	0	200
88	1	200	120	0
87	1	200	120	100
86	1	200	120	200
108	1	300	120	0
100	1	300	0	0
77	1	300	120	100
92	1	300	120	200
74	1	300	0	100
90	1	300	0	200
42	1	400	0	0
41	1	400	0	56
40	1	400	0	112
39	1	400	0	168
38	1	400	0	224
72	1	527	0	0
68	1	527	0	100
67	1	527	0	200
37	1	627	0	0
36	1	627	0	56
35	1	627	0	112
34	1	627	0	168
33	1	627	0	224
43	1	754	0	0
21	1	754	120	0
19	1	754	120	98
16	1	754	120	196
14	1	754	0	98
12	1	754	0	196

120	1	527	120	0
119	1	527	120	98
118	1	527	120	196
32	1	854	0	0
31	1	854	0	56
30	1	854	0	112
29	1	854	0	168
28	1	854	0	224
5	1	981	0	0
117	1	981	0	60
116	1	981	0	158
4	1	981	120	0
3	1	981	120	60
2	1	981	120	110
1	1	981	120	160
44	1	981	120	210
65	1	1081	120	0
64	1	1081	120	100
58	1	1081	120	200
96	1	1081	0	0
95	1	1081	0	100
114	1	1081	0	200
91	1	1181	120	0
89	1	1181	120	100
113	1	1181	120	200
82	1	1181	0	0
81	1	1181	0	100
106	1	1181	0	200
79	1	200	0	0
78	1	200	0	100
105	1	200	0	200
56	2	0	0	0
52	2	0	120	0
51	2	0	120	100
104	2	0	120	200
47	2	0	0	100
103	2	0	0	200
46	2	100	120	0
45	2	100	120	100
102	2	100	120	200
66	2	100	0	0
121	2	100	0	100
99	2	100	0	195
27	2	200	0	0
26	2	200	0	56

25	2	200	0	112
115	2	327	0	0
76	2	327	0	98
75	2	327	0	198
73	2	327	120	0
62	2	327	120	100
61	2	327	120	200
24	2	427	0	0
23	2	427	0	56
22	2	427	0	112
20	2	427	0	168
18	2	427	0	224
9	2	554	0	0
60	2	554	0	98
59	2	554	0	198
17	2	654	0	0
15	2	654	0	56
13	2	654	0	112
11	2	654	0	168
10	2	654	0	224
57	2	554	120	0
50	2	554	120	100
49	2	554	120	200
48	2	781	0	0
85	2	781	0	100
84	2	781	0	200
83	2	781	120	0
80	2	781	120	100
71	2	781	120	200
70	2	881	120	0
69	2	881	120	100
63	2	881	120	200
55	2	881	0	0
54	2	881	0	100
53	2	881	0	200
6	2	981	120	0

EK-H

Yükleme sonucu ağırlık merkezi ve limit kontrolü sonuçları

Problem	Ekipman	Ağırlık Merkezi	Toplam Ağırlık	Ağırlık Sınıfı Alt Limit	Ağırlık Sınıfı Üst Limit	Ağırlık Merkezi Uygunluğu
1	Ekipman 1	724,86	19522	556,70	840,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
1	Ekipman 2	772,98	12947	363,30	980,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
2	Ekipman 1	699,40	22535	600,00	743,30	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
2	Ekipman 2	761,17	18375	546,70	866,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
3	Ekipman 1	696,16	23922	610,00	720,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
3	Ekipman 2	774,12	16914	493,30	960,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
4	Ekipman 1	683,36	14817	433,30	970,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
4	Ekipman 2	699,41	14576	433,30	970,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
5	Ekipman 1	729,86	19773	556,70	840,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
5	Ekipman 2	728,66	15004	466,70	963,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
6	Ekipman 1	712,01	16947	493,30	960,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
6	Ekipman 2	686,99	16821	493,30	960,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
7	Ekipman 1	704,82	21294	590,00	766,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
7	Ekipman 2	722,93	13035	403,30	976,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
8	Ekipman 1	677,78	22509	600,00	743,30	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
8	Ekipman 2	743,30	13182	403,30	976,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
9	Ekipman 1	710,79	11970	300,00	990,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
9	Ekipman 2	713,18	17950	530,00	900,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
10	Ekipman 1	699,65	17638	530,00	900,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
10	Ekipman 2	697,04	18505	546,70	866,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
11	Ekipman 1	712,31	19134	556,70	840,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
11	Ekipman 2	724,36	11419	300,00	990,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
12	Ekipman 1	716,45	16786	493,30	960,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
12	Ekipman 2	693,58	19238	556,70	840,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
13	Ekipman 1	718,30	21819	590,00	766,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde

13	Ekipman 2	760,35	16057	493,30	960,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
14	Ekipman 1	692,49	21011	590,00	766,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
14	Ekipman 2	705,78	20576	576,70	800,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
15	Ekipman 1	712,50	15437	466,70	963,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
15	Ekipman 2	776,29	8971	100,00	1040,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
16	Ekipman 1	710,26	19976	556,70	840,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
16	Ekipman 2	695,54	17005	530,00	900,00	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
17	Ekipman 1	693,18	21515	590,00	766,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
17	Ekipman 2	736,35	21095	590,00	766,70	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
18	Ekipman 1	694,20	23490	610,00	720	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
18	Ekipman 2	719,57	21258	590,00	766,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
19	Ekipman 1	676,03	20701	576,70	800	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
19	Ekipman 2	731,44	13768	403,30	976,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
20	Ekipman 1	737,46	16385	493,30	960	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
20	Ekipman 2	766,80	8646	100,00	1040	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
21	Ekipman 1	708,89	15342	466,70	963	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
21	Ekipman 2	755,18	18262	546,70	866,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
22	Ekipman 1	702,86	19091	556,70	840	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
22	Ekipman 2	736,25	14922	433,30	970	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
23	Ekipman 1	683,81	19162	556,70	840	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
23	Ekipman 2	776,75	10154	240,00	1000	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
24	Ekipman 1	689,49	20612	576,70	800	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
24	Ekipman 2	758,07	13464	403,30	976,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
25	Ekipman 1	705,53	21751	590,00	766,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
25	Ekipman 2	769,59	15283	466,70	963	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
26	Ekipman 1	710,86	23015	610,00	720	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
26	Ekipman 2	741,58	19603	556,70	840	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
27	Ekipman 1	725,49	15415	466,70	963	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
27	Ekipman 2	708,70	10985	240,00	1000	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde

28	Ekipman 1	683,23	19197	556,70	840	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
28	Ekipman 2	705,63	23655	610,00	720	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
29	Ekipman 1	673,35	20900	576,70	800	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
29	Ekipman 2	756,38	18886	546,70	866,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
30	Ekipman 1	695,54	21502	590,00	766,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
30	Ekipman 2	765,39	16739	493,30	960	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
31	Ekipman 1	743,62	17731	530,00	900	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
31	Ekipman 2	758,75	5722	90,00	1050	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
32	Ekipman 1	704,97	21973	590,00	766,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde
32	Ekipman 2	746,86	18040	546,70	866,7	Ağırlık Merkezi Uygun Yerde

EK-I

Kutu yük dayanımları (kg/cm^2)

PT1_1		PT1_2		Pt1_3		Pt2_1	
Başlangıç	Yükleme Sonrası	Başlangıç	Yükleme Sonrası	Başlangıç	Yükleme Sonrası	Başlangıç	Yükleme Sonrası
0,74	0,00	1,04	0,83	0,74	0,05	1,04	0,00
0,74	0,03	1,04	0,84	0,74	0,05	1,04	0,27
0,74	0,12	0,74	0,45	0,74	0,10	1,04	0,88
0,40	0,21	0,74	0,45	0,74	0,10	1,04	0,75
0,40	0,23	0,74	0,60	0,74	0,42	1,04	0,86
1,04	1,04	0,74	0,67	0,74	0,10	1,04	0,75
0,74	0,66	0,74	0,74	0,74	0,10	0,16	0,00
0,74	0,66	0,74	0,45	0,74	0,42	0,12	0,04
1,04	0,94	0,74	0,60	0,74	0,10	0,99	0,99
36,00	21,54	0,74	0,51	0,74	0,10	0,88	0,37
36,00	21,54	0,74	0,51	0,74	0,42	0,98	0,37
0,74	0,05	0,74	0,51	0,74	0,46	0,88	0,61
36,00	25,16	0,74	0,45	0,74	0,40	0,88	0,37
0,74	0,05	0,74	0,48	36,00	36,00	0,98	0,37
36,00	28,77	0,74	0,48	36,00	32,40	0,88	0,61
0,74	0,05	0,74	0,60	36,00	32,40	0,98	0,34
36,00	32,39	0,74	0,60	36,00	28,80	0,98	0,34
36,00	21,54	0,74	0,50	36,00	28,80	0,88	0,61
0,74	0,05	0,74	0,23	36,00	32,40	0,98	0,37
36,00	21,54	0,74	0,23	36,00	32,40	0,88	0,37
0,74	0,40	0,74	0,48	36,00	32,40	0,88	0,64
36,00	25,16	0,74	0,23	36,00	28,80	0,88	0,39
36,00	28,77	0,74	0,23	36,00	28,80	0,88	0,39
36,00	32,39	0,74	0,48	36,00	32,40	0,88	0,64
36,00	28,77	0,74	0,45	36,00	28,80	0,88	0,39
36,00	28,77	0,74	0,23	36,00	28,80	0,88	0,39
36,00	32,39	0,74	0,23	36,00	32,40	0,88	0,64
36,00	21,54	0,74	0,36	36,00	28,80	0,90	0,28
36,00	21,54	0,74	0,23	36,00	28,80	1,05	0,35
36,00	25,16	0,74	0,23	36,00	32,40	0,90	0,60
36,00	28,77	0,74	0,45	36,00	28,80	1,05	0,38
36,00	32,39	0,74	0,45	36,00	28,80	1,05	0,46
36,00	21,54	0,74	0,74	36,00	32,40	1,05	0,76
36,00	21,54	0,74	0,17	36,00	28,80	0,89	0,76
36,00	25,16	0,74	0,17	36,00	28,80	0,89	0,35
36,00	28,77	0,74	0,45	36,00	32,40	0,89	0,35

36,00	32,39	0,74	0,23	36,00	28,80	0,89	0,62
36,00	21,54	0,74	0,23	36,00	28,80	0,89	0,35
36,00	21,54	0,74	0,17	36,00	32,40	0,89	0,35
36,00	25,16	0,74	0,17	36,00	32,36	0,89	0,62
36,00	28,77	0,74	0,45	36,00	32,36	0,89	0,58
36,00	32,39	0,74	0,48	7,39	7,39	0,89	0,58
0,74	0,40	0,74	0,40	7,39	1,44	0,89	0,29
0,20	0,00	0,74	0,58	7,39	1,44	0,89	0,35
0,34	0,00	0,74	0,48	2,34	0,91	0,89	0,62
0,34	0,16	0,74	0,23	7,39	2,92	0,89	0,35
0,34	0,00	0,74	0,23	0,97	0,41	0,89	0,35
0,34	0,28	0,74	0,48	0,97	0,62	0,89	0,62
0,34	0,03	0,74	0,23	0,97	0,46	0,89	0,35
0,34	0,03	0,74	0,23	0,97	0,62	0,89	0,35
0,34	0,00	0,74	0,60	0,15	0,06	0,89	0,62
0,34	0,16	0,74	0,45	0,15	0,02	0,94	0,36
0,26	0,09	0,74	0,45	0,40	0,33	0,94	0,41
0,26	0,09	0,74	0,60	5,18	4,01	0,94	0,68
0,26	0,17	0,74	0,45	1,04	0,69	0,80	0,32
0,34	0,16	1,04	0,45	1,04	0,92	0,80	0,32
0,34	0,18	1,04	1,00	1,04	0,81	0,94	0,32
0,50	0,17	0,74	0,45	1,04	0,81	0,94	0,41
0,34	0,18	1,04	0,54	1,04	0,92	1,04	0,29
0,34	0,18	1,04	0,40	1,04	0,81	0,94	0,68
0,34	0,03	1,04	0,36	1,04	0,81	1,04	0,28
0,34	0,03	1,04	0,94	0,88	0,79	0,96	0,24
0,26	0,09	1,04	0,74	1,04	0,94	0,85	0,55
0,50	0,17	1,04	0,88	1,04	0,92	0,96	0,24
0,50	0,33	1,04	0,86	1,04	0,76	0,85	0,31
0,34	0,17	1,04	0,81	1,04	0,81	0,85	0,31
0,50	0,17	0,74	0,54	1,04	0,81	0,85	0,58
0,50	0,17	0,74	0,45	1,04	0,81	1,04	0,38
0,26	0,09	0,74	0,28	1,04	0,92	0,56	0,32
0,26	0,17	0,74	0,28	1,04	0,81	1,04	0,92
0,26	0,09	0,74	0,28	1,04	0,81	1,04	0,75
0,50	0,33	0,74	0,50	1,04	0,92	1,04	0,88
0,34	0,18	0,74	0,28	0,96	0,91	1,04	0,96
0,50	0,00	0,74	0,28	0,96	0,91	0,38	0,38
0,34	0,18	0,74	0,51	4,91	4,91	0,72	0,24
0,34	0,18	0,74	0,41	3,59	0,91	0,80	0,27
0,50	0,00	0,74	0,66	0,81	0,16	0,90	0,50
0,34	0,00	0,74	0,28	1,71	1,23	0,80	0,27
0,34	0,16	0,74	0,28	6,47	4,40	0,80	0,53
0,26	0,09	0,74	0,28	1,04	0,41	0,34	0,27
0,34	0,00	1,04	0,41	1,04	0,92	0,72	0,24

0,34	0,16	36,00	36,00	0,16	0,16	0,72	0,48
0,26	0,17	36,00	25,10	0,13	0,08	0,72	0,24
0,26	0,17	36,00	25,10	5,18	4,14	0,72	0,24
0,26	0,17	36,00	28,73	0,96	0,88	0,72	0,48
0,50	0,17	36,00	32,37	0,96	0,88	0,72	0,24
0,50	0,17	36,00	21,46	0,96	0,93	0,72	0,24
0,50	0,33	36,00	21,46	1,04	0,41	0,72	0,48
0,34	0,00	36,00	25,10	1,04	0,64	0,72	0,24
0,26	0,00	36,00	28,73	1,04	0,64	0,72	0,24
0,34	0,16	36,00	32,37	0,96	0,87	0,72	0,48
0,26	0,00	36,00	21,46	0,96	0,50	0,72	0,24
0,50	0,17	36,00	21,46	0,96	0,69	0,72	0,24
0,50	0,17	36,00	25,10	1,04	0,06	0,72	0,48
0,34	0,00	36,00	28,73	1,04	0,02	0,72	0,24
0,34	0,16	36,00	32,37	1,04	0,46	0,72	0,24
0,50	0,33	36,00	36,00	1,04	0,30	0,72	0,48
0,50	0,17	36,00	21,46	1,04	0,82	0,72	0,24
0,34	0,02	36,00	21,46	1,04	0,76	0,72	0,24
0,26	0,09	36,00	25,10	1,04	0,30	0,72	0,48
0,50	0,17	36,00	28,73	1,04	0,70	0,72	0,24
0,34	0,00	36,00	32,37	1,04	0,41	0,72	0,24
0,34	0,00	36,00	21,46	4,03	0,15	0,72	0,48
0,34	0,00	36,00	21,46	1,26	1,21	0,72	0,24
0,34	0,00	36,00	25,10	1,24	0,02	0,80	0,56
0,34	0,00	36,00	28,73	0,44	0,02	0,80	0,32
0,50	0,33	36,00	32,37	1,14	0,91	0,80	0,32
0,26	0,09	36,00	21,51	1,63	0,87	0,80	0,56
0,50	0,33	36,00	36,00	1,38	0,15	0,80	0,32
0,50	0,33	36,00	21,51			0,80	0,32
0,50	0,33	36,00	25,14			0,80	0,56
0,50	0,33	36,00	28,76			0,22	0,12
0,34	0,00	1,04	1,04			0,22	0,18
0,34	0,00	1,04	0,86			0,27	0,20
1,04	0,94	36,00	32,38			0,27	0,07
1,04	0,12					0,31	0,20
1,04	0,12					0,31	0,26
1,04	0,82					0,31	0,27
1,04	0,82					0,27	0,07
1,04	0,93					1,04	0,36
0,34	0,02					1,04	0,97
						1,04	0,85
						1,04	0,98
						1,04	0,93
						0,72	0,24
						0,72	0,48

						0,72	0,24
						0,72	0,24
						0,72	0,48
						0,72	0,24
						0,72	0,24
						0,72	0,48
						0,72	0,24
						0,72	0,24
						0,72	0,48
						0,72	0,24
						0,72	0,24
						0,72	0,48
						0,72	0,72
						1,28	1,28
						1,20	0,07
						1,28	0,07

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Uner, Ö., Özkale C., Aladağ Z., Üretim Sistemi Simülasyonu ve Lastik Sektöründe Uygulanması, *YA/EM'2004 Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği XXIV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, Gaziantep, 15-18 Haziran 2004.

Uner, Ö., Özkale C., Aladağ Z., Yazgan, B. Y., Üretim Sistemi Tasarımında Konveyörlü Taşıma Alternatiflerinin Simülasyon Yöntemiyle Değerlendirilmesi, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2005, **2**, 49-73.

Büyükselçuk E. Ç., **Uner, Ö.**, Özkan C., Kobilerde Çalışma Koşulları-Çalışan Memnuniyeti İlişkisi, *V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul Ticaret Üniversitesi*, İstanbul, 25-27 Kasım 2005.

Akman G., Karakoç Ç., Aladağ Z., **Uner Ö.**, YA/EM Konularının Deneyimli Endüstri Mühendisleri Tarafından Ders Programları Açısından Değerlendirilmesi, *, Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 26. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, 3-5 Temmuz 2006.

Uner Ö., Hepdürlük, M., Aladağ Z., Pres Hatlarında Metot Geliştirme ve Ara Stok Kapasite ArtışınınSimülasyon ile Analizi , *YA/EM'06 Bildiriler Kitabı, Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 26. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, 3-5 Temmuz 2006.

Uner A., **Uner Ö.**, Yuluğkural Y., Aladağ Z., Otomotiv Endüstrisinde Birlikte Talep Edilen Özelliklerin Tespit Edilmesinde Veri Madenciliği-Birliktelik Analizi, *12. Üretim Araştırmaları Sempozyumu,* İzmir, 27-29 Eylül 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İzmit'te doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini İzmit'te tamamlamıştır. Lise eğitimini 1995-1996 yıllarında Çanakkale Fen Lisesi'nde sürdürmüş, İzmit Mimar Sinan Lisesi'nde 1997'de tamamlamıştır. Aynı yıl başladığı Kocaeli Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünden 2001 yılında mezun olmuştur. Yüksek lisansını 2001-2004 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamlamıştır. 2001-2004 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde ve 2004-2007 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 2007 yılından itibaren Ford Otosan firmasında malzeme planlama, proje koordinasyon, bitmiş ürün lojistiği ve malzeme lojistiği konularında çeşitli kademelerde çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.