

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

**İMALAT SEKTÖRÜNDE PARÇA YERLEŞTİRME VE KESME**  
**PROBLEMİNİN OPTİMİZASYONU**

**HÜSEYİN FIRAT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2018**

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

**İMALAT SEKTÖRÜNDE PARÇA YERLEŞTİRME VE KESME**  
**PROBLEMİNİN OPTİMİZASYONU**

**HÜSEYİN FIRAT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2018**

**Tezin Başlığı:** İmalat Sektöründe Parça Yerleştirme ve Kesme Probleminin Optimizasyonu

**Tezi Hazırlayan:** Hüseyin FIRAT

**Sınav Tarihi:** 30.07.2018

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Sınav Jüri Üyeleri**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Davut HANBAY** .....  
İnönü Üniversitesi

**Dr. Öğretim Üyesi Barış Baykant ALAGÖZ** .....  
İnönü Üniversitesi

**Dr. Öğretim Üyesi Nuh ALPASLAN** .....  
Bingöl Üniversitesi

**Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL**  
Enstitü Müdürü

## ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İmalat Sektöründe Parça Yerleştirme ve Kesme Probleminin Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Hüseyin FIRAT

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## İMALAT SEKTÖRÜNDE PARÇA YERLEŞTİRME VE KESME PROBLEMİNİN OPTİMİZASYONU

Hüseyin FIRAT

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

86+xi sayfa

2018

Danışman: Doç. Dr. Davut HANBAY

Kesme ve paketleme problemi, bir yüzeyin veya nesnenin içine çok sayıda düzenli veya düzensiz şeklin örtüşme olmadan düzenli bir şekilde yerleştirilmesidir. Birleştirici optimizasyon yöntemleri içinde yer alan bu problem, matematiksel modelle çözümün zor olduğu, NP-Complete problemi olarak bilinmektedir. Bu problemin amacı, elde bulunan malzemeyi verimli bir şekilde kullanarak elde edilecek atık miktarının en aza indirilmesidir.

Bu tezde, çok çeşitli endüstriyel ve imalat sektöründe yaygın olarak görülen problemlerden biri olan iki boyutlu kesme ve paketleme problemi incelenmiş ve çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Bu kapsamda, kesme ve paketleme problemi için, alt-sol, uygun olmayan çokgen, alt-sol dolgu gibi sezgisel yöntemler ve benzetimli tavlama (BT) ve tabu arama (TA) gibi metasezgisel yöntemler kullanılarak çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, yerleştirme işlemleri için alt-sol ve alt-sol dolgu yöntemleri, yerleştirilen parçalar arasında çakışma olmaması için uygun olmayan çokgen yöntemi ve daha hızlı ve verimli paketleme işlemleri için de metasezgisel yöntemlerden BT ve TA algoritmaları kullanılmaktadır.

Sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen deneyler sonucunda, fire oranının %11,2 ile %15,26 arasında değiştiği görülmektedir. Metasezgisel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda ise, elde edilen fire oranları %2 ile %7,2 arasında değişkenlik göstermektedir ve bu fire oranları ise, çoğu endüstriler için oldukça iyi bir orandır. Deneysel sonuçlar, metasezgisel yöntemlerle yapılan paketleme işlemlerinin daha verimli olduğunu göstermektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Kesme Stok Problemi, Paketleme Problemi, Uygun Olmayan Çokgenler, Alt-Sol Yerleştirme Teoremi, Optimizasyon, Minimum Fire

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **OPTIMIZATION OF PART PLACEMENT AND CUTTING PROBLEM IN THE MANUFACTURING SECTOR**

Hüseyin FIRAT

İnönü University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Computer Engineering

86+xi pages

2018

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Davut HANBAY

Cutting and packing problem is the placement of a large number of regular or irregular shapes into a surface or object without overlapping regularly. This problem, which takes part in combining optimization methods, is known as NP-Complete problem, which is difficult to solve with mathematical model. The purpose of this problem is to minimize the amount of waste that will be produced by using the available material efficiently.

In this thesis, two dimensional cutting and packing problem which is one of the problems which is widely seen in various industrial and manufacturing sectors has been investigated and various applications have been developed. In this manner, solution approaches have been developed for cutting and packing problem using heuristic methods such as bottom-left, no-fit polygon and bottom-left fill and metaheuristic methods such as Simulated Annealing (SA) and Tabu Search (TA). In experimental studies, bottom-left and bottom-left fill methods are used for placement process, no-fit polygon method is used for no overlap between placed parts and metaheuristic methods such as SA and TA algorithms are used for faster and efficient packing process.

As a result of experiments conducted with heuristic methods, it seen that, the waste rate varies between 11.2% and 15.26%. As a result of experiments carried out with metaheuristic methods, the waste rate varies between 2% and 7.2%, and these waste rate is pretty good for most industries. Experimental results show that the packing process using metaheuristics methods is more efficient.

**KEYWORDS:** Cutting Stock Problem, Packing Problem, No-Fit Polygon, Bottom-Left Placement Theorem, Optimization, Minimum Waste

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tez çalışmamın gerçekleşmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan her türlü yardımı ve desteği sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Davut HANBAY' a;

Yüksek Lisans Tez çalışmasında, akademik bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen her zaman yol gösterici olan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nuh ALPASLAN' a;

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi tez çalışmalarım süresince benden desteklerini esirgemeyen değerli AİLEM' e

teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kesme ve Paketleme Problemleri ile ilgili Literatürdeki Terimler .....	6
1.2. Tezin Amacı .....	8
1.3. Literatür Taraması ve Değerlendirilmesi.....	8
1.4. Tezin Organizasyonu .....	9
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	10
3. KESME VE PAKETLEME PROBLEMLERİ.....	17
3.1. Kesme Stok Problemi .....	17
3.1.1. Kesme Stok Probleminin Sınıflandırılması .....	20
3.1.2. Problem Boyutları.....	21
3.1.3. İki Boyutlu Kesme Stok Problemi.....	22
3.1.4. Düzenli Şekiller için Kesme Stok Problemi .....	23
3.1.5. Düzensiz Şekiller için Kesme Stok Problemi.....	24
3.2. Uygun Olmayan Çokgenler (No-Fit Polygons (NFP)).....	25
3.2.1. Minkowski Toplamı .....	29
3.3. Alt-Sol Yerleşim Yöntemi.....	30
3.3.1. Alt-Sol Sezgiselleri .....	31
3.3.2. Alt-Sol Yerleşim Yönteminin Matematiksel Gösterimi.....	32
3.3.3. İşaretler ve Tanımlamalar .....	33
3.3.4. Alt-Sol Yerleşim Teoremi .....	34
3.4. Alt-Sol Dolgu Algoritması .....	36
3.5. Paketleme Problemleri.....	37
3.5.1. Paketleme Problemlerinin Sınıflandırılması.....	38
3.5.2. Problemin Boyutu.....	39
3.5.3. İki Boyutlu Paketleme Problemi.....	40
3.5.4. Düzenli Şekillerin Paketleme Problemi.....	40

3.5.5.	Düzensiz Şekillerin Paketleme Problemi.....	42
3.6.	Paketleme Problemlerinin Çeşitleri .....	43
3.6.1.	Kutu Paketleme .....	43
3.6.2.	Şerit Paketleme.....	44
3.6.2.1.	Düzenli Şerit Paketleme Problemi .....	46
3.6.2.2.	Düzensiz Şerit Paketleme Problemi .....	48
3.7.	Kesme & Paketleme Problemi ve NP-Complete .....	51
4.	OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI .....	52
4.1.	Benzetimli Tavlama Algoritması .....	52
4.2.	Tabu Arama Algoritması .....	57
5.	UYGULAMALAR .....	61
5.1.	Düzenli Şerit Paketleme Problemleri için Çözüm Yaklaşımı .....	62
5.2.	Düzenli Kesme&Paketleme Problemleri için Çözüm Yaklaşımı 1 .....	66
5.3.	Düzenli Kesme&Paketleme Problemleri için Çözüm Yaklaşımı 2 .....	70
5.4.	Düzensiz Kesme&Paketleme Problemleri için Çözüm Yaklaşımı .....	77
6.	SONUÇ .....	80
7.	KAYNAKLAR.....	82

## SİMGELER VE KISALTMALAR

TA	Tabu Arama
TAA	Tabu Arama Algoritması
NFDH	Next-Fit Decreasing Height
FFDH	First-Fit Decreasing Height
BFDH	Best-Fit Decreasing Height
W	Yerleştirme Yapılacak Dikdörtgen Yüzeyin/Alanın Genişliği
H	Yerleştirme Yapılacak Dikdörtgen Yüzeyin/Alanın Yüksekliği
NP	Non-deterministic polinomial
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
1D/2D/3D	1/2/3 Boyutlu
NFP	No-Fit Polygon (Uygun Olmayan Çokgen)
NFP <sub>AB</sub>	B Çokgeni A Çokgeni Etrafında Dolaştığında Oluşan NFP Gösterimi
REF	Referans
$\oplus$	Minkowski Toplamı
BL	Bottom-Left (Alt-Sol)
W <sub>j</sub>	Yerleştirilecek olan Dikdörtgenlerin her birinin Genişliği
H <sub>j</sub>	Yerleştirilecek olan Dikdörtgenlerin her birinin Yüksekliği
X <sub>i</sub>	Yerleştirilecek olan Dikdörtgenin Yatay Koordinatı
Y <sub>i</sub>	Yerleştirilecek olan Dikdörtgenin Dikey Koordinatı
V <sub>i</sub>	Yerleştirilecek olan Dikdörtgenin Yön Bilgisi
BLF-Algorithm	Bottom-Left Fill Algoritması
P	Yerleştirilecek olan Çokgen Listesi
O	Yerleştirilecek olan Çokgenlerin Yönlendirilme Listesi
SA/BT	Simulated Annealing/Benzetimli Tavlama
T	Sıcaklık Değeri
x	Mevcut Çözüm
y	Komşu Çözüm
R	[0,1) Aralığında Düzgün Dağılımlı Rasgele Üretilen Bir Sayı
$\alpha$	İki Sıcaklık Değeri Arasındaki Katsayı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Alt-Sol yöntemi (Jakobs, 1996) .....	15
Şekil 2.2.	Geliştirilmiş alt-sol yöntemi (Liu ve Teng, 1999) .....	15
Şekil 2.3.	Alt-Sol Dolgu uygulanması için yerleşim yerlerinin belirtilmesi.....	15
Şekil 2.4.	Alt-Sol ve Alt-Sol Dolgu yerleştirme sezgisellerinin karşılaştırılması..	16
Şekil 3.1.	Kesme stok probleminin sınıflandırılması .....	21
Şekil 3.2.	1 Boyutlu kesme stok problemi için çelik çubuk örneği.....	22
Şekil 3.3.	İki boyutlu kesme stok problemi örneği .....	22
Şekil 3.4.	Guillotine ve non-guillotine kesim örneği .....	24
Şekil 3.5.	Düzensiz şekilli kesme stok problemi örneği .....	25
Şekil 3.6.	Düzensiz yüzey ve düzensiz şekilli kesme stok problemi .....	25
Şekil 3.7.	A ve B şekilleri için uygun olmayan çokgen gösterimi.....	26
Şekil 3.8.	A ve B çokgenleri için NFP .....	27
Şekil 3.9.	A ve B çokgenleri arasındaki kesişim testi .....	27
Şekil 3.10.	NFP kesişim testi .....	28
Şekil 3.11.	Düzenli şekiller arasında NFP gösterimi .....	28
Şekil 3.12.	$NFP_{AB}$ ' nin ilk kenarı.....	30
Şekil 3.13.	Alt-Sol yerleştirme yöntemi 1.....	31
Şekil 3.14.	Alt-Sol yerleştirme yöntemi 2.....	31
Şekil 3.15.	Alt-Sol köşeler ve alt-sol değişmezliği .....	34
Şekil 3.16.	Alt-Sol yerleştirme teoremi örneği .....	36
Şekil 3.17.	Alt-Sol Dolgu algoritması örneği.....	36
Şekil 3.18.	Paketleme problemlerinin sınıflandırılması.....	39
Şekil 3.19.	Deri ve tekstil endüstrisindeki düzensiz paketleme problemi örneği ....	40
Şekil 3.20.	Guillotineable.....	41
Şekil 3.21.	Non- Guillotineable. ....	41
Şekil 3.22.	İki boyutlu düzensiz şekilli paketleme örneği .....	43
Şekil 3.23.	İki boyutlu kutu paketleme problemi .....	44
Şekil 3.24.	Şerit paketleme probleminin sınıflandırma yapısı .....	45
Şekil 3.25.	Düzenli şerit paketleme problemi ile ilgili yerleştirme algoritmaları... ..	48
Şekil 3.26.	Düzensiz şerit paketleme problemi yerleştirme örneği.....	50
Şekil 3.27.	$C(W,L)$ dikdörtgeni içinde 6 çokgenin uygun yerleşim örneği.....	51

Şekil 4.1.	Benzetimli tavlama algoritmasının akış diyagramı.....	54
Şekil 4.2.	Tabu arama algoritmasının akış diyagramı.....	59
Şekil 5.1.	Geliştirilen uygulama ara yüzü .....	63
Şekil 5.2.	NFDH kullanılarak gerçekleştirilen yerleşim düzeni .....	63
Şekil 5.3.	FFDH kullanılarak gerçekleştirilen yerleşim düzeni .....	64
Şekil 5.4.	BFDH kullanılarak gerçekleştirilen yerleşim düzeni.....	64
Şekil 5.5.	Düzenli şerit paketleme problemi çözüm örneği .....	66
Şekil 5.6.	Örnek 1'e ait yerleşim modeli.....	68
Şekil 5.7.	Örnek 2'ye ait yerleşim modeli.....	70
Şekil 5.8.	Geliştirilen metasezgisel yerleşim yöntemlerine ait akış diyagramı.....	71
Şekil 5.9.	20 dikdörtgenden oluşan ilk yerleşim düzeni .....	72
Şekil 5.10.	Örnek 3'e ait fire oranları .....	73
Şekil 5.11.	Ç3 çalışmasının yerleşim düzeni. ....	73
Şekil 5.12.	P3 probleminin ilk yerleşim düzeni .....	75
Şekil 5.13.	P3 probleminin optimize edilmiş yerleşim düzeni.....	75
Şekil 5.14.	Örnek 4'e ait fire oranları .....	75
Şekil 5.15.	Örnek 5'e ait fire oranları .....	77
Şekil 5.16.	Önerilen yerleşim yöntemine ait akış diyagramı .....	78
Şekil 5.17.	İki boyutlu düzensiz kesme & paketleme problemi çözüm örneği.....	79

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Kesme ve paketleme problemlerinin topolojisi (Dyckhoff, 1990) .....	3
Çizelge 1.2.	Kesme ve paketleme problemi için yapılan bazı çalışmalar .....	4
Çizelge 5.1.	Yerleştirilecek dikdörtgen parçaların genişlik ve yükseklikleri .....	65
Çizelge 5.2.	Örnek 1'e ait dikdörtgen parçaların boyutları.....	68
Çizelge 5.3.	Örnek 2'e ait dikdörtgen parçaların boyutları.....	69
Çizelge 5.4.	20 adet dikdörtgenin yerleşim düzenine ait verimlilik değerleri .....	72
Çizelge 5.5.	5 farklı problem boyutu için yerleşimdeki verimlilik değerleri.....	74
Çizelge 5.6.	Optimizasyon algoritmaların verimliliklerinin karşılaştırılması.....	76

## 1. GİRİŞ

Kesme ve paketleme problemleri, günlük yaşamda birçok farklı durumda ortaya çıkar. Bir bireyin, bir bavulun içine elbiselerini yerleştirmesi veya bir dondurucuda gıda maddelerinin yerleştirilmesi gibi paketleme problemleri örnek olarak verilebilir. İnsanlar paketleme problemlerini sezgisel ve mekânsal farkındalık kullanarak nispeten iyi çözebiliyor gibi görünmektedir. Fakat, benzer birçok paketleme probleminin olduğu endüstriyel bir ortamda, bu tür problemleri tek başına manüel yollarla çözmek genellikle mümkün değildir ve daha fazla insan kullanılması gerektiğinden maliyet açısından uygun değildir. Kesme ve paketleme problemlerinin bilgisayar destekli otomasyonu, bu probleme uygun bir çözüm sunmaktadır ve bu çözüm akademik ve endüstriyel toplulukların elli yıllık araştırmalarının odak noktası olmuştur. İnsanların aksine, bilgisayarların sezgisel veya mekânsal farkındalığı yoktur ve bu nedenle düzenlerin oluşturulması için algoritmaya dayalı yöntemler geliştirilmiştir. Endüstriyel olarak, problem genellikle daha karmaşıktır ve daha fazla temsil ve ek kısıtlamaların ve amaçların modellenmesini gerektirir.

1940'lı yıllardaki çalışmalardan bu yana, kesme ve paketleme problemleri imalat sanayilerinde, maliyetleri azaltarak kârlılığını artırma aracı olarak ilgi görmüştür ve aynı zamanda akademik topluluk içinde giderek daha aktif bir araştırma alanı haline gelmiştir. Kesme ve paketleme problemleri için temel olarak şunlar gereklidir: (i) bir dizi kullanılabilir kaynak (malzeme) ve (ii) kaynaklara atanması gereken bir dizi öğe (şekil/parça). Genel durumda, temel amaç, kaynakların kullanımını en aza indirirken ve belirli problemlere özgü kısıtlamaları yerine getirirken tüm öğeleri (şekilleri) belirlemektir.

Kesme ve paketleme endüstrisinde (ve akademik literatürde) bulunan çok sayıda problem adından dolayı ve bunlardan birçoğunun aynı türden bir probleme gönderme yapması nedeniyle, kesme ve paketleme problemlerinde altta yatan yapıyı araştırmak ve akademik toplumda araştırmanın verimliliğini arttırmak ve kolaylaştırmak için problemleri daha duyarlı bir şekilde sınıflandırmak önemlidir. Bu doğrultuda, 1990 yılında Dyckhoff, dört özelliğe dayanan problem tiplerini tanımlayabilecek bir topoloji önermiştir [9].

İlk özellik, problemin boyutsallığının tanımlanmasını içerir: bir, iki, üç ve N boyutlu. Bunların hepsi, N-Boyutlu paketleme dışında açıklayıcıdır. N boyutlu bir problemin bir örneği olarak kamyon yüklemesini düşünün. Bu doğal olarak üç mekânsal boyut içerir, ancak ağırlık da önemli bir faktör ise başka bir mekânsal olmayan boyut eklenebilir. Artık her öğenin dört boyutu vardır: uzunluk, yükseklik, genişlik ve ağırlık. Ağırlık dahil olmak üzere yükleme probleminin bir örneği Davis ve Bischoff (1999) tarafından sunulmuştur. N boyuttaki problemlere örnek olarak, veri depolama için bilgisayar belleğinin dinamik dağılımı ve sermaye bütçeleme problemi de verilebilir.

İkinci özellik, ilgili görev türüdür. İki seçenek sunulur: i) kaynaklar (nesneler) tüm öğeleri yerleştirir, ii) kaynaklar sınırlıdır ve tüm öğeler yerleştirilemez. Birinci durumda, şekillerin iyi bir şekilde düzenlenmesi üzerinde durulurken, ikinci durumda amaç, bazı nesnel işlevleri en aza indirmek için sınırlı kaynaklara mümkün olduğunca çok öğe yerleştirmektir.

Üçüncü özellik, büyük kaynakların (nesnelerin/malzemenin) çeşitliliğini içerir (iki boyutlu paketlemede kullanılan malzemeler). Tartışılan seçenekler şunlardır: i) tek bir kaynak, ii) çoklu özdeş kaynaklar ve iii) çoklu farklı kaynaklar. İlk durumda pratik farklılık, kaynaklar arasında bir etkileşim olmamasıdır. Birden fazla özdeş kaynakla, kaynakların kullanıldığı ikinci durumda, çözüm kalitesi üzerinde hiçbir etkiye sahip değildir, ancak mevcut kaynak üzerinde yerleştirme işlemi tamamlandıysa yeni bir kaynağın başlatılması gerekir. Son durumda, farklı kaynakların kullanıldığı durumda, üretilen çözümlerin kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve bir kez daha, bir başkasının yerleştirme işleminin tamamlanması halinde yeni bir kaynağın ne zaman başlayacağı tanımlanmalıdır.

Son özellik, küçük şekillerin çeşitliliği ile ilgilidir (iki boyutlu paketlemedeki şekiller). Seçenekler şunlardır: i) aynı şekiller, ii) az sayıda ve farklı şekiller, iii) çok sayıda aynı ancak birkaç farklı şekil ve iv) birçok aynı ve birçok farklı şekil. Bu şekillerin yerleştirilme işlemleri problemlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu dört özellik, kesme ve paketleme problemleri için bir sınıflandırma oluşturacak şekilde birleştirilebilir.

Çizelge 1.1. Kesme ve paketleme problemlerinin topolojisi (Dyckhoff, 1990)

KARAKTERİSTİK	AÇIKLAMA
Boyut	1 Boyutlu 2 Boyutlu 3 Boyutlu N Boyutlu
Görev Türü	Tüm Nesnelere ve Şekillerin Seçimi Nesnelerin ve Tüm Şekillerin Seçimi
Büyük Nesnelerin Çeşitliliği	Bir Nesne Birden Fazla Aynı Nesne Birden Fazla Farklı Nesne
Küçük Şekillerin Çeşitliliği	Aynı şekiller Az sayıda ve farklı şekiller Çok sayıda aynı ancak birkaç farklı şekil Çok sayıda aynı ve birçok farklı şekil

Birçok farklı bilim dalında çok çeşitli problemlere kesme ve paketleme özellikleri uygulanabilir. Dyckhoff [9] tarafından tanımlandığı gibi aşağıdaki alanlarda araştırma yapılmıştır: bilgisayar bilimi, lojistik, yönetim bilimi, endüstri mühendisliği, mühendislik bilimi, birleştirici optimizasyon, üretim araştırması, matematik ve üretim.

Kesme ve paketleme problemleri 1940'lı yıllardan beri ana araştırma alanı olmasına rağmen 1960'ların başlarında bir araştırma alanı olmuştur. Geçtiğimiz yarım yüzyılda, çeşitli problemler ve endüstriler için iyi kesim kalıpları üretmek için birçok teknik geliştirilmiştir. 1960'lardan beri kesme ve paketleme problemlerine ilginin nasıl geliştiği Çizelge 1.2'de görülebilir. Bu literatür taramasında yayınlanmış olan tüm makaleleri belirtmek pratik olmayabilir. Bu nedenle, bu yaklaşım, en önemli olduğu düşünülen makaleleri ve bu tezin ele aldığı araştırma alanı için en uygun olanları vurgulamaktadır. Yıllar boyunca, bugüne kadar yürütülen işlere bakarak bir çizelge hazırlanmıştır ve Çizelge 1.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Kesme ve paketleme problemi için yapılan bazı çalışmalar

YAZAR	YIL	YAZAR	YIL
Hopper and Turton	1997	M. B. Aryanezhad	2012
Hopper and Turton	2000	S. C. H. Leung, Y. Lin	2012
Oliveira	2000	Alvarez-Valdes	2013
Cheng ve Rao	2000	Toledo	2013
Oliveira, Gomes and Ferreira	2000	Bonfim A. Junior and Rommel	2013
Hopper and Turton	2001	Yanxin Xu, Genke Yang	2013
Dowland, Vaid and Dowland	2002	A. Miguel Gomes	2013
A. F. Mahmoud, M. Samia	2003	S. Nozarian, M. V. Jahan	2013
A. Soke	2003	E. López-Camacho	2013
K. Ergun	2004	E. Albayrak	2013
G. Whitwell	2004	Igor Kierkosz, Maciej Luczak	2014
Gomes ve Oliveira	2006	L.Cherri	2016
A. Bortfeldt	2006	J. F. Oliveira	2016
A. Soke and Z. Bingul	2006	Defu Zhang	2016
M. Chen and W. Huang	2007	E. Lo Valvo	2017
Wäscher	2007	J. Peralta	2017
Fischetti ve Luzzi	2009	Martinez-Sykora, A. Valdes	2017
V. Mancapa, T. I. Van Niekerk	2009	Lijun Wei	2017
T.Imamichi, M.Yagiura	2009	L. Wei, W. Zhu	2017
K. Yavuz	2010	Abeysooriya, Julia A. Bennell, Antonio Martinez	2018
W. Huang, T. Ye	2011		

Kesme ve paketleme problemleri pratik önemi olan birleştirici optimizasyon problemleridir. Çoğu imalat durumunda hammaddenin daha küçük parçalara kesilmesi gerekir. Bu işlem genellikle atıkla sonuçlanır. Bu nedenle, mümkün olduğunca fazla olan atığı azaltmak ve dolayısıyla malzeme kullanımını maksimuma çıkarmak istenmektedir. Bunun örnekleri, cam, kâğıt, çelik, yarı iletken, tekstil, giyim, deri, otomotiv ve diğer birçok endüstride görülmektedir. Bu problemler, tasarımdan, üretim sürecinin çeşitli yönlerine, dağıtım ve satışa kadar, tüm iş aktivitelerinde ortaya çıkar.

Örneğin, belirli bir parça setinin bir malzemedan kesilmesi, malların sabit bir yükleme alanına yüklenmesi ve bir gazete sayfasının düzeninin tasarlanması ve bir dizi talep edilen şeklin veya parçanın üst üste binmeden belirli bir bölgeye yerleştirileceği pratik problemlerdir. Bazı durumlarda hem parçalar hem de yerleştirme yapılacak bölge dikdörtgen şeklindedir. Bununla birlikte, parçaların ve yerleştirme yapılacak bölgenin düzensiz şekilli olduğu birçok durum vardır. Problemin dikdörtgen versiyonundan daha az çalışılmış olmasına rağmen, bu konuyla ilgili önemli miktarda literatür bulunmaktadır. Temel problem, parçaların, örtüşmeyen bir bölge veya malzeme tabakasında etkili bir şekilde düzenlenmesinin belirlenmesidir. Bu problem, farklı endüstrilerin, farklı kısıtlamalar içinde ve farklı amaçlarla çalıştığını gösterir. Çünkü her endüstride kullanılan malzeme ve yerleştirme işlemi için kullanılan şekiller farklıdır. Bu nedenle her endüstri kendi yaklaşımını geliştirme eğilimindedir. Örneğin, gemi inşa endüstrisi parçaların iç içe yerleştirme problemini ifade ederken, giysi endüstrisinde genellikle marker yerleşim problemi olarak bilinir.

Kesme ve paketleme problemleri, gerekli olan hammaddelerin azaltılması yoluyla çevresel faydalar sağlamanın yanı sıra, endüstriyel ve imalat sektörlerinde önemli maliyet avantajları sağlamaktadır. Bu tez, çok çeşitli endüstriyel ortamlarda yaygın olarak görülen iki boyutlu kesme ve paketleme problemini ele almaktadır. Daha geniş bir yüzeyin veya nesnenin içine çok sayıda düzenli veya düzensiz şeklin iyi bir şekilde yerleştirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yerleşim işleminin gerçekleşmesi için bir dizi kural veya kısıtlamalar tanımlanmaktadır. Bu işlemlerin amacı, malzeme kullanımını en üst düzeye çıkarmak ve böylece oluşan boş alanı en aza indirmektir. Bu, endüstriyel ve imalat sektörleri için oldukça önemlidir çünkü yerleşimdeki küçük gelişmeler malzeme tasarrufu ve üretim maliyetlerinde önemli bir azalma ile sonuçlanabilir. Problemin karmaşıklığı ve çözüm yöntemi, yerleşim yapılacak alanın ve yerleştirilecek olan şekillerin geometrisine ve uygulanan kısıtlamalara bağlıdır.

Kesme ve paketleme problemleri, temelde aynı mantıksal yapıdaki problemlerin literatürde farklı isimler altında ortaya çıkmasıyla karakterize edilmiştir. Literatürde kesme ve paketleme problemleri için birçok isim vardır. Dyckhoff [9], aşağıdaki problemleri literatürde yer alan isimler olarak listelemektedir:

- Kesme stok problemleri ve kesim kaybı problemleri

- Kutu Paketleme (Bin Packing), Şerit Paketleme (Strip Packing) ve Knapsack problemleri
- Araç, Palet, Konteynır ve Araba yükleme problemleri
- Sınıflandırma, Azaltma, Tasarım, Bölme, Düzen ve Yerleştirme problemleri
- Zamanlama, Bellek ayırma, Değişim, Çizgi Dengeleme problemleri

### 1.1. Kesme ve Paketleme Problemleri ile ilgili Literatürdeki Terimler

Aşağıda, kesme ve paketleme problemlerini tanımlamak için kullanılacak terimlerden bazıları açıklanmıştır.

**Sınıflandırma Problemi:** Bu problem, hangi stok parçalarının tutulacağına karar vermekle ilgilidir (ve sonra kullanılacaktır) böylece kesme ve paketleme işlemi verimli bir şekilde yapılır.

**Kutu Paketleme Problemi:** Bir veya daha fazla kutunun en iyi duruma getirileceği şekilde, yerleştirme yapılacak yüzeyde örtüşme olmadan belirli bir şekilde şekillerin yerleştirilmesini sağlayan NP-Hard/Complete birleştirici bir problemdir. Bu problem, birtakım öğeleri (şekilleri) paketlemek için gereken minimum sayıda kutu sayısının belirlenmesi ile ilgilidir. Problemin birkaç farklı versiyonu vardır ve tek boyutlu veya çok boyutlu öğeler (şekiller) ve kutular olabilir. Problem, endüstriyel üretim, araç yükleme, zamanlama, araç yönlendirme ve entegre devre üretimi gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir.

**Kesme Stok Problemi:** Bu problem, normalde tüm kesme ve paketleme problemleri sınıfı için genel bir terim olarak kullanılır. Tam olarak, kesilecek parçaların ve kullanılan malzemenin her ikisinin de dikdörtgen olduğu bir problemi belirtmek için kullanılan terimdir.

**Düzen Problemi:** Yüzeydeki şablonların (şekiller) düzenlemesi problemidir. Normalde giyim endüstrisi için geçerlidir.

**Yükleme Problemi:** Bu problem, normal bir üç boyutlu paketleme için açıkça kullanılmakta olup, bu sayede kutular bir konteynerin içine yerleştirilmelidir. Genellikle yükleme paletleri veya kamyonlar ile ilgili üç boyutlu problemleri ifade eder.

**Kesim Kaybı Problemi:** Kesme ve paketleme problemlerinde, büyük nesnelere, kalan atıkları minimize etmek amacıyla genellikle daha küçük parçalara kesilmelidir. Bu nedenle kesim problemlerine genellikle kesim kaybı problemleri de denir. Tüm şekiller kesildikten sonra atık malzeme genellikle kesim kaybı olarak adlandırılır. Kesme ve paketleme problemleri kesim kaybını en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

**Knapsack (Sırt Çantası) Problemi:** Bir işlevin minimize edileceği şekilde, her birinin bunlarla ilişkili bir değere sahip olduğu bir nesne kümesinin bir kombinasyonunu belirleyen problemdir. Bu problem, her birinin büyüklüğü ve değerlendirmesine (ya da kullanılabilirliğinin ölçüsüne) sahip olan sabit kapasitedeki bir nesneden ve bir dizi şekilden oluşmaktadır. Amaç, knapsack kapasitesi kısıtlamasını gözlemleyerek maksimum toplam değerlendirmeyle öğeleri (şekilleri) paketlemektir. Bu problem, her bir parçaya atanan değer üzerinde bazı ek kısıtlamalarla birlikte bir kutu paketleme problemi olarak görülebilir.

**Marker Yerleşim Problemi:** Bu problem, iki boyutlu düzensiz paketleme problemiyle ilgilidir. Şablonların (şekillerin) yüzeydeki yerleşim problemidir. "Marker" terimi, tekstil endüstrisinde kesilmesi gereken bir maddeyi ifade etmek için kullanılır. Normalde giyim endüstrisi için geçerlidir. Giyim endüstrisinde, kıyafetler genellikle birkaç parçadan oluştuğundan, problem oldukça düzensiz parçaları içerebilir.

**Yerleştirme Problemi:** Düzensiz şekillerin paketlenmesi problemidir. Genellikle deri, otomotiv, giyim vb. gibi uygulamalarda kullanılır.

**Şerit Paketleme Problemi:** Büyük bir nesnenin içine bir dizi küçük parçaların veya şekillerin yerleştirilmesi problemidir. Yerleştirilecek şekiller birbirleriyle örtüşmemeli ve tamamen büyük nesnenin içinde olmalıdır. Bu problem, birçok pratik ortamda bulunabilir ve ahşap levhaların, çelik plakaların veya kâğıt ruloların kesilmesi ve aynı zamanda çok boyutlu kaynak planlaması gibi pek çok endüstriyel uygulamalara sahiptir.

## 1.2. Tezin Amacı

Bu tezin yazımındaki temel amaç, iki boyutlu kesme ve paketleme problemlerini araştırmak ve endüstriyel ve imalat sektörlerinde elde bulunan malzemenin maksimum verim alınacak şekilde bir imalat planlaması yapmaktır. Bu imalat planlamasında ise, malzemeyi verimli kullanmak oldukça önemlidir. Malzemenin verimliliği, o malzemenin en az fire (atık) verilecek şekilde kesim yapılmasıyla doğrudan bağlantılıdır. Fire, ne kadar az ise, verimlilik o kadar fazladır. Kesim işleminin iyi yapılması için de kullanılacak endüstriye göre malzeme üzerine yerleştirilecek olan parçaların (şekillerin) maksimum bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu yerleştirme işlemlerinin verimli bir şekilde gerçekleşmesi için çeşitli optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir ve bu optimizasyon algoritmalarıyla daha hızlı ve daha verimli paketleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

## 1.3. Literatür Taraması ve Değerlendirilmesi

Literatürde düzenli şekiller için iki boyutlu kesme ve paketleme problemleri üzerine bir dizi araştırma yapılmıştır. Bununla birlikte, düzensiz şekle sahip paketleme problemleri çok fazla ilgi görmemiştir. Bu muhtemelen düzensiz şekillerin geometrik karmaşıklığı nedeniyle olur. Son yıllarda, düzensiz şekle sahip paketleme problemleri için uygun bölgeleri kontrol etmek veya üretmek için bazı etkili yaklaşımlar önerilmekte ve kullanılmaktadır. Bu problemlerin geometrisi hakkında detaylı bir araştırma yapılmıştır. Literatürde, geometri problemini çözmek için raster yöntemler, doğrudan trigonometrik yöntemler, uygun olmayan çokgen ve phi-fonksiyonu gibi yöntemler bulunmaktadır. Biz uygulamamızda uygun olmayan çokgen (No-Fit Polygon (NFP)) yöntemini kullanıyoruz ve uygun olmayan çokgeni minkowski toplamı ile elde ediyoruz.

Küçük paketleme problemlerinin çözümü için maksimum malzeme kullanımı üretmeyi amaçlayan algoritmalar geliştirilmiştir. Daha büyük ve karmaşık problemler için bu algoritmalar çok sayıda olası çözümden dolayı verimsiz hale gelir ve hesaplama süresi katlanarak büyür. Bundan dolayı bu problemlerin deterministik olmayan bir polinom (NP-Complete) olduğu söylenmektedir.  $P=NP$  olmadığı sürece bu problemleri tam olarak polinom zamanında çözmek imkansızdır. Bu nedenle,

geleneksel yöntemler optimal bir çözüm üretilmediğinden, optimal çözümler üretebilen pratik algoritmaların tasarlanması için sezgisel ve metasezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında genetik algoritmalar, benzetimli tavlama, local search, tabu arama ve yapay sinir ağları vb. gibi optimizasyon algoritmaları bulunmaktadır. Alt-Sol, Alt-Sol Dolgu, En iyi uyum, İlk uyum gibi sezgisel yaklaşımlar, yerleştirme işleminin gerçekleşmesi için oldukça önemlidirler. Meta-sezgisel yaklaşımlar ise, optimizasyon problemlerinin çözümünde sezgisel yaklaşımlar için genel bir yapıdır. Bu metasezgisel yaklaşımlar, benzetimli tavlama, tabu arama, yapay sinir ağları, genetik ve parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasını içerir. Çözüm olarak sadece optimizasyon veya sezgisel yaklaşımları kullanmak yerine, birçok araştırmacı bu yöntemleri her birinin dezavantajlarının üstesinden gelmek için bir çözüm yaklaşımıyla birleştirme olasılığını araştırmıştır. Bennell ve Dowsland (2001) [31], bu problemleri çözmek için tabu arama ve doğrusal programlamayı kullanmışlardır. Leung vd. (2003) [31] genetik algoritmayı ve benzetimli tavlama algoritmasını birleştirmiş ve sonuçları saf genetik algoritma ile karşılaştırmıştır. Biz kesme ve paketleme problemlerini çözmek için, tabu arama, benzetimli tavlama ile alt-sol, alt-sol dolgu ve uygun olmayan çokgen yöntemlerini birleştirdik. Her birinin avantajlarını kullanan bu tekniklerin bir kombinasyonu, problem için daha iyi bir çözüm üretebilir.

#### **1.4. Tezin Organizasyonu**

Tezin birinci bölümünde kesme ve paketleme problemlerinin ne tür problemler olduğu hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Ayrıca tezin yazılmasının amacı, literatürde yapılan bazı çalışmalar ve kesme ve paketleme problemlerini tanımlamak için literatürdeki bazı terimlerden kısaca bahsedilmiştir.

Bölüm 2, üzerinde çalıştığımız konu ile ilgili olarak literatürdeki çalışmaların kısa özetler halinde tanıtıldığı bölümdür. Bölüm 3'te, tez çalışmamızda kullanılmış olan yöntemler hakkındaki teorik bilgiler yer almaktadır. Bölüm 4'te, kullanılan optimizasyon algoritmaları hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Bölüm 5'te, tez çalışması kapsamında yapılan uygulamaların tümü yer almaktadır. Bölüm 6 ise, yapılan uygulamalar ile ilgili sonuçların sunulduğu bölümdür.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kesme ve Paketleme problemleriyle ilgili birçok yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımlar genel olarak 3 yönetime ayrılabilir: Kesin yöntemler, probleme özgü sezgisel yöntemler ve daha yakın zamanlarda metasezgisel yöntemler. Bu yaklaşımlar ile pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

B. A. Junior, P. R. Pinheiro ve R. D. Saraiva, iki boyutlu düzensiz kesme ve paketleme problemlerinin çözümü için hibrit bir metodoloji kullanmışlardır. Bu metodolojide, metasezgisel yöntemlerden genetik algoritmayı, geometrik çakışmayı önlemek için uygun olmayan çokgen yöntemini ve yerleşim algoritması olarak alt-sol yerleşim sezgisel yöntemlerini birleştirerek yerleştirme işlemini gerçekleştirmişlerdir [1].

E. Hopper ve B. C. H. Turton, iki boyutlu düzenli ve düzensiz şerit paketleme problemlerini çözmek için literatürdeki çözüm yaklaşımlarını sınıflandırmışlardır. Bu problemleri metasezgisel yöntemlerle çözmek için bir yaklaşım geliştirmişler ve özellikle odak noktası olarak genetik algoritmayı kullanarak yerleştirme işlemlerini gerçekleştirmişlerdir [2].

M. Chen ve W. Huang, iki boyutlu dikdörtgen paketleme problemlerinin çözümü için bir algoritma önermektedirler. Bu algoritmada, dikdörtgenler konteynere tek tek yerleştirilir ve her bir dikdörtgenin, bir köşeyi işgal eden bir hareketle, önceden paketlenmiş diğer dikdörtgenlerin üstüne binmeden birbirine değecek şekilde yerleştirilmesi gerekir [3].

Alev Söke ve Zafer Bingül, benzetimli tavlama algoritmasını kullanarak iki boyutlu guillotine kesme problemlerinin çözümü için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, benzetimli tavlama algoritması ve alt-sol sezgisel algoritması kullanılarak hibrit bir yaklaşım sunmuşlardır. Benzetimli tavlama algoritmasında kullanılan farklı parametre değerleri için, problemin çözümünde oluşabilecek etkiyi incelemişlerdir [4].

Ernesto Lo Valvo, dikdörtgen parçaların/şekillerin yerleştirilmesi için metasezgisel yöntemleri kullanmıştır. Önerdiği yerleştirme yöntemi, geometrik problemleri çözmek için uygun olmayan çokgen yöntemi, alt-sol dolgu sezgisel yöntemleri ile metasezgisel algoritmaların birleştirilmesinden oluşmaktadır [5].

Kathryn A. Dowsland, Subodh Vaid ve William B. Dowsland, çokgen paketleme problemlerinin çözümü için alt-sol yerleşim algoritmasının hızlı ve etkili bir şekilde kullanılması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Geliştirdikleri algoritma, parçaların önceden yerleştirilmiş parçalar tarafından üretilen kısmi yerleşimin içine yerleştirilmesine izin verir ve düşünülen pozisyonların, mevcut olasılıklar dizisinin alt-sol pozisyonunu içerecek şekilde garanti edilmesi anlamında optimal bir alt-sol düzeni üretir. Farklı yerleşimlerin sonuçlarını literatürden çeşitli veri setleriyle karşılaştıran hesaplama deneylerini rapor etmişler ve 100'den fazla parça türüne sahip olan problemlerin, modern bir masaüstü PC'de bir dakika içinde çözülebileceğini göstermişlerdir [6].

A. Miguel Gomes ve Jose F. Oliveira, düzensiz şerit paketleme problemlerini çözmek için bir hibrit algoritma sunmuşlardır. Metasezgisel yöntemlerden benzetimli tavlama algoritması kullanılırken, yerleştirilecek olan şekillerin üst üste gelmesini önlemek için uygun olmayan çokgen ve alt-sol sezgisel yöntemlerini kullanmaktadırlar. Arama işlemi sırasında komşular oluşturmak için doğrusal programlama modelleri kullanılırken, arama alanını çözüm alanı boyunca yönlendirmek için benzetimli tavlama metasezgisel yöntemini kullanmışlar. Literatürde yaygın olarak kullanılan veri kümelerini kullanarak yerleştirme işlemlerini gerçekleştirmişler ve bu hibrit algoritma ile iyi sonuçları elde etmişler [7].

E. Hopper ve B. Turton, iki ve üç boyutlu paketleme problemlerini genetik algoritma ile çözüme yaklaşımını ele almışlardır. Paketleme problemlerini şekillerin geometrisi ve boyutlarına göre sınıflandırarak yerleştirme işlemlerini gerçekleştirmişlerdir [8].

H. Dyckhoff, kesme ve paketleme problemlerini bütünleştiren kapsamlı bir topoloji için tutarlı ve sistematik bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu topoloji, kesme ve paketleme problemlerinin temel mantıksal yapısı üzerine kurulmuştur. Bu tür problemleri, literatürde çeşitli isimler altında sınıflandırmıştır [9].

S. C. H. Leung, Y. Lin ve D. Zhang, düzensiz şerit paketleme problemlerinin çözümü için, genişletilmiş yerel arama algoritması sunmuşlardır. Bu algoritmada, komşu çözümler belirlenir, verilen iki çokgenin takas edilmesi ve oluşacak yeni konuma bir çokgenin yerleştirilmesi işlemleri benimsenir. Yerel arama algoritması,

belirlenecek komşu çözümlerin temelinde çakışmayı en aza indirmek için kullanılır. Çakışmanın olmaması için ise, uygun olmayan çokgen yöntemi kullanılmaktadır [10].

M. B. Aryanezhad, N. Fakhim Hashemi, A. Makui ve H. Javanshir, ürünlerin ve stokların dikdörtgen olduğu ve kesimlerin guillotine olduğu iki boyutlu kesme stok problemleri üzerine çalışma yapmışlardır. İlk olarak bu tür problemlerin çözümü için, yeni, pratik, hızlı ve sezgisel yöntemler önermişlerdir. Daha sonra bu problemlerin çözümü için bir yazılım geliştirmişlerdir. Bu yazılımla, kesilecek olan parçaların sayısı, oluşacak atık parça sayısı ve atık yüzdesini belirlemişlerdir [11].

S. Nozarian, M. V. Jahan ve M. Jalali, bir boyutlu kesme stok problemlerini ele almışlar ve çelik, kâğıt gibi bir çok sektörde kesim kaybının önemli sonuçları olduğunu ve kesim modelinde oluşabilecek küçük değişimler, üretim maliyetleri gibi farklı alanlarda önemli faydalar sağlayacağını belirtmişlerdir [12].

A. Crispin, P. Clay, G. Taylor, T. Bayes ve D. Reedman, malzeme kullanımını en üst düzeye çıkaracak şekilde, ayakkabı üst bileşenlerinin kesilmesini içeren deri iç içe yerleştirme problemi için genetik algoritma kodlama yöntemlerini sunmaktadırlar. Temel kodlama yöntemi, genetik algoritmanın oluşabilecek parça çakışmalarını önlemek için kullanılan uygun olmayan çokgen yöntemine dayanmaktadır [13].

W. Huang, T. Ye ve D. Chen, dikdörtgensel paketleme problemlerinin çözümü için alt-sol yerleşim teoremi üzerine çalışma yapmışlardır. N tane dikdörtgen, dikdörtgen bir yüzeye çakışma olmadan ortogonal olarak yerleştirilebiliyorsa, dikdörtgen yüzeyin alt-sol köşesine dikdörtgenlerin sırayla yerleştirilmesiyle uygun bir paketleme yapılabileceğini belirtmişlerdir [14].

J. F. Oliveira, A. Neuenfeldt Júnior, E. Silva ve M. A. Carravilla, iki boyutlu dikdörtgen şerit paketleme problemlerinin çözümü üzerine çalışma yapmışlardır. Yerleştirilecek olan parçalar, üst üste gelmeyecek ve tamamen yerleştirme yapılacak büyük nesnenin üzerinde yer alacaklar. Amaç, tüm dikdörtgenler şerit üzerine yerleştirildikten sonra şeridin yüksekliğini minimize etmek ve büyük nesnenin kullanılmayan alanını en aza indirmektir [15].

J. Peralta, M. Andretta ve J. F. Oliveira, düzensiz şerit paketleme problemlerini çözmek için, çokgenleri, şeridin kullanılan uzunluğunu en aza indirmek için çokgen bütünlüğü ve çakışma kısıtlamalarına uyarak, genişletilmiş ve sınırsız uzunluk

şeridinde konumlandırma üzerine çalışma yapmışlardır. Çakışmayı önlemek için ayırma çizgileri kullanmışlar. İki çokgen verildiğinde, düz bir çizgi ayırma çizgisidir. Çokgenlerden birinin bütün köşeleri, çizginin bir tarafında veya üzerindedir ve diğer çokgenin tüm köşeleri, hattın diğer tarafında veya üzerindedir [16].

E. Burke, R. Hellier, G. Kendall ve G. Whitwell, iki boyutlu düzensiz kesme stok problemleri için yeni sezgisel bir algoritma sunmuşlardır. Geliştirdikleri algoritma, şekilleri geleneksel çizgi gösterimiyle paketlemektedir. Tepe tırmanma ve tabu arama optimizasyon algoritmaları ile daha iyi yerleştirme işlemleri geliştirmişlerdir [17].

A. Bortfeldt, herhangi bir kodlama çözümü olmadan çalışan iki boyutlu şerit paketleme problemleri için bir genetik algoritma önermektedir. Önerilen yöntemde, bir dizi dikdörtgen parça ve sabit genişlik ve değişken uzunluktaki bir kutu göz önüne alındığında, iki boyutlu şerit paketleme problemi, bütün parçaları konteynerin içine, örtüşmeden, dikdörtgensel olarak yerleştirmekten oluşur, böylece düzenin toplam uzunluğu en aza indirilmiştir. Yapılan çalışmada iki ek kısıtlama bulunmaktadır: Yönlendirme ve guillotine kısıtlaması [18].

A. F. Mahmoud, M. Samia, S. Eid ve A. Bahnasawi, kesme ve paketleme problemlerini üç adımda çözmektedirler. Öncelikle, sınırlayıcı dikdörtgenler kullanarak yerleştirilecek olan parçaları tahmin et. İkincisi, uygun sınırlayıcı ilk şekli (dikdörtgen, daire ve üçgen) kullanarak parçaları yaklaştır. Sonuncuda ise, verilen parçaların herhangi bir yaklaşımı olmaksızın yerel minimumdan kaçınmasına yardımcı olmak için genetik algoritma ile çeşitli geliştirmeler yapmışlardır ve aynı zamanda genetik algoritmanın yerleşimdeki etkisini incelemiştirler [19].

E. López-Camacho, G. Ochoa, H. Terashima-Marín ve E. K. Burke, iki boyutlu düzensiz kutu paketleme problemleri üzerine çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, iki boyutlu durumda, sadece parçanın büyüklüğünün değil, şeklinin önemini belirttiştirler [20].

E. K. Burke, R. S. R. Hellier, G. Kendall ve G. Whitwell, iki boyutlu düzensiz kesme stok problemleri için uygun olmayan çokgen üretimi üzerine çalışma yapmışlardır. Uygun olmayan çokgen, düzensiz iki boyutlu kesme stok problemleri içinde geometrinin hızlı ve etkin kullanımı için şekil çiftleri arasında kullanılabilen bir yapıdır. Bu yazarlar, uygun olmayan çokgen yöntemi için sağlam bir yörünge yöntemi

sunmuşlardır. Bu yörungeleme sistemi ile yerleştirme işlemlerinin daha kolay uygulanabileceğini göstermişlerdir [21].

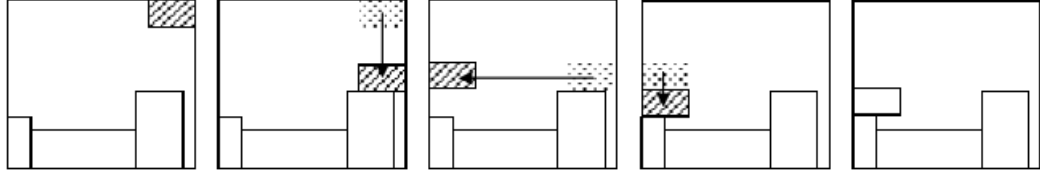
B. Kröger, iki boyutlu kutu paketleme problemleri için sıralı ve paralel bir genetik algoritma tanıtmıştır. Bu algoritma, guillotine kısıtlaması içermektedir. Bu kısıtlama, kodlama mekanizması tarafından doğrudan yansıtılır. Ayrıca, meta dikdörtgenler kavramı önerilmiş ve algoritmaya dahil edilmiştir. Her bir meta dikdörtgen, mevcut çözümlerin geçici olarak (dikdörtgen şeklinde) hiper düzlemlerini düzeltir. Bu şekilde, üretilebilir çözümlerin kalitesini etkilemeden problemin karmaşıklığını azaltmak için guillotineable paketleme problemlerinin hiyerarşik yapısını kullanırlar [24].

D. Liu ve H. Teng, dikdörtgenlerin ortogonal paketlenmesi için genetik algoritma ile geliştirilmiş bir BL algoritmasını önermektedirler. Yerleştirme algoritması olarak kullanılan BL sezgisel algoritması ile optimizasyon algoritmalarından genetik algoritma birleştirilerek yerleştirme işlemlerini gerçekleştirmişlerdir [25].

J. Heistermann ve T. Lengauer, İki boyutlu düzensiz şekilli bir yüzey üzerine yine düzensiz şekilli parçaların yerleştirilmesi ile ilgili yerleştirme problemleri üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, hiçbir parça üst üste gelmez ve yüzey mümkün olduğunca kaplanır. Bu bağlamda bilgisayar destekli yerleştirme için algoritmik bir yöntem sunmaktadırlar. Algoritma, seçici veri azaltma, sıralı parça yerleştirme, topolojik parça yerleştirme işlemi ve kısmi yerleşimler için dikkatle ayarlanmış bir değerlendirme işlevi ile karakterize edilmiştir [26].

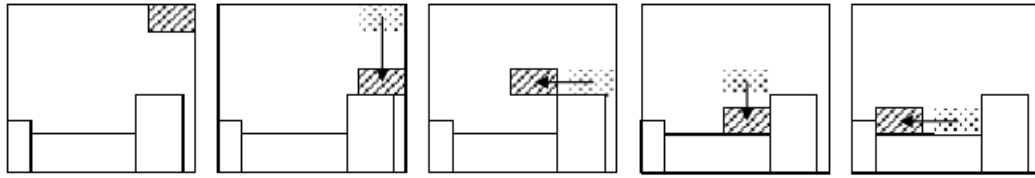
A. Söke, iki boyutlu guillotine kesme stok problemleri için çözüm yaklaşımları sunmuştur. Bu çalışmada, alt-sol sezgisel yerleşim yöntemi ile genetik ve benzetimli tavlama optimizasyon algoritmalarını birleştirerek çözüm yaklaşımları önermiştir. Yapılan deneyler sonucunda, genetik algoritmanın benzetimli tavlama algoritmasından daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir [28].

Jakobs, girdi olarak dikdörtgenin bir listesini ve her birini sırayla stoka yerleştiren alt-sol yöntemini kullanmıştır [31]. Alt-Sol yerleştirme stratejisi Şekil 2.1'de gösterildiği gibi öncelikle dikdörtgeni sağ üst konuma yerleştirir ve mümkün olduğu kadar aşağı ve sola kaydırarak art arda hareket eder.



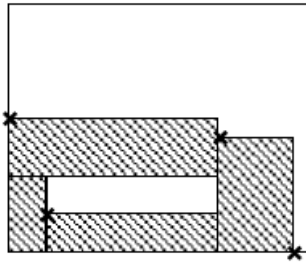
Şekil 2.1. Alt-Sol yöntemi (Jakobs, 1996) [31]

Liu ve Teng, aşağıya doğru hareketin mümkün olmadığı durumlarda sadece sola kayma işleminin gerçekleşmesi için aşağı doğru hareket önceliği veren geliştirilmiş bir alt-sol sezgisel yöntemi geliştirdiler. Jakobs yönteminden farklı olarak, her zaman en uygun çözüm içinde çözülebilen en az bir dikdörtgen dizisinin olduğunu göstermişlerdir [31].



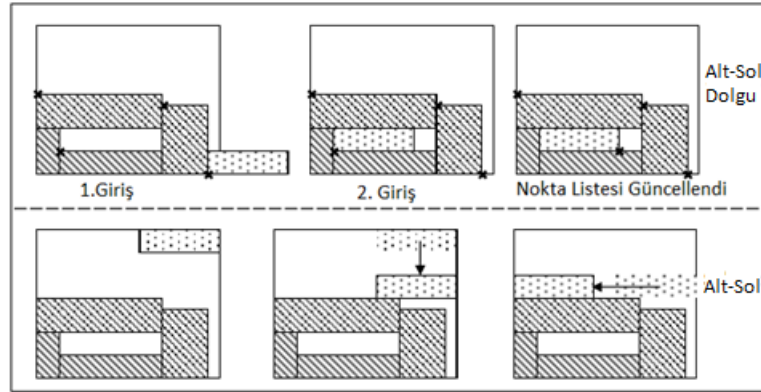
Şekil 2.2. Geliştirilmiş alt-sol yöntemi (Liu ve Teng, 1999) [31]

İkinci yöntem, alt-sol dolgu, alt-sol sezgisel yerleşim yönetiminin değiştirilmiş bir versiyonudur. Bu yöntemde, şekillerin yerleştirilebileceğini göstermek için alt-sol sıradaki yer işaretlerinin (noktalarının) bir listesi tutulur. Bir şekil yerleştirilirken, algoritma en alttaki ve en soldaki noktayla başlar, şekli yerleştirir ve sola döndürür, ardından şeklin başka bir şekil ile örtüşüp örtüşmeyeceğini ve sayfanın sınırlarında kalmasını kontrol eder. Üst üste gelmezse, şekil yerleştirilir ve yeni yerleştirme konumlarını göstermek için nokta listesi güncellenir. Şekil üst üste gelecekse, nokta listesindeki bir sonraki nokta, şekil, örtüşme olmaksızın yerleştirilinceye kadar seçilir. Şekil 2.3, yerleştirme için mevcut noktaların bir örneğini göstermektedir.



Şekil 2.3. Alt-Sol Dolgu uygulanması için yerleşim yerlerinin belirtilmesi [31]

Şekil 2.3'te beşinci bir şekil yerleştirilirken algoritma ilk önce en alt noktaya yerleştirmeye çalışır. Bu nedenle, alt-sol dolgu, olası konum noktalarının depolanmasıyla oluşabilecek boşluk sorununu giderebilir. Bu yüzden alt-sol ve alt-sol dolgu yöntemleri yerleştirilecek beşinci şekillerde farklı yerleştirme düzeni oluşturur. Aşağıda Şekil 2.4'te yerleştirmeye beşinci bir şekil eklendiğinde iki yerleştirme sezgisi arasındaki fark gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Alt-Sol ve Alt-Sol Dolgu yerleştirme sezgisellerinin karşılaştırılması [31]

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi alt-sol dolgu oluşabilecek boşlukları doldururken, alt-sol yönteminde ise, en sonda oluşacak paketleme işlemi boşlukla sonuçlanır.

V. Mancapa, T. I. Van Niekerk ve T. Hua, iki boyutlu şerit paketleme problemlerinde, yerleştirilecek olan parçaların konumunu, kimliğini ve yönünü belirtmek için genetik algoritma ile hibridlenen yeni bir yerleştirme sezgisi sunmuşlardır [32].

R. Alvarez-Valdes, F. Parreno ve J.M. Tamarit, iki boyutlu dikdörtgen şekillerin kesme ve paketleme probleminin çözümü için tabu arama algoritmasını kullanmışlardır. Parçaların toplam değerini maksimize etmek için büyük bir dikdörtgen alana dikdörtgen parçalar yerleştirip daha sonra kesilmesi problemini ele almışlardır. Dikdörtgen parçaların yerleştirilmesine dayanan birkaç hareket tanımlamışlar ve uzun süreli belleğe dayanan yoğunlaşma ve çeşitlendirme prosedürlerini işlemlerine dahil etmişler. Büyük test örneklerindeki hesaplama sonuçları, algoritmanın çok çeşitli paketleme ve kesme problemleri için çok etkili olduğunu göstermişlerdir [33].

### 3. KESME VE PAKETLEME PROBLEMLERİ

#### 3.1. Kesme Stok Problemi

Kesme işlemlerinde malzeme kullanımının optimizasyonu karmaşık bir sorundur. Optimal kesme problemi, sert tahta, ahşap, kâğıt, pencere, metal, cam, deri, otomotiv vb. gibi endüstrinin birçok alanında ortaya çıkar. Her bir endüstri için, sorun biraz farklıdır, ayrıca her birinin farklı kriterleri vardır, ancak hepsinde ortak olan bazı problemler de vardır. Problem bir, iki veya üç boyutlu alanda tanımlanabilir.

Kesme stok probleminin genel tanımı "Daha büyük stok malzemesinden belirli oranda ve belirli büyüklükte daha küçük parçaların kesilmesidir. Diğer bir deyişle, Standart büyüklükteki bir dizi büyük dikdörtgenlerin içine bir dizi küçük dikdörtgen parçalar yerleştirip kesme problemidir". Buradaki amaç, malzeme kullanımını maksimum ve oluşacak atık miktarının minimize edecek şekilde tüm parçaları kesmektir. Gerçek hayatta, çok sayıda kesme stok problemi çeşidi vardır. Bunlar farklı uygulamalara sahip ek kısıtlamalarda farklılık gösterirler. Bir ağaç endüstrisinde, bir bıçağın kalınlığı dikkate alınırken, kâğıt endüstrisinde genellikle bıçağın kalınlığı ihmal edilebilir. Bazı endüstrilerde tek bir boyut göz önüne alınırken, başka bir endüstride 2 veya 3 boyutta işlemler yapılmaktadır.

Kesme stok problemleri, sac endüstrisi, kâğıt endüstrisi, hazır giyim endüstrisi, cam endüstrisi ve deri endüstrisi gibi önemli imalat sanayilerinde önemli bir süreçtir. Malzemeyi en etkili şekilde kesmek, genellikle finansal bir güç gerektirmektedir. Bir şirket ürettiği atık (fire) miktarını en aza indirebilirse, hammadde maliyetinde ölçülebilir bir tasarruf söz konusu olmaktadır. Bu tasarruf şirketin piyasada daha rekabetçi olmasını ve aynı zamanda şirket için kârın artmasını sağlar. Etkili stok kesimi için normal motivasyon finansal olmasına rağmen, şirketlerin verimli stok kesme prosedürlerini uygulamada başka amaçları olabilir. Örneğin, belirli bir sürede belirli siparişleri karşılamamanın bir gerekliliği olabilir. Bu koşullar altında, şekillerin kesilme sırası, son teslim tarihini karşılamak için paketleme işleminden daha önemli olabilir. Kullanılan malzemenin kalitesine de dikkat edilebilir. Bu, özellikle deri endüstrisinde açık bir şekilde görülmektedir. Deri parçaları sadece düzensiz şekillerden değil, aynı zamanda kaliteye göre değişen bir dizi farklı alanlardan oluşmaktadır. Örneğin: ayakkabı sektöründe ayakkabının farklı kısımları farklı

kalitedeki deri parçalarından oluşmaktadır veya giyim endüstrisinde bir deri ceketin arkası en iyi kalitede deriyi gerektirirken, ceketin astarında kullanılan deride, daha düşük kalitede malzeme kullanılabilir.

Kesme stok problemleriyle ilgili ilk araştırma 1939'da Kantorovich ve 1940'ta Brooks tarafından gerçekleştirildi, ancak bu alanda kapsamlı bilimsel çalışmalar 1960 yılında başladı. Geçtiğimiz yarım yüzyılda, çeşitli problemler ve endüstriler için iyi kesim kalıpları üretmek için birçok teknik geliştirilmiştir. O zamanın en önemli çalışmaları arasında Faina (1999), Dyckhoff (1990) ve Javanshir ve Shadalooee (2007), Gilmore ve Gomory (1961, 1963, 1965), Alvarez-Valdes (2001) ile Eshghi ve Javanshir (2005) yıllarında yaptıkları çalışmalar yer almaktadır. Problemin NP-Complete olması nedeniyle, doğrusal programlama gibi teknikler problemin büyük örnekleri için kullanılamaz. Son yıllarda, problemlere dayalı sezgisel temelli teknikler uygulanmıştır. Bundan dolayı bu tür problemler uzun yıllar araştırma konusu olarak devam etmiştir. Bu, yalnızca sezgisel yaklaşımların problemlere kaliteli çözümler üretebildiği, aynı zamanda yeni sezgisel yaklaşımların her zaman araştırıldığı gerçeğinden kaynaklanmaktadır [11].

1990 yılında Dyckhoff, kesme stok problemlerinin mantıksal yapısına dayanan kapsamlı bir çalışma ile farklı tipteki problemlerin birleştirilmesine yönelik sistematik ve tutarlı bir yaklaşım sunmuştur. Amacı, literatürdeki çeşitli kullanımlara yönelik notasyonları benimsemek ve belirli problem türleri üzerine gelecekteki araştırmaları odaklamaktır. Dyckhoff'un göze çarpan özelliklerine göre (boyut, küçük parçalar, şekil türünün belirlenmesi, büyük şekillerin çeşitliliği) dört gruba ayrılan ve farklı özelliklere dayanan çeşitli kesme stok problemleri vardır. Kesme stok problemleri, kesim biçimleri gibi farklı durumlara göre guillotine veya non-guillotine kesme stok problemleri olarak kategorize edilmektedir. Kenardan kenara kesme olarak da adlandırılan guillotine kesim modeli, kesme kenarının bir tarafta başladığı ve karşı tarafa doğru devam ettiği dikdörtgen biçimleri kesmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir [11].

H. Dyckhoff, ayrıca kesme stok problemleri ile ilgili şöyle bir topoloji üzerinde çalışma yapmıştır ve bu topolojiye göre, tek boyutlu problem yeterli materyaller mevcut olduğunda  $1 / V / D / R$  olarak açıklanabilir. "1" problemin bir boyutluluğunu temsil eder. "V", gerekli tüm öğelerin, büyük miktarda kesilen parçaların bir seçimi ile

üretilmesi gerektiği anlamına gelir; diğer bir deyişle, stokların bazı kısımları (büyük parçalar) kullanılmasına rağmen, tüm siparişler üretilecektir. "D", farklı boyutlarda çok büyük miktarda kesilen birkaç parça olduğu anlamına gelir ve "R" sınırlı çeşitliliği dikkate alarak, öğelerin sayısını temsil eder. Dyckhoff, tek boyutlu problemlerin çözümünü iki sınıfa ayırır: Parça Odaklı ve Desen Odaklı yöntemler. Parçaya yönelik yöntemde, her sipariş edilen parça bağımsız olarak büyük parçadan kesilir. Daha sonra büyük parçanın geri kalanında başka bir kesim yapılacaktır. Artık hiçbir kesimin mümkün olmadığı bir noktaya kadar devam ediyor. Bundan sonra bir sonraki büyük parça kesim için hazırlanacaktır. Desen yönelimli yöntemde, öncelikle kesilecek olan stokların uzunluğu kesim modelinde birleştirilir. Kesim sayısı, önceden belirlenmiş kesim modeli temelinde belirlenir [9].

Suliman (2006), iki boyutlu dikdörtgen kesme stok problemi için sıralı bir sezgisel prosedür ortaya çıkarmıştır. Bu kesim modelinde, üç adımlı bir çözüm sunuluyor. Gonçaves (2007) ise, iki boyutlu problemler üzerinde çalışmalar yapmıştır. Burada sabit küçük dikdörtgenler grubu büyük bir dikdörtgenin içine yerleştirilip daha sonra kesim işlemi yapılmalıdır, böylece malzemenin çoğu kullanılır ve büyük dikdörtgenin kullanılmayan alanı minimize edilir. Ben Messaoud vd. (2008) ise, guillotine kısıtlamaları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. İlk olarak, kesme stok probleminin guillotine modelinde olması için gerekli koşullar sağlanmış ve bu durumun kontrol edilmesi için de polinom algoritması geliştirmişlerdir. Bu yöntemler, hammaddeler pahalı olduğunda kesim işlemi için oldukça yararlıdır. Alvarez-Valdés vd. (2002) ise, iki boyutlu kesme stok problemleri için (büyük ölçeklerde) bir dizi sezgisel algoritmalar geliştirmişlerdir. Bu çalışmalarda, parçaların değerini maksimize etmek için daha küçük parçalara kesilmesi gereken büyük bir ana stok bulunmaktadır. Alvarez-Valdés (2002), iyi kalitede ve hızlı cevaplar sağlayan greedy randomized adaptive search procedure (GRASP) metodunu geliştirmiştir. Ayrıca daha karmaşık olan ancak makul hesaplama zamanlarında daha iyi sonuçlar veren bir tabu arama algoritması geliştirmiştir. Hızlı çözümler gerektiğinde GRASP yönteminin kullanılması gerektiğini belirtmesine rağmen, kalite daha önemliyse, tabu arama algoritmasının seçilmesi gerektiğini belirtmiştir. Faina (1999), iki boyutlu kesme stok problemini genel bir optimizasyon algoritması ve benzetimli tavlama (Simulated Annealing) kullanılarak çözmüştür. Burada guillotine ve non-guillotine kısıtlamaları göz önüne alınarak işlemler yapılmıştır [11].

Sonuç olarak, kesme stok problemi için düzenli şekilli bir yüzey (tabaka) verilir. Yüzeyin en iyi şekilde kesilmesini sağlayacak şekilde yüzeyden belirlenen parçaları kesmek gerekir. Parçaların kapsamadığı yüzey alanının miktarı atık olarak adlandırılır. Hedef, atıkları minimize etmektir.

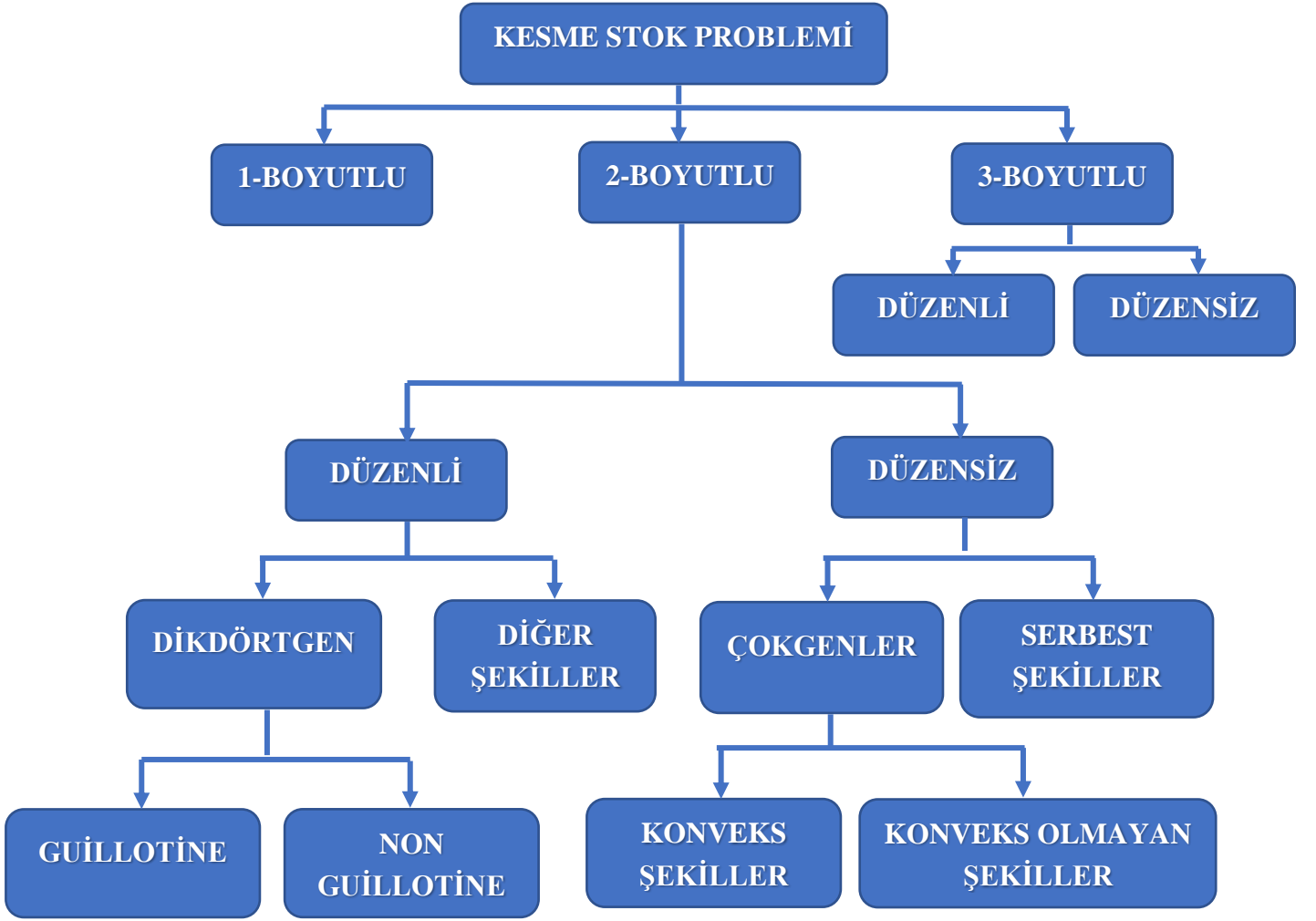
### **3.1.1. Kesme Stok Problemlerinin Sınıflandırılması**

Son yıllarda, kesme stok problemleri ile ilgili problemler literatürde geniş çapta açıklanmıştır. Bu problemler birçok imalat sektöründe ortaya çıkmaktadır.

Dyckhoff (1990) [9] kesme stok problemleri için ortak özellikleri tanımladı ve bir sınıflandırma sistemi önerdi. Öklid uzayında boyutlara göre kesme stok problemlerini birbirinden ayırdı.

Dyckhoff'un sınıflandırma sistemi, kesme problemlerinin dört önemli özelliğini açıklamaktadır:

- En önemli özellik, desenin geometrisini tanımlamak için gerekli olan minimum boyut sayısını tanımlayan boyutsallıktır.
- Görev türü, tüm nesnelere ve şekillerin veya sadece bir seçimin belirlenmesinin gerekip gerekmediğini açıklar.
- Nesnelere çeşitleri, bu özellik, aynı veya farklı şekle sahip nesnelere içeren problemleri birbirinden ayırır.
- Parçaların çeşitliliği, parçaların şekline ve sayısına karşılık gelir. Problemler birkaç parçadan, uyumlu nesnelere, birçok farklı şekildeki birçok nesneden ve nispeten az sayıda farklı şekilden oluşan birçok parçadan oluşabilir.



Şekil 3.1. Kesme stok probleminin sınıflandırılması

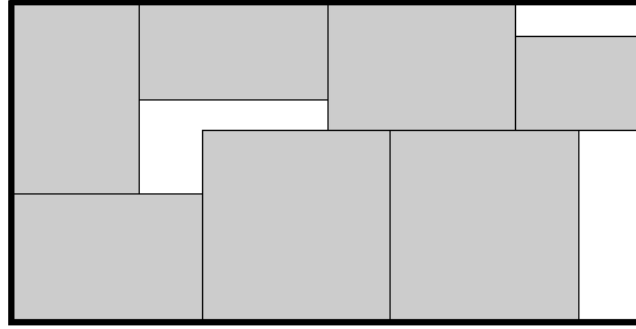
### 3.1.2. Problem Boyutları

Bir kesme stok problemi  $n$  boyutlarından birinde kategorize edilebilir.  $N$  için en genel değerler 1, 2 ve 3'tür. Tek boyutlu (1D) problem, belirli bir malzeme uzunluğundan belirli uzunlukta parçalar kesme olarak görülebilir. Bu problemde sadece kesme işleminden kaynaklanan parçaların uzunluğu ile ilgileniyoruz. Ortaya çıkan parçaların genişliği ya önemsiz ya da (genellikle) sabittir. 1D problemi için tipik uygulamalar, çelik çubuklardan belirli uzunlukta kesim yapma işleminin gerçekleşmesi olarak görülebilir.



Şekil 3.2. 1 Boyutlu kesme stok problemi için çelik çubuk örneği [35]

Birçok 2D problemi, kesilecek parçaların genişliğini göz ardı ederek 1D problemlerine dönüştürülebilir, böylece problem sadece şekillerin yüksekliğinin önemli olduğu bir noktaya dönüştürülebilir. İki boyutlu (2D) kesme probleminde, iki boyutlu stok tabakalarından iki boyutlu şekilleri kesmekle ilgilenilmektedir. Şekiller dikdörtgen şeklinde olabilir veya düzensiz şekiller olabilir. Tipik uygulamalar arasında cam kesme, sac kesme, karton kesme ve kâğıt kesme yer alır.



Şekil 3.3. İki boyutlu kesme stok problemi örneği [36]

Üç boyutlu (3D) kesme stok problemlerinde normal olarak belirli bir alana üç boyutlu şekillerin paketlenmesi ile ilgilenilmektedir. 3D kesme stok problemi için tipik uygulamalar arasında yükleme dağıtım araçları sayılabilir.

### 3.1.3. İki Boyutlu Kesme Stok Problemi

Bir dizi geometrik şekil verildiğinde, 2 boyutlu kesme stok probleminin amacı, bu şekiller için olabilecek daha büyük bir şekil içinde en uygun düzeni bulmaktır. Bu problemlerin amacı aynı zamanda, malzemenin israfını en aza indirmek, kullanılan alanın alanını en üst düzeye çıkarmak veya daha büyük şeklin içerisine yerleştirilen

parçaların değerini en üst düzeye çıkarmak olabilir. Kesme stok problemleri, birçok sanayide önemli işlemlerdir. Bu problemlerin önemi, ham maddenin ne kadar etkili kullanıldığına bağlıdır ve maliyet ve miktarına bağlı olarak mali etki belirleyici olabilir. Kesme stok problemlerinin özel tanımı, ağırlıklı olarak uyguladıkları endüstriye bağlıdır. Şekillerin ve malzemelerin geometrik yönü bir endüstriden diğerine çok farklı olabilir. Örneğin, çoğu durumda, hammadde dikdörtgen şekle sahiptir. Bazı durumlarda, örneğin deri endüstrisinde olduğu gibi şekiller son derece düzensiz olabilir. Son durumda, bu hammaddelerden kesilmesi gereken küçük şekiller basit dikdörtgenlerden son derece düzensiz çokgenlere kadar değişebilir.

Literatürde bulunan kesme stok problemlerinin çoğu iki boyutludur. 2 boyutlu kesme stok problemleri düzenli ve düzensiz şekillerden oluşan kesme problemleri şeklinde iki ana gruba ayrılır. Düzenli şekiller birkaç parametreyle (örneğin: dikdörtgen, daire) belirlenen şekillere sahiptir. Ancak düzensiz şekiller ise, konveks ve konveks olmayan (konkav) şekiller için geçerlidir.

### **3.1.4. Düzenli Şekiller için Kesme Stok Problemi**

#### **a) Dikdörtgen Şekiller için Kesme Stok Problemi**

2 boyutlu kesme stok problemlerinde dikdörtgen şekillerin kesme işlemi iki ana gruba ayrılır. Bunlar guillotine kesim ve non-guillotine kesimdir. Her iki durumda da amaç, en az atık üretilecek şekilde yüzey üzerine yerleştirilmiş dikdörtgenlerin veya düzenli diğer şekillerin (daire vb.) kesme işleminin gerçekleştirilmesidir. Guillotine kesim, kesim işlemi diğer iki kenara paralel olarak dikdörtgen kenar tabakasının bir kenarından karşı kenara doğru ilerleyebilir. Yani, sadece yüzeyin veya tabakanın bir tarafından diğerine kesilmesine izin verir. Bazı problemler sadece guillotine kesimlerine izin verir ve şekiller bu kısıtlamayı sağlayacak şekilde düzenlenir. Örneğin malzemenin doğası gereği cam keserken sadece guillotine kesimlerine izin verilir. Bir dizi guillotine kesimi kullanılarak kesilemeyen model ise non-guillotine kesim modeli olarak adlandırılmaktadır.

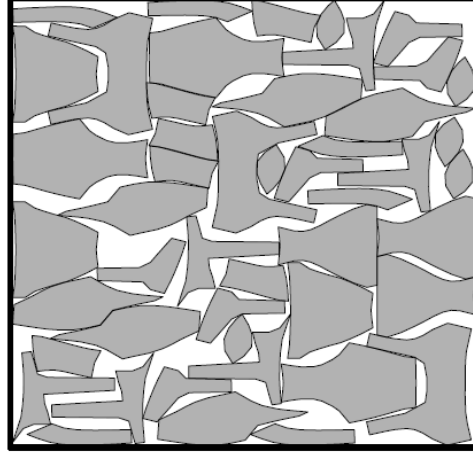


Şekil 3.4. Guillotine ve non-guillotine kesim örneği [38]

### 3.1.5. Düzensiz Şekiller için Kesme Stok Problemi

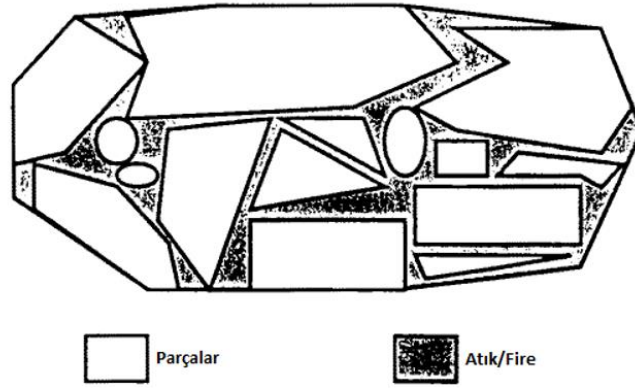
Kesme stok problemi için geometri, yüksek boyutlu problemlerin tanımlanmasında önemli rol oynamaktadır. Basit problemler dikdörtgen malzemesinden kesilecek dikdörtgen parçaları içerir. Kesme stok problemlerinde çok sayıda varyasyon vardır. Örneğin: stok öğelerinin uzunluğu aynı olmayabilir veya farklı kesim örüntüleri istenebilir. Geometrik olarak, dikdörtgen olmayan şekilli nesnelere ilgili problemlerin üstesinden gelmek çok daha zordur. Bu tür şekilleri tanımlamak için irregular (düzensiz) ifadesi kullanılmaktadır. Düzensiz şekillere sahip iki boyutlu kesme stok problemleri genellikle nesting problem (yerleştirme problemi) olarak adlandırılmaktadırlar. Nesting probleminin genel bir tanımı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

İki boyutlu bir uzayda şekillerimiz (parçalarımız) olsun. Şekil 3.5' te gösterildiği gibi şekiller arasında örtüşme (yani üst üste binme) olmaması durumunda şekillerin yüzey üzerine uygun bir şekilde yerleştirilmesi işlemidir. Genelde, yerleştirme problemi için düzensiz şekilli parçalar kullanılmaktadır. Bu düzensiz şekilli parçalar konveks veya konveks olmayan şekillerden oluşmaktadır. Yerleştirme yapılacak yüzey düzenli veya düzensiz bir şekle sahip olabilir. Yüzeye yerleştirilen parçaların olabildiğince yüzeyi kaplayacak şekilde yerleştirilmesi istenmektedir. Parçalar tarafından kaplanmayan yüzey alan miktarı atık(boş/fire) olarak adlandırılmaktadır. Böylece atık veya fireler en aza indirilmek istenmektedir.



Şekil 3.5. Düzensiz şekilli kesme stok problemi örneği [36]

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi şekillerimiz düzensiz ancak yerleştirme yapılan yüzeyimiz düzenli şekillerden oluşmaktadır. Ancak düzensiz şekilli kesme stok problemlerinde her zaman yüzeyimiz düzenli şekilli olmaz. Yüzeyimiz ve yerleştirilecek parçaların her ikisi de Şekil 3.6'da gösterildiği gibi düzensiz şekle sahip olabilir.



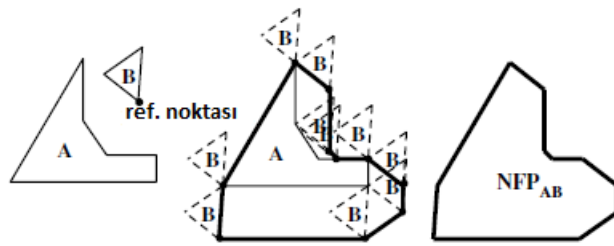
Şekil 3.6. Düzensiz yüzey ve düzensiz şekilli kesme stok problemi [26]

### 3.2. Uygun Olmayan Çokgenler (No-Fit Polygons (NFP))

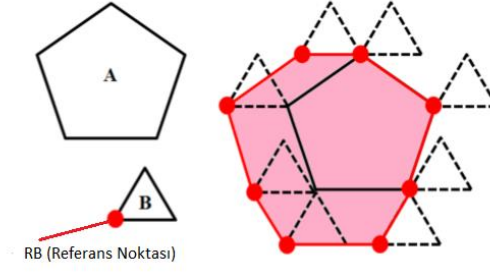
Burke vd. (2007) işaret ettiği gibi, uygun olmayan çokgenler, düzenli ve düzensiz şekilleri içeren kesme ve paketleme problemlerinde hızlı ve etkili geometri kullanımı için kullanılan güçlü bir veri yapısıdır. Kesme ve paketleme alanı içinde uygun olmayan çokgen tekniklerinin ilk uygulaması Art (1966) tarafından sunulmuştur. Ancak bu terim şekil kaplama olarak adlandırılmaktaydı [1]. 10 yıl sonra Adamowicz

ve Albano (1976) tarafından “no-fit polygon” terimi ortaya çıkarıldı. Bunlar minimum kapalı dikdörtgenleri kullanarak şekilleri bir araya getirmek için uygun olmayan çokgenleri kullanarak düzensiz kesme stok problemine yaklaşılarak bu terimi ortaya çıkardı. No-Fit Polygon (NFP), mühendislik ve robot hareket planlaması gibi alanlarda da kullanılmıştır, ancak daha çok kesme ve paketleme gibi alanlarda kullanılmıştır [21]. Uygun olmayan çokgenlerin ana işlevi, iki çokgenin kesiştiği bölgeyi tanımlamaktır. Aşağıdaki örnek, NFP yapısına genel bir bakış sunmaktadır.

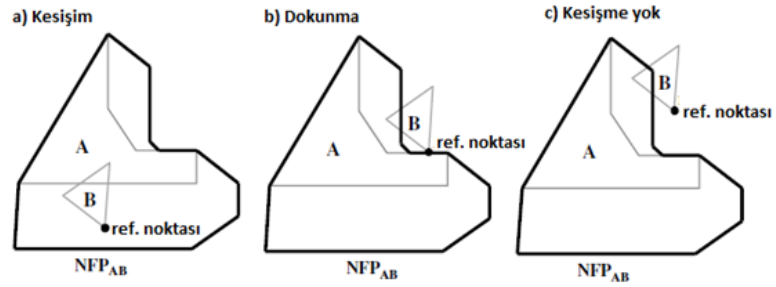
İki çokgen A ve B göz önüne alındığında, uygun olmayan çokgen, bir şeklin diğerinin sınırı etrafında izlenmesiyle bulunabilir. Çokgenlerden biri yerinde sabit kalır ve diğeri sabit çokgen etrafında hareket ederken birbirlerine dokunmasına rağmen asla kesişmezler. Şekil 3.7’de ve Şekil 3.8’de gösterildiği gibi ilk çokgenin sabit olduğunu kabul ederken, ikinci çokgenin sabit çokgen etrafındaki yörüngede olduğunu kabul ettik. Bundan dolayı, B çokgeni A çokgeni etrafında dolaştığında uygun olmayan çokgen  $NFP_{AB}$  olarak gösterilir.  $NFP_{AB}$  oluşturulurken, B çokgeni A çokgeni etrafında hareket ederken takip edilecek bir referans noktası seçilmelidir ve bu referans noktası B çokgeninden seçilmelidir. Referans noktası, yörüngedeki çokgenin hareketlerini izlemesi koşuluyla isteğe bağlı herhangi bir nokta olabilir. Örtüşmeyi test etmek için Şekil 3.9’da da gösterildiği gibi NFP kullanılırken, çokgen B’ye göre referans noktasının göreceli konumunu korumak da önemlidir. Çokgen B’nin çokgen A ile çakışıp çakışmadığını test etmek için  $NFP_{AB}$  ve B’nin referans noktasını kullanırız. Eğer çokgen B, referans noktası çokgen  $NFP_{AB}$  içinde olacak şekilde konumlandırıldıysa, o zaman çokgen A ile çakışır. Referans noktası  $NFP_{AB}$  sınırında ise, çokgen B çokgen A’ya dokunur. Bu çakışma değildir. Son olarak, referans noktası  $NFP_{AB}$  ’nin dışındaysa, çokgenler A ve B çakışmaz veya dokunmaz. Dolayısıyla, hesaplanan  $NFP_{AB}$  ’nin iç kısmı, A ve B’nin kesişen tüm konumlarını temsil eder ve sınır tüm temas eden konumları temsil eder.



Şekil 3.7. A ve B şekilleri için uygun olmayan çokgen gösterimi [21]



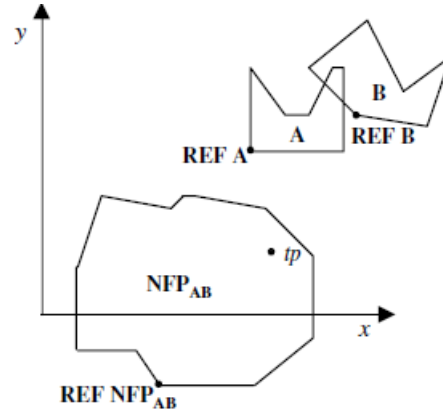
Şekil 3.8. A ve B çokgenleri için NFP [1]



Şekil 3.9. A ve B çokgenleri arasındaki kesişim testi [21]

Uygun olmayan çokgenler, çokgen çiftleri arasında kesişme testleri yapmak için mükemmel bir araç olmasına rağmen hem literatürde hem de gerçek dünya üretim endüstrilerinde iki boyutlu kesme ve paketleme problemleri için geniş bir şekilde uygulanmamıştır. Kuşkusuz bunun nedeni, uygun olmayan çokgenin karmaşık uygulanması ve mevcut sağlam algoritmaların olmamasından kaynaklanmaktadır. Bunun yerine, standart trigonometrik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Özellikle gerçek dünyadaki uygulamalarda yazılım paketleme durumunda dağıtılan yazılımın olası tüm çokgenleri hatasız olarak işleyebildiği önemlidir. Bununla birlikte, her iki yaklaşım da aynı genel etkiye sahipken, uygun olmayan çokgenin kullanılması, en verimli trigonometrik yaklaşımdan birkaç kat daha hızlı olabilir. Örneğin, aynı yerleşim probleminin sayısız tekrarlanmasını denemek istiyoruz, uygun olmayan çokgenlerin önceden oluşturulması toplam hesaplama sürelerini önemli ölçüde düşürebilir. Sayısız yinelemenin üzerinde, trigonometrik yaklaşımlar tekrarlanan oryantasyonlarda ve konumlarda aynı çakışan şekilleri defalarca algılar ve çözer. İç içe yerleştirme işleminde şekillerin çakışmasını çözen yaklaşımda, kesişen iki şekil arasındaki tüm kesişme noktalarının hesaplanması gerekiyorsa, eğer uygun olmayan çokgen metodu kullanılmazsa, örtüşmenin tam olarak tespiti için sayısız kesişim hesaplamaları gerektirir. Dolayısıyla, uygun olmayan çokgen kullanarak, çakışma algılama

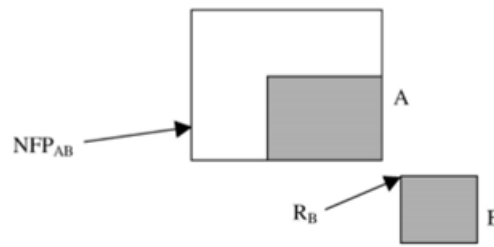
problemini (iç içe yerleştirme işleminde hesaplama yükünde önemli bir faktördür) çokgen testi içerisinde daha az pahalı bir noktaya indirgeyebilir. Buna ek olarak, Burke vd., örtüşme çözüm tekniğini kullanırken, burada kesişen şekillerin y eksenı yönünde kesişen kenarların tekrar tekrar çözülmesi sayesinde çözüldüğünü ve uygun olmayan çokgen çözüm tekniklerinin eksiksiz harekette y eksenı örtüşmesini çözerek daha verimli olduğunu görmüşlerdir.



Şekil 3.10. NFP kesişim testi [21]

Şekil 3.10'daki gibi, A ve B poligonlarının tüm kesişim noktalarını algılamak istediğimiz iç içe yerleştirme yöntemi ele alınmıştır. Burada çokgen A'nın yedi kenarı, çokgen B'nin altı kenarı vardır.

NFP, düzensiz şekilli çokgenler arasında olduğu gibi Şekil 3.11'de gösterildiği gibi düzenli şekiller arasında da aynı mantık kullanılarak gerçekleştirilebilir.



Şekil 3.11. Düzenli şekiller arasında NFP gösterimi

Literatürde bildirilen bazı uygulamalarda görülenlerden farklı olarak, genellikle çokgen B'nin çokgen A ile örtüşüp örtüşmediğini tespit etmek için uygun olmayan çokgen kavramını benimsenir. Ancak burada bu geometrik araç ideal bir ortam elde etmek için alt-sol sezgisel yerleştirme yöntemleri ile birleştirilmiştir. Uygulamamız için, A ve B'nin iki rastgele nokta kümesini içeren minkowski toplamı kullanılarak,

uygun olmayan çokgen yapımı gerçekleştirilmiştir. Minkowski toplamı, A'daki her noktayı B'deki her noktaya ekleyerek elde edilir, yani:  $A \oplus B = \{a + b : a \in A, b \in B\}$ . Basit vektör işleminde, A ve B'nin minkowski farklılığı olarak tanımlanan  $A \oplus -B$ 'nin her iki şekil tarafından üretilen NFP' ye eşdeğer olduğunu göstermek için kullanılabilir. Uygun olmayan çokgeni oluşturmak için bazı yararlı algoritmalar yakın zamanda Bennell vd. (2001), Burke (2007), Bennell and Song (2008) and Zhang vd. (2009) tarafından üretilmiştir [1].

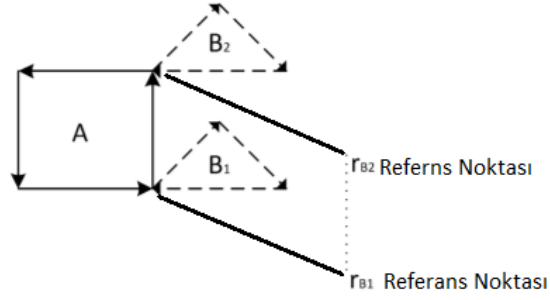
### 3.2.1. Minkowski Toplamı

Minkowski toplamları, vektör eklemenin bir şeklidir. Minkowski toplamının bir tanımını aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

B ve T,  $R^2$  uzayında rastgele iki vektör olsun. S vektörü, T vektörünün her köşesinde B vektörünün konumlandırılmasıyla elde edilir. Yani, B vektörünün tüm köşelerini T vektörünün köşelerine eklenmesiyle ortaya çıkan vektördür. Matematiksel işlem Denklem 3.1'deki gibidir.

$$B \oplus T = \{b + t : b \in B, t \in T\} \quad (3.1)$$

Burada ' $\oplus$ ' Minkowski toplamı anlamına gelmektedir. Bir NFP'yi üretmek için minkowski toplamlarını kullanma kavramı, bir örnek kullanarak açıklamak kavramsal olarak en kolay olanıdır. En basit formda bir dikdörtgen A ve bir üçgen B varsayalım ve sabit çokgen olarak dikdörtgeni seçip NFP' yi hesaplamak isteyelim. Şekil 3.12'de gösterildiği gibi, B çokgeninin  $r_{B1}$  referans noktası ile A çokgeninin sağ alt köşesine B çokgeninin yerleştirilmesiyle başlayalım. Şekil 3.12'de A çokgeni sabit olduğundan B çokgeni A'nın etrafında döner, fakat örtüşme olmaz. Saat yönünün tersine hareket ettiğinden dolayı B çokgeni A çokgeninin sağ üst köşesine tam yerleşmesiyle işlem sona erer. Noktalı çizgi, B'nin referans noktasının A'nın en sağ kenarı boyunca kayarken ki hareketini gösterir. Bu noktalı çizgi, NFP' nin bir parçasıdır ve A'nın en soldaki kenarının çevrilmiş bir kopyasıdır. Burada, A'nın herhangi bir kenarına karşı B'nin herhangi bir kenarının kaydırılmasıyla oluşturulan tüm kenarlar üretilirse, NFP' nin bu kenarlardan oluşturulacağı garanti edilir.



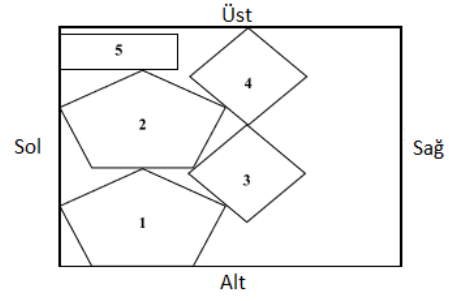
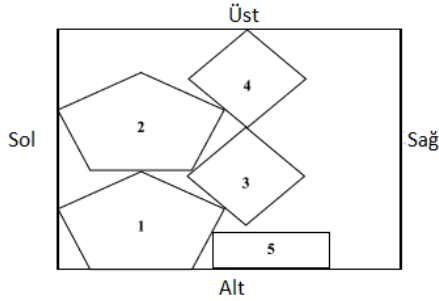
Şekil 3.12. NFP<sub>AB</sub>' nin ilk kenarı

### 3.3. Alt-Sol Yerleşim Yöntemi

Kesme ve paketleme problemlerini çözmek için popüler bir yaklaşım sırasıyla, yerleştirme işlemi için kullanılacak olan parçaları sıraya bırakmak, daha sonra en alttaki ve en soldaki uygun pozisyonu seçmek ve parçaları sırasıyla yerleştirmektir. Bu bir alt-sol ((Bottom-Left) (BL)) yerleştirme politikası olarak bilinir. İlk uygulamalar genellikle, parçaların boyutlarına veya en iyi çözümün seçildiği rastgele bir sıralama örneğine dayanan bir veya daha fazla sıralamayı içeriyordu. Bu tür yaklaşımın avantajları, daha yüksek kalitede çözümler üretebilen daha karmaşık yöntemlerle karşılaştırıldığında, hızı ve basitliğidir. Sonuç olarak, bu gibi yerleştirme politikalarının uygun olduğu birçok ticari ortam vardır. Dahası, son yıllarda ilgi, maliyet/uygunluk değerlendirilmesinin temeli olarak kullanılan alt-sol yerleştirme politikası tabu arama veya benzetimli tavlama gibi modern metasezgisel uygulamalarla desteklenmiştir.

Alt-Sol yerleştirme politikanın farklı yorumları olmasına rağmen, bunlar genellikle iki sınıfa ayrılabilir. Bunlar Şekil 3.13'teki örnekte gösterildiği gibi, burada 1, 2, 3, 4 parçalarının önceden yerleştirildiğini ve parça 5'in ilgili alt-sol tanımını kullanarak yerleştirileceğini varsayıyoruz. Alt-Sol yerleştirme yöntemi ile eklenecek olan parçalar 1, 3, 4 numaralı parçaların sağ tarafına yerleşmiş olacaktır. Yerleştirme yapılacak pozisyon, bu bölgedeki en uygun alt-sol pozisyonudur. Bu, gerekli hesaplamaları basitleştirme avantajına sahip olmasına rağmen, sırayla yerleştirilecek olan küçük parçaların, önceden yerleştirilmiş parçaların arkasındaki boşluklara girmesine izin vermeyecektir. İkinci sınıf Şekil 3.14'te de gösterildiği gibi, bunu, doğru bir en soldaki yerleşim politikasını kullanarak çözmektedir. Paketleme işleminin

arkasındaki yerleşimlere izin verir ve önceden yerleştirilmiş parçaların arkasındaki boşluklara girmesine izin verilecektir. Alt-Sol yerleştirme işlemi için Şekil 3.13'te yapılmış olan yerleştirme işlemi genellikle daha çok kullanılmaktadır [6].



Şekil 3.13. Alt-Sol yerleştirme yöntemi 1

Şekil 3.14. Alt-Sol yerleştirme yöntemi 2

Parçalar dikdörtgen olduğunda, her iki durumda da geometri nispeten basittir. Bununla birlikte, düzensiz parçalar söz konusu olduğunda, bir sonraki parça için en soldaki konumun hesaplanması, özellikle daha önceden paketlenmiş parçaların arkasındaki pozisyonlar dikkate alınacaksa, karmaşık bir geometrik hesaplamayı içerir. Düzensiz parçalar için alt-sol algoritmaları açıklayan bir dizi yayınlanmış makale olmasına rağmen, pek çoğu geometrik hesapların ayrıntılarını vermemektedir. Geometriyi açıklayanların çoğu boşluk doldurmaya içermez veya uygun pozisyonları (genellikle bir sisteme dayalı) bir grup noktaya indirgemezler. Diğerleri çok küçük problem örnekleriyle sınırlıdır veya orta boyuttaki örnekler için hesaplanabilir zamanın engelleyici miktarlarını önermektedirler. Bu tezde, geometrik ayrıntılar ile tamamlanmış bir alt-sol yerleştirme algoritması sunulmaktadır. Düzenli ve Düzensiz parçalara sahip veri kümeleri üzerinde hem hızlı hem de etkili olduğu görülmüştür. Bir sonraki bölüm, problem hakkında genel bir bakış sunmakta ve çözüm için yayımlanan alt-sol algoritmalarından bazılarını işaret etmektedir.

### 3.3.1. Alt-Sol Sezgiselleri

Herhangi bir iki boyutlu kesme veya paketleme problemine en basit yaklaşımlardan biri, yerleştirme işleminde kullanılacak parçaları sıralamak ve sıralanmış olan parçaları yüzeye uygun bir şekilde yerleştirmek için kullanılan yerleştirme yöntemlerini tanımlamaktır. Burada alt bölüme yakın en uygun bağlantıları tercih ederek, her parçayı mümkün olduğu kadar sola yerleştirip, gereken

toplam uzunluğu en aza indirmeye çalışan bir alt-sol yerleştirme yöntemi ele alınmaktadır. Baker vd. (1980), Brown (1980) ve Coffman vd. (1984) yaptıkları çalışmalardan dolayı 1980’lerde dikdörtgen paketleme problemleri için bu yöntem oldukça popüler oldu. O zamandan şimdiye kadar çeşitli çalışmalar ile bu yöntemin kullanımını devam etmiştir. Oliveira vd. (2000), boşluk doldurmaya izin verilmeyecek şekilde sırasıyla parça ekleyerek yerleştirme işlemi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Amaral vd. (1990), paketleme işleminin yapılacağı yüzeyin n kısmını bir dizi bölgeye ayırır ve daha sonra en soldaki bölgeye yerleştirilecek olan parçayı kaydırır. Boşluk doldurmaya izin veren örnekler arasında, yerleştirme pozisyonlarını bir sistem ile sınırlamak suretiyle gereken hesaplama çabasını azaltan Dowsland’ın (1998) alışması yer almaktadır. Lamousin ve Waggenpack’in (1997) alışmasında, her bir parça için dört farklı yönelimi göz önünde bulundurarak, aday pozisyonlarının kapsamlı bir araştırmasını içerir. Yapılan bu uygulamalardan bazıları, parçaların önceden tanımlanmış sıralarını düşünürken, diğerleri, mevcut alanı iyi kullanmak için dinamik olarak bir sonraki parçayı seçerler. Bir alternatif, parçaların iyi bir sıralamasını belirlemek için bir sezgisel arama tekniğini kullanmaktır. rnek olarak, Oliveira vd. ile Davis (1985) ve Jacobs (1996) kullandığı genetik algoritma, Dowsland vd. (1998) kullandığı tabu arama algoritmaları verilebilir. Bu yerleştirme yönteminde, her bir iterasyonda alt-sol pozisyona bir paketleme yapıldığından dolayı, yöntemin hızlı bir şekilde uygulanması çok önemlidir. Bu yöntemde geometrinin yeterince ele alınmasının sağlanması için en etkili araçlardan biri, uygun olamayan çokgen yönteminin kullanılmasıdır.

### 3.3.2. Alt-Sol Yerleşim Yönteminin Matematiksel Gösterimi

Bir dikdörtgen paketleme problemi şu şekilde formülize edilebilir:  $n$  tane dikdörtgenin  $j = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  bir kümesi verildiğinde,  $W$  genişliğinde ve  $H$  yüksekliğinde bir dikdörtgen yüzeyin üzerinde her biri genişliği  $w_j$  ve yüksekliği  $h_j$  olan birden fazla dikdörtgen bulunmaktadır. Bu yüzey üzerinde bulunan dikdörtgenler üst üste binmeden yüzey üzerinde yerleştirilmelidir. Burada  $W, H, w_j$  ve  $h_j$  pozitif gerçek sayılardır ve dikdörtgen yüzey üzerine yerleştirilecek dikdörtgenler yatay ve dikey olarak yerleştirilebilir.

Bu problemi çözmek için çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Bunlar üç kategoriye ayrılabilir: yaklaşık algoritmalar, sezgisel algoritmalar ve kesin algoritmalar. Bu algoritmalarından en çok kullanılanı ve genellikle en etkili olanı sezgisel algoritmalar. Bu algoritma, yerleştirilecek olan dikdörtgen için belirli pozisyonların olduğu sezgisel yerleştirmeyi benimser. Yerleştirilecek olan dikdörtgen için belirli olan pozisyon sayısı çok daha azdır ve aynı zamanda gerçek parametre dikdörtgen paketleme problemine de uygulanabilir. Bu algoritmada uygun çözümler elde edildikten sonra dikdörtgen yüzey üzerine dikdörtgen parçalarını sırasıyla yerleştirilebilir. Aksi halde yerleştirme işlemi gerçekleşmeyecektir.

### 3.3.3. İşaretler ve Tanımlamalar

Herhangi bir yüzeyin alt-sol köşe noktasını  $xy$  düzleminin orijini olarak belirleyelim ve dört kenarını sırasıyla  $x$  ve  $y$  eksenine paralel olarak bırakalım. Yüzey üzerine yerleştirilecek olan dikdörtgenler  $i$  ile gösterilsin ve  $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  olsun. Yerleşim işlemi  $(x_i, y_i, v_i)$  3 değişkenle tanımlanabilir. Burada  $x_i, y_i \in R$  alt-sol köşenin koordinatlarını ve  $v_i$  ise, yön belirlemek için kullanılır.  $v_i \in \{0,1\}$  değerlerini alır.  $v_i = 1$  ise dikey olarak yerleştirme işlemi yapılır, aksi takdirde  $v_i = 0$  olur ve yatay olarak yerleştirme işlemi gerçekleştirilir.  $N$  tane dikdörtgenden oluşan bir paketleme işlemi Denklem 3.2'de gösterilen vektör ile ifade edilebilir.

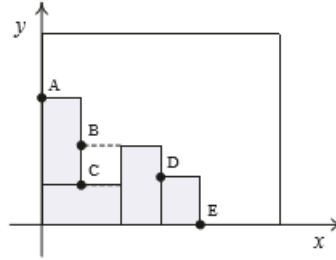
$$X = (x_1y_1v_1, x_2y_2v_2, \dots \dots \dots, x_ny_nv_n) \quad (3.2)$$

Bu bilgiler doğrultusunda aşağıdaki tanımlar verilebilir.

Tanım 1 (Uygun Paketleme): Uygun olan (veya örtüşmeyen) bir paketleme işleminin aşağıdaki üç koşulu karşılması gerekir:

- Her bir dikdörtgen, ortogonal olarak yüzeyin veya yerleştirme işleminin yapılacağı nesnenin içine yerleştirilmelidir.
- Her bir dikdörtgen, yerleştirme işleminin yapılacağı yüzeyin sınırlarını aşmamalıdır.
- Herhangi iki dikdörtgen arasındaki örtüşen alan sıfır olmalıdır. Yani örtüşme olmamalıdır.

Tanım 2 (Alt-Sol Değişmezlik): Uygun olan bir paketlemede, bir dikdörtgen diğer dikdörtgenlerle örtüşmeden aşağı veya sola hareket edemezse alt-soldan sabittir. Uygun olan bir paketleme, eğer bu paketlemedeki her bir dikdörtgenin alt-solda sabit olması halinde alt-solda sabittir. Şekil 3.15'te gösterildiği gibi, paketlemedeki her bir dikdörtgenin alt-sol değişmezliği vardır ve paketleme alt-solda sabittir.



Şekil 3.15. Alt-Sol köşeler ve alt-sol değişmezliği [14]

Tanım 3 (Alt-Sol Köşe): Alt-Sol köşe, verilmiş olan büyük bir dikdörtgenin alt-sol kararlılığı bulunduğu boş konumdur. Şekil 3.15'te, toplam beş alt-sol köşe vardır: A, B, C, D ve E.

Tanım 4 (Alt-Sol Yerleşim Hareketi): Bir alt-sol yerleşim hareketi, bir dikdörtgeni alt-sol köşeye yerleştiren ve bu dikdörtgeni alt-sola sabit hale getiren bir işlemdir.

### 3.3.4. Alt-Sol Yerleşim Teoremi

Bu bölümde alt-sol yerleştirme teoremi için önemli bir tanım yapılmıştır.

Teorem 1: Herhangi bir uygun paketleme, her bir dikdörtgenin alt-sol değişmezliğine sahip olduğu başka bir uygun paketleme ile değiştirilebilir. Uygun bir ambalaj  $X_0$  verildiğinde,  $X_0$ 'dan, eşdeğer bir alt-sol stabil paketleme bulunabilir. Her bir dikdörtgenin yönü değiştirilmeden tutulur, her bir dikdörtgenin serbestçe hareket edebildiğini ve Denklem 3.3'teki işlevi göz önünde bulundurduğunu varsayalım:

$$O = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n O_{ij} \quad (3.3)$$

Burada  $O_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  dikdörtgenleri arasındaki örtüşen alandır.  $O_{ij}$ , yerleştirme yapılacak yüzeyin dış tarafı ile yerleştirilecek olan dikdörtgen  $i$ 'nin arasında üst üste gelen alandır.

$$O = O(x) = O(x_1y_1, x_2y_2, \dots, x_ny_n) \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)  $R^{2n}$ 'de tanımlı bir fonksiyondur.

$$S_0, O: S_0 = \{X \mid O(x) = 0\} \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'te  $S_0$ , sıfır noktasının bir kümesi olsun. Daha sonra  $S_0$ 'da ki her bir nokta, örtüşmeyen bir paketlemeye karşılık gelir.  $S_0$ , boş olmayan, kapalı ve sınırlı bir kümedir, çünkü:

- $X_0, O$ 'nun bir sıfır noktasıdır, bu nedenle  $S_0$  boş bir küme değildir.
- $O$ , sürekli bir fonksiyondur, dolayısıyla  $O$ 'nun sıfır noktalarının bir sırasının limiti de sıfır noktasıdır, bu da  $S_0$ 'ın kapalı bir küme olduğu anlamına gelir.
- Herhangi bir uygun paketleme işleminde, her bir dikdörtgen yerleştirme yapılacak yüzeyin her bir sınırını aşmaması gerekir, bu nedenle  $S_0$  sınırlı bir kümedir.

O zaman  $S_0$ 'da tanımlanmış sürekli bir işlevi ele alalım:

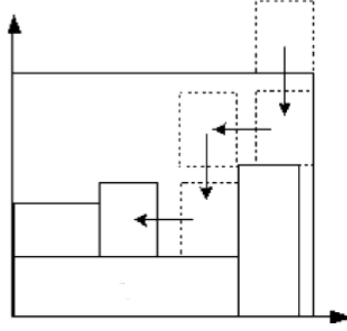
$$L = \sum_{i=1}^N x_i + y_i \quad (3.6)$$

Gerçek analize göre, boş olmayan, kapalı ve sınırlı bir küme üzerindeki sürekli bir fonksiyonun minimum seviyesine ulaşması gerekir.

$$X^* = (x_1^*y_1^*, x_2^*y_2^*, \dots, x_n^*y_n^*) \quad (3.7)$$

Denklem (3.7),  $L$ 'nin minimuma ulaştığı  $S_0$  noktaları olsun.  $X^*$ , her bir dikdörtgenin diğerleriyle örtüşmeden aşağı veya sola hareket edemediği uygun bir paketlemeye karşılık gelir; Aksi takdirde,  $L$ 'nin  $X^*$  üzerindeki minimum seviyesine ulaşması gerçeğiyle çelişen  $S_0$ 'da daha küçük bir  $L$  ile başka bir noktayı bulabiliriz.

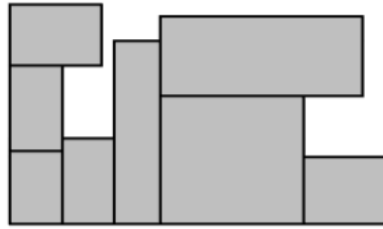
Bu tanıma göre dikdörtgen paketleme problemini çözmek için neredeyse tüm algoritmalar dolaylı olarak kullanılmıştır.  $N$  tane dikdörtgenin üst üste binmeden dikdörtgen bir yüzeye yerleştirilmesi mümkün ise, bu dikdörtgenlerin ve dikdörtgen bir yüzeyin keyfi olarak verilmesi durumunda, Şekil 3.16'da gösterildiği gibi alt-sol yerleşim hareketleri aracılığıyla uygun bir paketleme işlemi yapabiliriz. Tanım 1'e göre, her bir dikdörtgenin alt-sol değişmezliğine sahip olduğu uygun bir paketlemesi vardır. Daha sonra teorem 1'e göre, bu alt-sol değişmezliğine sahip paketleme, bir alt-sol yerleştirme hareketi dizisi ile bulunabilir.



Şekil 3.16. Alt-Sol yerleştirme teoremi örneği [25]

### 3.4. Alt-Sol Dolgu Algoritması

Yerleştirme problemlerinde sıklıkla kullanılan yerleştirme işlemlerinden biri alt-sol dolgu algoritmasıdır (Bottom-Left Fill Algorithm (BLF)). Bu algoritma, parçaları daha önce konumlandırılmış olanlarla örtüşmeden, yerleştirme işleminin yapılacağı yüzeyin alt-sol yerine mümkün olduğu kadar sırayla yerleştirmeyi içerir. Bu işlemlerin geometrisi uygun olmayan çokgen (No-fit Polygon (NFP)) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. NFP hesaplaması kullanılarak, hesaplama karmaşıklığı arttırılsa bile, daha iyi bir paketlemenin belirlenmesi için mevcut boş alanlara uygun şekillerin yerleştirildiği bir tekniği kapsamaktadır.



Şekil 3.17. Alt-Sol Dolgu algoritması örneği [5]

Bu alt-sol dolgu algoritması, bir yüzeyin boyutunu ve şekillerin giriş dizisini ve bunların izin verilen dönüşlerini alır. Algoritma, ilk şekli yüzeyin alt-sol köşesine, en verimli yönelimli olarak yerleştirerek paketlemeye ilerler. Sonraki şekillerin yerleştirilmesi yüzeyin alt-sol köşesinden başlar. Şekil, diğer önceden yerleştirilmiş şekillerle kesişmiyorsa, şeklin yeri geçerli olur. Bu şekilde yerleştirme işleminde kullanılacak tüm şekiller yüzeye yerleştirildikten sonra paketleme işlemi tamamlanır.

Ancak yerleştirme işlemi yapılırken yerleştirilecek olan şekiller daima bir sıraya göre yerleştirilmelidir.

### **3.5. Paketleme Problemleri**

Paketleme problemleri, daha geniş bir yüzey üzerine birden fazla şeklin iyi bir şekilde yerleştirilmesi ile ilgili optimizasyon problemleridir. Bu tür problemler ile birçok iş ve endüstri alanında karşılaşmaktadır. Paketleme işleminin amacı malzemenin kullanımını en üst düzeye çıkarmaktır. Yüksek malzeme kullanımı, seri üretim endüstrileri için özellikle ilgi çekicidir, çünkü yerleşimdeki küçük gelişmeler büyük miktarda malzeme tasarrufu ile sonuçlanabilir ve üretim maliyetini önemli ölçüde azaltabilir. Bu problemler, büyük nesnelerin ve küçük parçaların (şekillerin) geometrik kombinasyonlarından oluşan bir yerleştirme problemleridir. Paketleme problemleri durumunda, büyük nesneler boş olarak tanımlanır ve düzenli veya düzensiz küçük şekiller ile doldurulması gerekir. Paketleme problemlerinin çoğunun amacı, yerleştirme yapılacak yüzeye veya nesneye maksimum sayıda parça (şekil) yerleştirmektir. Paketleme işlemleri sona erdikten sonra devreye kesme problemleri girer. Kesme problemlerinde, büyük nesneler üzerine yerleştirilen 2 boyutlu küçük şekillerin kesilmesi gerekmektedir. Kesim işlemi sonucunda oluşan atıklar kesim kaybı olarak adlandırılır. Kesme ve paketleme problemlerinin çoğunun amacı, kesim kaybını veya israfı en aza indirmektir. Bu şekilde kesilecek olan malzemenin maksimum verim almak amaçlanmaktadır.

Dyckhoff (1990), malzeme ve bu malzemenin alanından kaynaklanan kesme ve paketleme problemleri arasındaki güçlü ilişkiyi vurgulamaktadır [9]. Bu anlamda kesme stok problemleri, küçük nesnelerin kapladığı alanı büyük nesneler halinde paketlemek olarak görülebilir. Paketleme problemlerinde, bir yüzey veya nesne üzerinde çok sayıda şeklin iyi bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu yerleşim işlemleri bir dizi kurallar ile gerçekleştirilmektedir. Yerleştirme probleminin karmaşıklığı veya basitliği ise, çözüm yöntemine, şekillerin geometrisine ve uygulanan kısıtlamalara bağlıdır.

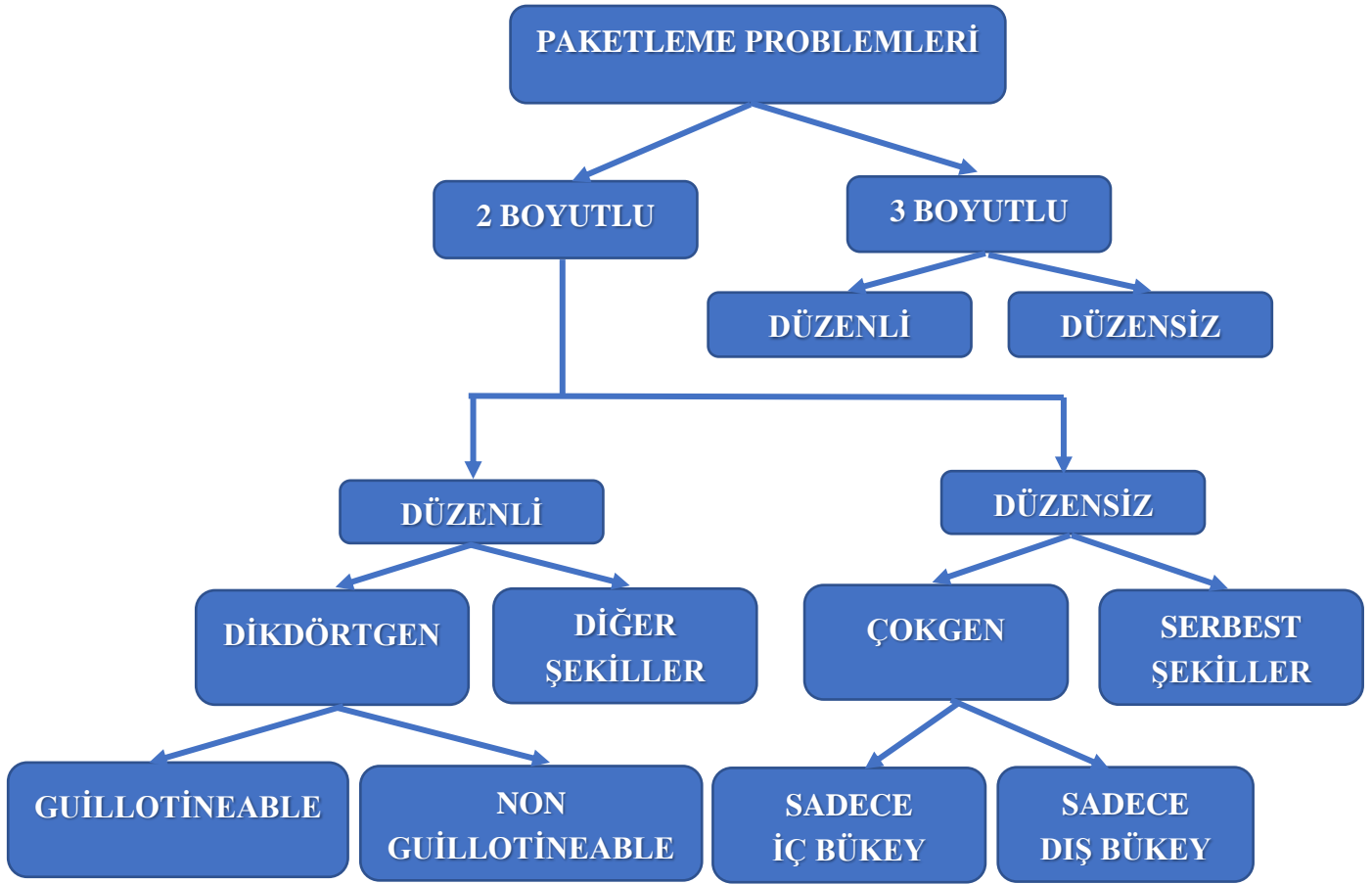
### 3.5.1. Paketleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Son 30 yılda, paketleme ile ilgili problemler literatürde geniş çapta açıklanmıştır. Bu problemler birçok endüstride ortaya çıkmakta ve imalat sektörü ile sınırlı değildir. Örneğin paketleme problemleri, operasyonel araştırmalarda ve finansal sektörde daha soyut bir biçimde karşımıza çıkar. Bu çeşitlilikteki problemler ve uygulama alanları nedeniyle benzer paketleme problemleri literatürde farklı isimler altında görülmektedir. Paketleme problemlerini analiz etmek, farklı uygulama alanlarında karşılaşılmasına rağmen, birçoğunun aynı temel mantıksal yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Dyckhoff (1990) paketleme problemleri için ortak özellikleri tanımladı ve bir sınıflandırma sistemi önerdi. Öklid uzayında boyutlara göre paketleme problemlerini birbirinden ayırdı [9].

Dyckhoff'un sınıflandırma sistemi, paketleme problemlerinin dört önemli özelliğini açıklamaktadır:

- En önemli özellik, desenin geometrisini tanımlamak için gerekli olan minimum boyut sayısını tanımlayan boyutsallıktır.
- Görev türü, tüm nesnelerin ve şekillerin veya sadece bir seçimin belirlenmesinin gerekip gerekmediğini açıklar.
- Nesnelerin çeşitliliği, bu özellik, aynı veya farklı şekle sahip nesnelere içeren problemleri birbirinden ayırır.
- Parçaların çeşitliliği, parçaların şekline ve sayısına karşılık gelir. Problemler birkaç parçadan, uyumlu nesnelere, birçok farklı şekildeki birçok nesneden ve nispeten az sayıda farklı şekilde oluşan birçok parçadan oluşabilir.



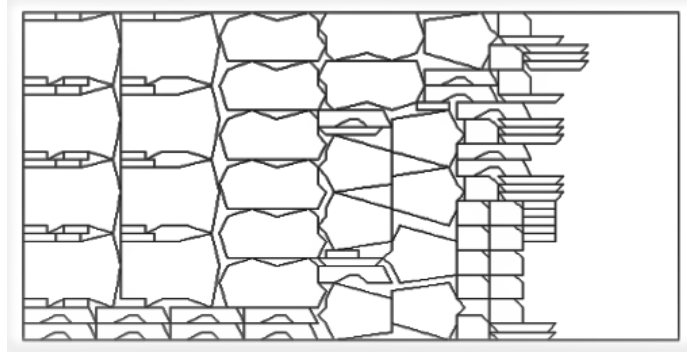
Şekil 3.18. Paketleme problemlerinin sınıflandırılması [28]

### 3.5.2. Problemin Boyutu

Paketleme problemleri 2 veya 3 boyutlu olmaktadır. Ancak paketleme problemlerinde yerleştirme işlemi yapılırken endüstrilerin çoğunda 2 boyutlu şekil yerleştirme görülmektedir. Otomotiv, deri, ayakkabı, mobilya, sac kesim, kâğıt, giyim vb. gibi imalat endüstrilerinde 2 boyutlu paketleme işlemi yapılmaktadır. Paketleme işleminde yerleştirilecek olan parçaların (şekillerin) maksimum verim alınacak şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Üç boyutlu paketleme problemlerinde, aynı veya farklı şekillerdeki n adet dikdörtgen şeklin sabit bir şekle sahip bir konteynere toplam hacmi azaltacak şekilde yerleştirilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Konteyner yükleme ve palet paketleme gibi alanlarda kullanılmaktadır [30].

### 3.5.3. İki Boyutlu Paketleme Problemi

Bir paketleme probleminin amacı, örtüşme olmadan (yani, şekiller üst üste gelmeden) verimli bir şekilde herhangi bir yüzey veya nesne üzerine şekillerin yerleştirilmesidir. Bu nedenle, paketleme problemlerinin karmaşıklığı, paketlenen ürünlerin geometrik şekliyle güçlü bir şekilde ilişkilidir. Literatürde bulunan paketleme problemlerinin çoğu iki boyutludur. 2 boyutlu paketleme problemleri düzenli ve düzensiz şekillerden oluşan yerleştirme problemleri şeklinde iki ana gruba ayrılır. Düzenli şekiller birkaç parametreyle (örneğin: dikdörtgen, daire) belirlenen şekillere sahiptir. Ancak düzensiz şekiller ise, konveks ve konveks olmayan (konkav) şekiller için geçerlidir. Düzenli paketleme problemleri büyük ölçüde dikdörtgen bir nesne üzerine bir dizi dikdörtgen şekillerin yerleştirilmesiyle ilgilidir. Düzenli paketleme problemi, daha çok sac kesme, kâğıt vb. gibi endüstrilerde kullanılmaktadır. Düzensiz paketleme problemleri ise, daha çok deri ve tekstil endüstrilerinde görülen düzensiz veya düzenli bir yüzey veya nesne üzerine düzensiz şekillerin yerleştirilmesiyle ortaya çıkan problemlerdir.



Şekil 3.19. Deri ve tekstil endüstrisindeki düzensiz paketleme problemi örneği [2]

### 3.5.4. Düzenli Şekillerin Paketleme Problemi

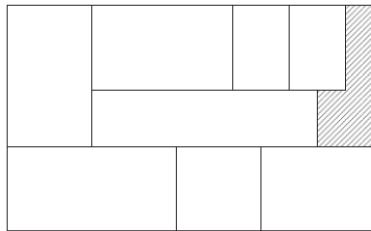
Düzenli şekilleri paketleme problemi, standart büyüklükteki bir dizi büyük dikdörtgenlerin içine bir dizi küçük dikdörtgen, daire vb. gibi parçaların yerleştirilmesi problemi olarak tanımlanabilir.

### a) Dikdörtgen Şekilleri Paketleme Problemi

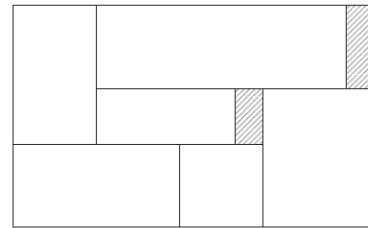
Dikdörtgen paketleme problemi birçok endüstriyel uygulamayı içerir. Örneğin, taşıma (nakliye) endüstrisinde, çeşitli büyüklükteki kutuların mümkün olduğu kadar büyük bir konteynıra yüklenmesi gerekmektedir. Ahşap veya cam endüstrilerinde, dikdörtgen parçaların büyük tabakalara yerleştirilip kesilmesi gerekir. Dikdörtgen paketleme problemi, iki boyutlu paketleme problemlerinin bir alt kümesine aittir ve NP-Hard bir problemdir. Bu problemi çözmek için farklı stratejilere dayanan çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Genel olarak, bu algoritmalar iki ana kategoride sınıflandırılabilir: deterministik olmayan algoritmalar ve deterministik algoritmalar. Benzetimli tavlama (Simulated Annealing) ve genetik algoritma gibi deterministik olmayan algoritmaların en önemli yönü, dikdörtgenler arasındaki topolojik ilişkileri temsil edebilecek veri yapısını tasarlamaktır. Deterministik algoritmaların en önemli yönü, daha az esneklik prensibi gibi paketleme kurallarını belirlemektir.

Dikdörtgen şekillerin paketlenmesi, guillotineable ve non-guillotineable paketleme modeli olmak üzere iki gruba ayrılır. Her iki durumda da amaç, en az atık üreten dikdörtgenlerin paketlenmesini bulmaktır. Kutu paketleme problemleri de dikdörtgen şekillerin paketlenmesi kategorisine dahil edilebilir. Bu işlemde de amaç, yerleştirme yapılacak yüzeye veya nesneye maksimum sayıda dikdörtgen yerleştirmektir.

Guillotineable paketleme problemleri, Şekil 3.20’de de gösterildiği gibi düzenin kalan nesnenin tam uzunluğu boyunca bir dizi düz kesim tarafından işlenmesi gerektiğini öngören bir kısıtlama vardır. Bu tür kesme problemi, örneğin cam ve kâğıt endüstrisinde ortaya çıkar. Non-Guillotineable paketleme problemlerinde ise, Şekil 3.21’de gösterildiği gibi herhangi bir örtüşme olmadığı sürece herhangi uygun bir pozisyona uygun şekil yerleştirilebilir.



Şekil 3.20. Guillotineable [2]



Şekil 3.21. Non- Guillotineable [2]

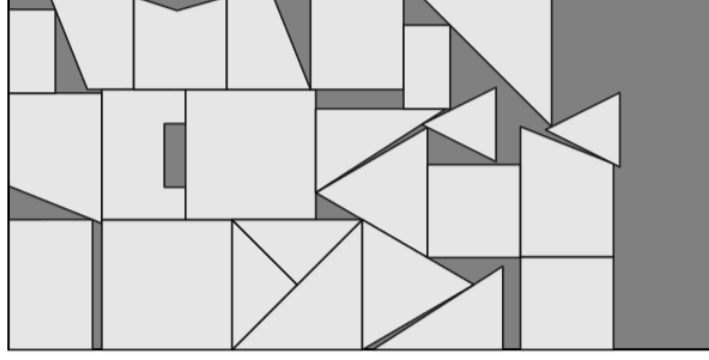
## **b) Dikdörtgenler dışındaki Düzenli Şekillerin Paketleme Problemi**

Bu problem daha çok farklı büyüklükteki dairelerin dikdörtgen bir alana yerleştirilmesiyle ortaya çıkar. Yerleştirme işlemi, sezgisel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir.

### **3.5.5. Düzensiz Şekillerin Paketleme Problemi**

Dikdörtgen paketleme problemleri, 1950'lerde paketleme problemlerinden bu yana önemli bir akademik araştırmanın odak noktası olmuşken, problemin düzensiz şekli son 20 yıla kadar çok fazla ilgi görmemiştir. Bu modellenmesi gereken düzensiz geometriden kaynaklanmaktadır. Çünkü şekillerin düzensiz olması işlemlerin karmaşıklığını arttırmaktadır. Bununla birlikte, bazı önemli endüstrilerde düzensiz bir problem olduğu için, önemli akademik ve endüstriyel ilgi görmüştür. Bu araştırma alanı, akademik toplum ve endüstri içinde geliştirilmekte ve yaygınlaştırılmaktadır.

Düzensiz şekillerin paketleme problemleri, çokgenlerin ve çokgen olmayan (konkav ve rastgele düzensiz) şekillerin yerleştirilmesini ele almaktadır. Yerleştirme işleminde kullanılan alan düzenli veya düzensiz bir şekle sahip olabilir. Düzensiz şekiller büyük olan alanın üzerinde örtüşme (üst üste gelme) olmadan yerleştirilir. Bu problemler, birçok endüstriyel uygulama ve içerdikleri hammadde kullanımındaki azalmalar göz önünde bulundurulduğunda, sadece bilimsel olarak değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel açıdan da önemlidir. Ekonomik açıdan bakıldığında, problemin çözümü, parçaların üretimi için gerekli olan malzeme miktarını ve üretim maliyetlerini azaltır ve endüstriler daha az hammaddeyi yok etme eğiliminde olduğundan, atık azaltmaya katkıda bulunur bu da çevresel faydalar sağlar. Düzensiz paketleme problemleri, giysi, mobilya ve ayakkabı imalatı, sac kesim vb. gibi endüstrilerde kullanılmaktadır. Şekil 3.22'de düzensiz paketleme problemine bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.22. İki boyutlu düzensiz şekilli paketleme örneği [39]

### 3.6. Paketleme Problemlerinin Çeşitleri

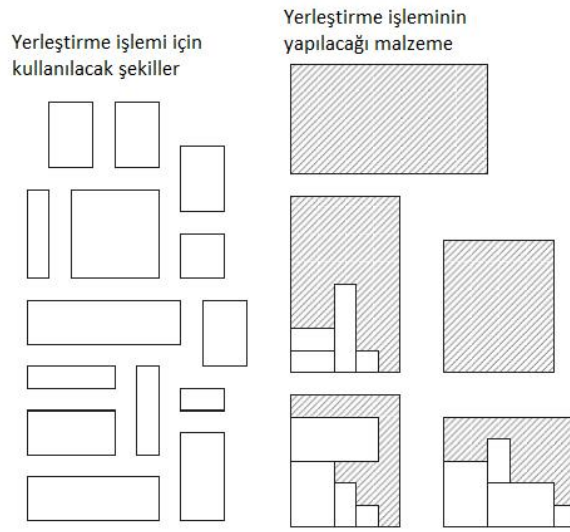
Paketleme sorunları farklı kısıtlama ve hedefleri içeren çeşitli uygulama alanlarında ortaya çıkar. Genel olarak, şerit paketleme (strip packing) ve kutu paketleme (bin packing) görevleri, nesne tipine bağlı olarak ayırt edilebilir.

#### 3.6.1. Kutu Paketleme

Kutu paketleme, bir veya daha fazla kutunun en iyi duruma getirileceği şekilde, yerleştirme yapılacak yüzeyde örtüşme olmadan belirli bir şekilde şekillerin yerleştirilmesini sağlayan NP-Hard/Complete birleştirici bir problemdir. Problem NP-Hard olduğundan dolayı, problemi optimal bir şekilde çözmek için bir polinom zaman algoritmasının varlığı mümkün değildir. Problemin amacı, kutuların yerleştirme işleminin yapılmasında en basit ve en verimli düzeni bulmaktır. Problem özellikle kesme (ahşap ve cam endüstrileri) ve paketleme (nakliye ve depolama) gibi birçok endüstriyel uygulamaya sahiptir. Uygulamalara bağlı olarak yerleştirme işleminde kullanılacak şekiller düzenli veya düzensiz şekiller olabilir. Bu paketleme işlemi, boyutsal olarak, tek boyutlu, iki boyutlu veya çok boyutlu olan birçok çeşide sahiptir. Genellikle uygulamalarda iki boyutlu problemler daha çok kullanılmaktadır.

İki boyutlu kutu paketlemede, yerleştirme yapılacak alanın genişliği  $W$  ve yüksekliği  $H$  olsun.  $j = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  olacak şekilde  $n$  tane dikdörtgen kutu olsun. Yerleştirme işleminde kullanılacak dikdörtgenlerin genişliği  $w_j$  ve yüksekliği  $h_j$  olsun. Problem, Şekil 3.23'te gösterildiği gibi yerleştirilecek olan şekiller üst üste gelmeden

yerleştirme yapılacak alan içinde en verimli şekilde (minimum yer kalacak şekilde) yerleştirilmesi problemidir.

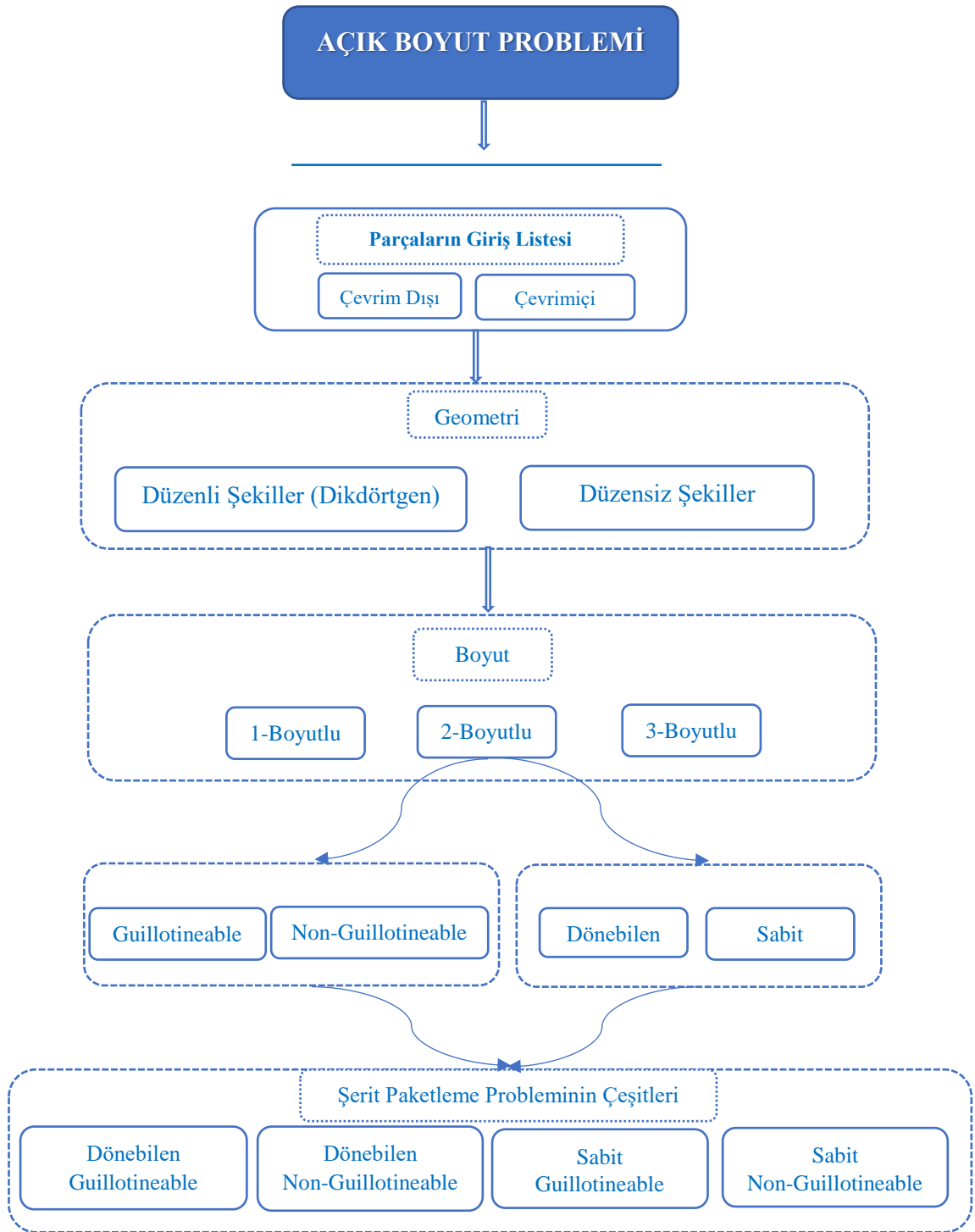


Şekil 3.23. İki boyutlu kutu paketleme problemi [2]

### 3.6.2. Şerit Paketleme

Şerit paketleme problemi, daha büyük bir nesnenin içinde bir dizi küçük parçaların veya şekillerin yerleştirilmesi problemidir. Yerleştirilecek şekiller birbirleriyle örtüşmemeli ve tamamen büyük nesnenin içinde olmalıdır. Bu problem, birçok pratik ortamda bulunabilir ve ahşap levhaların, çelik plakaların veya kâğıt ruloların kesilmesi ve aynı zamanda çok boyutlu kaynak planlaması gibi pek çok endüstriyel uygulamalara sahiptir.

Şerit paketleme problemi, Wascher vd. topolojisi altında bir Açık Boyut Problemi olarak sınıflandırılan bir kesme & paketleme problemidir (Wascher vd., 2007) [15]. Problemin boyutsallığı ve geometrisi dikkate alınmakla kalmaz, aynı zamanda şekillerin şerit üzerine nasıl yerleştirileceği ile ilgili başka özelliklerde olabilir. Şerit üzerindeki küçük parçaların gerçek olarak yerleştirilmesi, model (kesme veya paketleme deseni) veya düzen olarak adlandırılır.



Şekil 3.24. Şerit paketleme probleminin sınıflandırma yapısı [15]

Şerit paketleme problemlerinde genellikle 2 boyutlu paketleme problemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda yerleştirilecek olan şekillerin düzenli veya düzensiz olmasına bağlı olarak iki ana grup incelenecektir.

### 3.6.2.1. Düzenli Şerit Paketleme Problemi

Düzenli şerit paketleme problemlerinde, bir dizi dikdörtgen parçanın/şeklin dikdörtgen bir yüzeye yerleştirilmesi işlemleri ele alınmaktadır.

İki boyutlu şerit paketleme problemlerinde, yerleştirme yapılacak alanın genişliği  $W$  ve yüksekliği  $H$  olsun.  $j = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  olacak şekilde  $n$  tane dikdörtgen parça olsun. Yerleştirme işleminde kullanılacak dikdörtgenlerin genişliği  $w_j$  ve yüksekliği  $h_j$  olsun. Şerit paketleme problemi, şeridin yüksekliğini  $H$  en aza indirecek şekilde şerit içine üst üste binmeden  $n$  tane dikdörtgenin yerleştirilmesidir. Burada 3 önemli sezgisel yerleştirme algoritması ele alınmaktadır. Bunlar, First-Fit Decreasing Height (FFDH), Best-Fit Decreasing Height (BFDH) ve Next-Fit Decreasing Height (NFDH).

#### a) Next-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritması (NFDH)

İlk olarak ortaya çıkarılan iki boyutlu şerit paketleme algoritmalarından biri, Coffman tarafından 1980 yılında yayınlanan bir sonraki uyum azaltan yükseklik (NFDH) algoritmasıdır. Bu algoritma yapılan çalışmalarda diğer algoritmalara göre akla gelen ilk sezgisel algoritma olarak görülmektedir ve diğer algoritmalara göre çalışma mantığı daha basittir. Bu algoritmada, önce yerleştirilecek olan dikdörtgenler yüksekliklerine göre büyükten küçüğe doğru sıralı olarak ele alınırlar ve sırayla yerleştirilecek olan yüzeye (alana) yerleştirme işlemi gerçekleştirilir.

Dikdörtgenleri yüksekliklerine göre sıralamak, dikdörtgenlerin örtüşmesini (üst üste gelmesini) engeller. Yerleştirilecek olan bir sonraki dikdörtgen yükseklik olarak bir önceki dikdörtgenden daha az veya eşittir. Yerleştirme yapılan yüzeyin genişliği yeni yerleştirilecek olan dikdörtgen için yeterli değilse, daha önce yerleştirilmiş olan dikdörtgenlerin üzerinde kendi yüksekliği kadar bir pozisyona yerleştirilmesi sağlanır. Böylece toplam yükseklik yerleştirilmiş olan yeni dikdörtgenin yüksekliği kadar artmış olacaktır. Tüm dikdörtgenlerin yerleştirme işlemi tamamlanana kadar bu işlemler devam etmektedir.

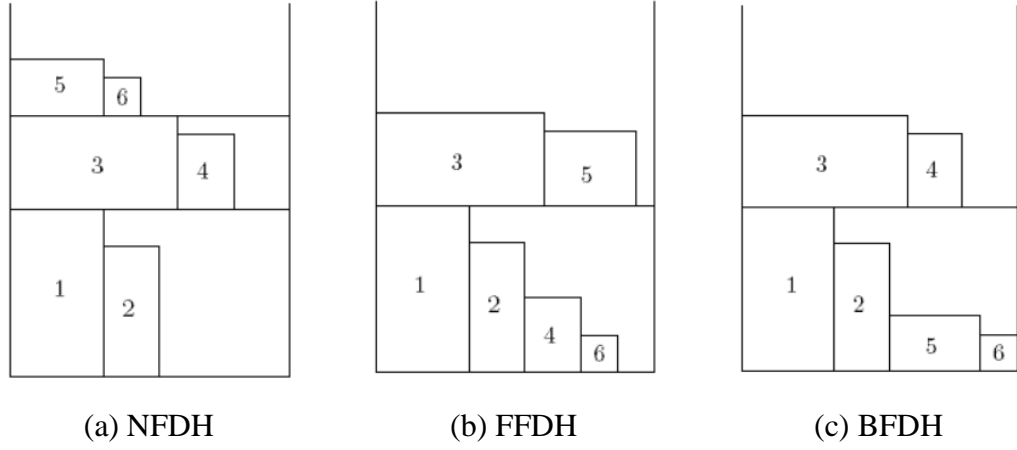
### **b) First-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritması (FFDH)**

İlk uyum azaltan yükseklik (FFDH) algoritması da Coffman tarafından 1980 yılında geliştirilmiştir. Bu algoritma bir sonraki uyum azaltan yükseklik yerleştirme algoritmasında olduğu gibi yerleştirilecek olan dikdörtgenler yüksekliklerine göre azalan sırada sıralanırlar. Yerleştirme işlemi yüksekliği en fazla olan dikdörtgen ile başlar. Bu dikdörtgen ilk seviyeye yerleştirilir. Seviye yüksekliği dikdörtgen yüksekliğine eşittir. Daha sonra yerleştirilecek olan dikdörtgenler, ilk seviyede uygun konumlara yerleştirilir. Bu seviyede yerleştirilecek alan kalmazsa, bir üstte yeni bir seviye açılır ve bu şekilde yerleştirme işlemi sonlanana kadar işlemler devam eder. Bu algoritmada, bir sonraki uyum azaltan yükseklik yerleştirme algoritmasına göre toplam yükseklik daha az olacaktır. Çünkü, bu algoritma boşlukları en verimli şekilde kullanır.

### **c) Best-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritması (BFDH)**

En uygun yükseklik azaltma algoritması (BFDH) algoritması ilk olarak 1990 yılında Coffman ve Shor tarafından ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu algoritma da bir sonraki uyum azaltan yükseklik ve ilk uyum azaltan yükseklik yerleştirme algoritmalarında olduğu gibi yerleştirilecek olan dikdörtgenler yüksekliklerine göre azalan sırada sıralanırlar. Daha sonra dikdörtgenler ilk seviyeden yerleştirilmeye başlanılır ve yerleşecekleri en küçük boşluğa yerleştirilirler. İlk seviyede yerleştirilecek herhangi bir boşluk kalmazsa, yeni bir seviyeye yerleştirilme yapılır ve tüm dikdörtgenler yerleştirilene kadar işlemler bu şekilde devam eder. Bu algoritma, önceki seviyelerin yeniden gözden geçirilmesine izin vermek açısından FFDH algoritmasına benzerdir.

Bu üç sezgisel yerleştirme algoritması ile ilgili örnek yerleştirme işlemleri şekil 3.25'te gösterilmektedir. Burada a) Next-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritmasını (NFDH), b) First-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritmasını (FFDH) ve c) Best-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritmaları (BFDH) ile ilgili örnek yerleşimleri göstermektedir.



Şekil 3.25. Düzenli şerit paketleme problemi ile ilgili yerleştirme algoritmaları [34]

### 3.6.2.2. Düzensiz Şerit Paketleme Problemi

Düzensiz şerit paketleme problemi veya genellikle yerleştirme problemi (nesting problem) olarak da adlandırılan, konveks ve konveks olmayan çokgenler (veya keyfi şekiller) ile uğraşan klasik kesme ve paketleme problemlerinden biridir. Problem, dikdörtgen yüzeye veya nesneye 2 boyutlu düzensiz şekiller kümesi atamaktır. Düzensiz şekillerin, yerleştirme bütünlüğü kısıtlamalarına ve üst üste gelmeme sınırlamalarına uyarak, şeridin kullanılan uzunluğunu en aza indirmek için sabit genişlikte ve sınırsız uzunluk şeridinde konumlandırılmasıdır.

Düzensiz şerit paketleme problemleri, deri endüstrisi, giysi imalatı ve mobilya yapımı gibi üretim süreçlerinde büyük bir öneme sahiptir. Düzensiz şerit paketleme, daha küçük düzensiz parçalar (bizim durumumuzda çokgenler) büyük bir parçaya (bizim durumumuzda şerit) yerleştirilmeli ve şeridin kullanılan uzunluğu en aza indirilmelidir. Düzensiz şerit paketleme problemlerindeki ana kısıtlama, parçalar arasında örtüşmenin olmamasıdır, fakat iki parçanın birbiriyle örtüşüp örtüşmediğini, dokunmadığını veya ayrıştırıldığını belirlemek, bir hesaplama programı için çok karmaşıktır. Literatürde, bu sorunu çözmek için raster yöntemler, doğrudan trigonometrik yöntemler, uygun olmayan çokgen ve phi-fonksiyonu gibi araçlar bulunmaktadır. Biz uygulamamızda uygun olmayan çokgen (No-Fit Polygon (NFP)) yöntemini kullanmaktayız. Bu problemin çokgenlerin dönüşlerine bağlı olarak üç varyasyonu vardır:

- Herhangi bir açıdan dönmesine izin verilir.
- Sonlu sayıda açılarının dönmelerine izin verilir.
- Dönme işleminin gerçekleşmesine izin verilmez.

Tekstil endüstrisi gibi birçok pratik uygulamada, şekillerin yerleştirme işleminde dönme durumları genellikle 0 (dönme olmaz) veya 180 derece ile sınırlıdır.

Düzensiz Şerit Paketleme Probleminin Formülleştirilmesi:

$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ' yerleştirme işlemi için kullanılacak çokgenlerin bir listesi ve  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$  bu çokgenlerin muhtemel yönlendirilme listesi olsun.  $O_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ), bir  $P_i$  çokgeninin döndürülebildiği tüm yönelimlerin kümesidir (yani,  $P_i$ , tüm  $o \in O_i$  için  $o$  derece döndürülebilir).  $W$  genişliğinde ve  $L$  uzunluğunda bir dikdörtgen yüzey  $C = C(W, L)$  şeklinde gösterilsin. Ancak burada  $W$  negatif olmayan bir sabit ve  $L$  ise, negatif olmayan bir değişkendir. Yönelimi belirtilmedikçe veya durumu net olmadığında kolaylık için,  $P_i$  olarak yazılabilen  $P_i(o)$  tarafından  $o \in O_i$  ile  $P_i$  çokgeni döndürülebilir. Bir  $P_i$  çokgeninin referans noktası olan bir  $v_i = (x_i, y_i)$  koordinatı ile bir pozisyonu tarif edilir ki, bu  $P_i$  çokgeninin bir noktasıdır (örneğin: bir tepe noktası veya  $P_i$  çokgeninin ağırlık merkezi olabilir). Kolaylık sağlamak için, tüm  $P_i$  çokgenlerini ve yerleştirme yapılacak dikdörtgen yüzey  $C$ 'yi kapalı bölgeler olarak varsayıyoruz. Daha açık bir şekilde anlatmak gerekirse, referans noktası orijin (0,0) noktasına konulduğunda,  $P_i$  veya  $C$ 'yi tüm iç noktaların kümesi ve sınırdaki noktalar olarak görürüz. Her çokgen  $S$  için,  $int(S)$ ,  $S$ 'nin iç kısmı olsun,  $cl(S)$ ,  $S$ 'nin kapanması olsun,  $\bar{S}$ ,  $S$ 'nin tümleyeni olsun ve  $\partial S$ ,  $S$ 'nin sınırı olsun. Her  $P_i$  çokgeni için, belirsizlik olmadan,  $O_i$  yönelim kümesinin içine sıfır derecenin dahil edildiğini ve her  $P_i$  çokgeninin genişliği Denklem (3.8)'deki gibi olacak şekilde  $o \in O_i$  olan tüm yönelimler için  $w_i(o) \leq W$  olduğunu varsayıyoruz.

$$w_i(o) = \max\{y | (x, y) \in P_i(o)\} - \min\{y | (x, y) \in P_i(o)\} \quad (3.8)$$

Denklem (3.9)'daki Minkowski toplamı ile  $v_i$  koordinatında bulunan bir  $P_i$  çokgeni tanımlarız.

$$P_i \oplus v_i = \{p + v_i | p \in P_i\} \quad (3.9)$$

Daha sonra düzensiz şerit paketleme problemi şöyle tanımlanır:

$L$ 'yi azaltmak için;

$$\text{int}(P_i(o_i) \oplus v_i) \cap (P_j(o_j) \oplus v_j) = \emptyset, \quad (1 \leq i < j \leq n), \quad (3.10)$$

$$(P_i(o_i) \oplus v_i) \subseteq C(W, L) \quad (3.11)$$

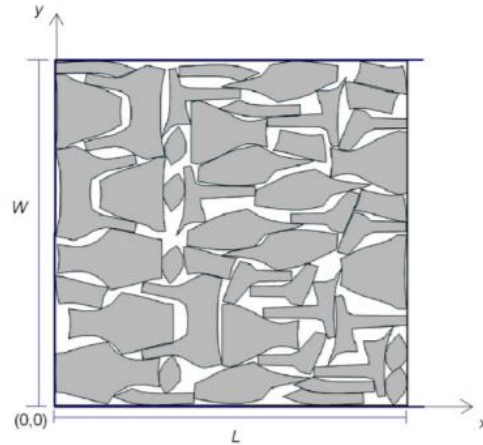
$$L \geq 0, o_i \in O_i, v_i \in R^2 \quad (1 \leq i \leq n). \quad (3.12)$$

Tüm  $P_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) çokgenlerinin  $o = \{o_1, o_2, \dots, \dots, o_n\}$  yönelimlerinin ve  $v = \{v_1, v_2, \dots, \dots, v_n\}$  pozisyonlarının listeleriyle düzensiz şerit paketleme probleminin bir çözümü anlatılmıştır.  $(v, o)$ , çokgenlerin yerleşimini belirlemektedir. Yerleştirme yapılacak dikdörtgenin uzunluğu ( $L$ ),

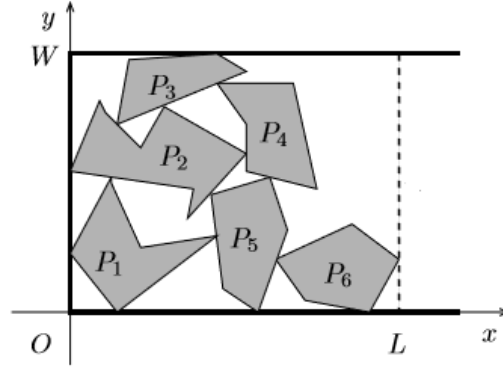
$$L(v, o) = \max\{x | (x, y) \in (P_i(o_i) \oplus v_i)\} - \min\{x | (x, y) \in (P_i(o_i) \oplus v_i)\} \quad (3.13)$$

Ve tüm  $P_i$  çokgenleri için,  $(P_i(o_i) \oplus v_i) \subseteq C(W, L(v, o))$  ve  $W$  ise Denklem (3.14) gibi olur.

$$W \geq \max\{y | (x, y) \in (P_i(o_i) \oplus v_i)\} - \min\{y | (x, y) \in (P_i(o_i) \oplus v_i)\} \quad (3.14)$$



Şekil 3.26. Düzensiz şerit paketleme problemi yerleştirme örneği [10]



Şekil 3.27.  $C(W, L)$  dikdörtgeni içinde 6 çokgenin uygun yerleşim örneği [37]

### 3.7. Kesme & Paketleme Problemi ve NP-Complete

Kesme ve paketleme problemleri NP-Complete (Non-deterministic polinomial) problemlerdir. NP sınıfının içerdiği problemler, deterministik olmayan yani, rasgele seçilmiş olan çözümün olma ihtimalini test eden ve polinom zamanda çözülen problemlerdir. Bu sınıfa ait problemler, mümkün olabilen tüm çözümleri deneyerek çözümü bulmaya çalışır, bu çözüm sonucunda hesaplama zamanı problemin büyüklüğüne göre üsteldir. Paketleme problemlerinin 3 boyutlu olanları ve düzensiz şekilli paketleme işlemleri çok karmaşık olduğundan, bu problemlerde NP-Complete problemler olarak kabul edilir. Uygulamaya bağlı olarak paketleme problemine çeşitli sınırlamalar getirilebilir. Bu sınırlamalar problemin karmaşıklığına katkıda bulunabilir ve bu yüzden bu problemlerin sınırlı versiyonları da NP-Complete olarak kabul edilebilir.

Tanımlamaya göre NP-Complete sınıfı, en uygun çözümleri bulmak için hali hazırda bilinen tüm algoritmaların, bir polinom fonksiyonuna göre değil, problem büyüklüğü ile katlanarak büyüyen bir dizi hesaplama adımını gerektirdiği önemli bir özelliğe sahiptir. Kesin (optimal) bir algoritma aramak faydalı değildir, çünkü herhangi bir verimli optimal çözümün mümkün olmadığı görünmektedir. Optimal bir çözüm bulması garanti edilmeyen alternatif yaklaşımlar bunun yerine kabul edilir. Böylece çözüm kalitesinden vazgeçerek, hesaplama verimliliği elde edilebilir. Bu bakış açısı genellikle kesme ve paketleme işlemlerinde benimsenir ve yaklaşık algoritmaların, yani sezgisel algoritmaların geliştirilmesine yol açar.

## 4. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

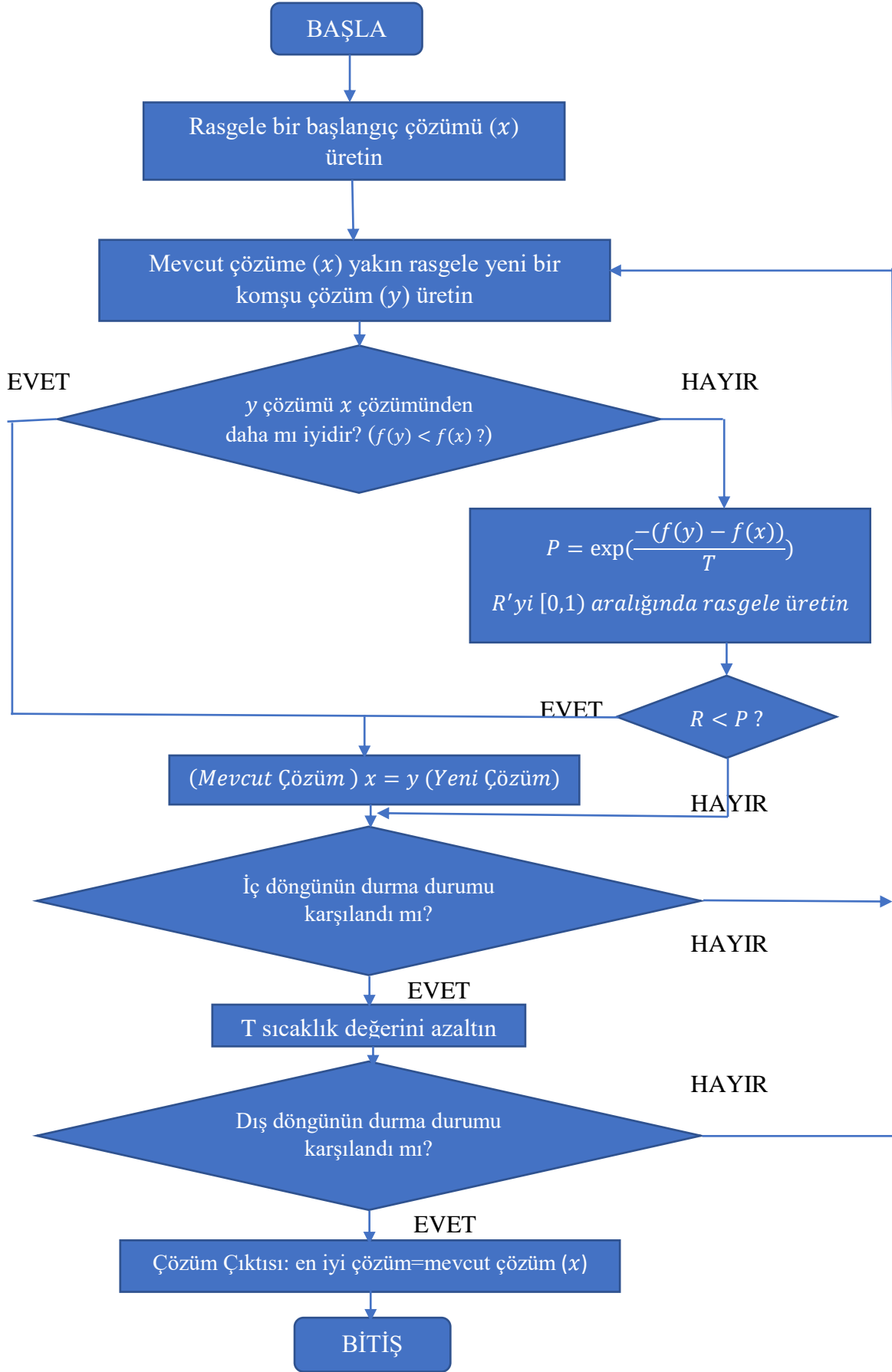
### 4.1. Benzetimli Tavlama Algoritması

Tavlama, erime noktasının üzerinde ısınan, sıcaklığını koruyup ve daha sonra mükemmel bir kristal yapıya katılaşıncaya kadar çok yavaş bir şekilde soğuyarak metal, cam veya kristalin belirli karışımlarının kıvama getirilmesi olarak adlandırılan ısı bir işlemdir. Tavlama işleminin sonucunda oluşan kristal yapı, maddenin fiziksel özelliklerinin daha iyi olmasını sağlayan moleküler yapıların değişikliklere uğramasıyla oluşur. Bu değişiklikler, maddeye ait parçacıkların azalmış olan yeni enerjilerine göre yeniden düzenlenmesidir. Tavlama işleminin amacı, yumuşaklığı, dayanıklı olmayı, esnek olmayı ve belirli moleküler bir yapıyı elde etmektir. Bu fiziksel-kimyasal işlemler ile yüksek kaliteli malzemeler üretilir. Bu işlemin simülasyonu, benzetimli tavlama ((Simulated Annealing) (SA)) olarak bilinir. Fiziksel malzeme durumları problem çözümleri, bir çözüme mal olan durumun enerjisine, zamana ve bir sıcaklık kontrol parametresine karşılık gelir. Metropolis algoritması, belirli bir sıcaklık için bir katı maddenin sıcaklık dengesine gelişimini simüle etmek için kullanılan basit bir yöntemdir. SA, sıcaklığın yüksekte alçağa değiştiği metropolis algoritmasının bir çeşididir. Aynı zamanda, küresel minimum olmayan yerel minimumdan kaçmak için rasgele yükselme hareketleri ile değiştirilmiş bir iniş algoritmasıdır. Tavlama algoritması, durum uzayını minimize edilecek olan maliyet fonksiyonunun alanı olan ve durağan olmayan sonlu bir durum markov zincirini simüle eder. Önem örnekleme, tavlama işleminin altında yatan temel ilkedir. Bazı fiziksel durumları verimli bir şekilde tahmin etmek için bir parçacık sistemi modelinin örnek durumlarını seçmek için istatistiksel fizikte kullanılmıştır. Önem örnekleme olasılıklı olarak daha düşük enerjili durumları desteklemektedir.

Tavlama işlemi, temel olarak iki işlemden oluşur: birincisi, maddenin istenilen sıcaklığa kadar ısıtılmasıdır. Bu işlemde ısıtma gerçekleştikten sonra, madde (metal, cam vb.) parçacıklarının sıcaklığı artar ve oldukça yüksek bir enerjiye ve aynı zamanda serbestliğe sahip olurlar. İkinci işlem ise, ısıtma işleminden sonra maddeyi belirtilen herhangi bir sıcaklıkta tutma ve bu işlemden sonra soğutma. Sıcaklık yavaş bir şekilde düşürülerek soğutma işlemi gerçekleştirilir. Soğutma işleminin gerçekleşmesiyle madde parçacıklarının enerjileri azalır. Soğutma işleminde genellikle minimum

soğutma sıcaklığı oda sıcaklığına kadar olmaktadır. Bu işlemler gerçekleşirken en önemli bir parametrede zamandır. Soğutma işleminin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi kristal yapılar içerisinde bozulmalara yol açar. Bu bozulmaların gerçekleşmemesi için tavlama işleminin süresi yeteri kadar uzun olmalı ve yavaş bir şekilde soğutma işlemi gerçekleştirilmelidir. Ancak bu şekilde istenilen kristal yapısı elde edilebilir. Tavlama işleminde en önemli parametrelerden biri de sıcaklıktır. Sıcaklığın artırılması, tavlama işleminin daha hızlı gerçekleşmesinin sağlar.

Benzetimli tavlama algoritması, ilk olarak 1983 yılında Kirkpatrick vd. tarafından geliştirilen bir yerel arama algoritmasıdır. İlk geliştirildiğinde daha çok optimizasyon (sezgisel eniyileme) problemlerinde kullanılmaktaydı ve yerel en küçük değere sahip olan doğrusal olmayan fonksiyonların en iyi değerlerinin bulunması ve aynı zamanda birden fazla değişkene sahip fonksiyonların en küçük ve en büyük değerlerinin bulunması için geliştirilmiştir. Bu benzetimli algoritma daha pek çok problemlerde kullanılmaktadır. Bu problemlerden bazıları: görüntü işleme, gezgin satıcı, elektronik devrelerin tasarlanması ve kesme ve paketleme problemleridir. Bu algoritma, metal, cam vb. gibi katı maddelerin enerjisini en aza indiren fiziksel bir sistemin tavlama işlemi ile birleştirici optimizasyon problemlerinin çözümü arasındaki benzerlik üzerine kurulmuştur. Benzetimli tavlama algoritmasının optimizasyon (sezgisel eniyileme) problemleri için akış diyagramı aşağıda Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Benzetimli tavlama algoritmasının akış diyagramı

Benzetimli tavlama algoritmasında arama işlemi ilk olarak, herhangi bir duruma karşılık gelen rasgele bir başlangıç çözümü  $x$  ile başlar. Bu işlemden sonra, mevcut çözüme yakın olası rasgele yeni bir komşu çözüm  $y$  üretilir. Daha sonra yeni çözüm ile mevcut çözüm karşılaştırılır. Eğer yeni çözüm, mevcut olan çözümden daha iyi ise, yeni çözüm, mevcut olan çözüm ile değiştirilir. Aksi durumda, yeni çözüm Denklem (4.1) ile ifade edilen eşitsizliğe göre belirli bir olasılık değeri ile kabul edilir.

$$P = \exp\left(\frac{-(f(y)-f(x))}{T}\right) \quad (4.1)$$

$$R < P$$

Denklem (4.1) ile ifade edilen eşitlik sağlanırsa, yeni çözüm, mevcut olan çözüm ile yer değiştirir. Eğer bu eşitsizlik sağlanmazsa, iç döngünün durma durumu karşılanmaz ve yeni bir çözüm üretmek üzere tekrar ikinci adıma dönülür. Denklem (4.1)'de ifade edilen  $R$ ,  $[0,1)$  aralığında düzgün dağılımlı rasgele üretilen bir sayıdır ve  $T$  ise, sıcaklık değerinin ifade edildiği parametredir. Yeni çözüm, mevcut çözüm olarak kabul edildikten sonra bu algoritma için iç döngünün durma durumunun karşılanıp karşılanmadığı kontrol edilir. Burada iç döngü durumu, her sıcaklık değerinde kaç defa olası yeni çözüm üretilebileceğine karar verir. Eğer iç döngünün durma durumu karşılanırsa,  $T$  sıcaklık değeri, önceden belirlenmiş bir soğutma programına göre azaltılır. Aksi durumda, ikinci adıma tekrar gidilir, yeni bir çözüm üretilir ve buraya kadar yapılmış olan işlemler yeniden yapılır. Bu işlemden sonra dış döngünün durma durumunun karşılanıp karşılanmadığı kontrol edilir, eğer bu durum karşılanıyorsa, çözümün çıktısı olan en iyi çözüm, en küçük maliyete sahip olan mevcut çözüm olur ve daha sonra algoritma sonlandırılır. Aksi durumda, algoritma tekrardan ikinci adıma gider ve bu adıma kadar yapılan işlemler tekrarlanır.

Benzetimli tavlama algoritmasının belirli parametreleri bulunmaktadır ve herhangi bir probleme uygulanmadan önce bu parametrelerden hangilerinin kullanılacağını belirlemek gerekir. Bu parametreler: maliyet fonksiyonunun belirlenmesi, komşu çözümlerin üretilmesi, soğutma programının belirlenmesi ve iç döngü ile dış döngü kriterlerinin belirlenmesi.

Maliyet fonksiyonunun belirlenmesi: Bu parametre problemden probleme değişkenlik göstermektedir. Bizim çalışmamızda olası bir çözüm için maliyet fonksiyonunun değeri Denklem (4.2) 'de tanımlanan eşitliğe göre hesaplanır. Bu

çalışmada, maliyet fonksiyonundaki değişiklik, yerleşim düzeninin fire değerindeki değişikliğini temsil eder.

$$fire = \frac{\text{Ana nesnenin Alanı} - \text{yerleştirilen parçaların alanlarının toplamı}}{\text{Ana nesnenin Alanı}} \quad (4.2)$$

Burada ana nesnenin alanı toplam alandır. Yerleştirilen parçaların alanları toplamı ise, kullanılan alandır. Elde edilen fire değeri toplam alanın kaçta kaçının kullanıldığını gösterir.

**Komşu çözümlerin üretilmesi:** Bu parametre, arama alanındaki mevcut çözümlere yakın bir çözüm üretmek için kullanılır. İç döngü durumu karşılanana kadar yeni olası komşu çözümler üretilir. Bu çalışmada, iki komşu hamlesi temel olarak kullanılmıştır: takas hareketi ve değişim hareketi (Leung vd., 2001). Takas hareketinde, çözüm içinde rastgele iki değer seçilir ve bu değerlerin yerleri değiştirilir. Daha sonra bir komşu çözümü üretilir. Değişim hareketinde, çözüm içinde rastgele iki değer seçilir ve ikinci değer, diğer değerın önüne koyulur. Böylece yeni bir çözüm elde edilir.

**İç döngü ve dış döngü kriterinin belirlenmesi:** İç döngü kriteri, her sıcaklıkta kaç olası yeni çözüm üretileceğine karar verir. Dış döngü kriteri ise, arama sürecini durdurmak için kullanılır.

**Soğutma programının belirlenmesi:** Bu parametre, benzetimli tavlama algoritmasının verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Her iterasyonda algoritmanın sıcaklık değerleri güncellenmektedir. Sıcaklık çok hızlı bir şekilde azalır, yerel minimuma erken bir yakınsama meydana gelebilir. Aksi durumda, sıcaklık yavaş bir şekilde azalır, algoritmanın yerel minimuma yakınsaması yavaş olacaktır. En iyi çözümü elde etmek için, başlangıç sıcaklığı, iterasyon sayısı ve son sıcaklık değerlerinin en uygun bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Literatürde Lundy ve Mees, Orantılı Azalma vb. gibi soğutma programları bulunmaktadır. Bu çalışmada orantılı azalma soğutma programı üzerinde çalışılmıştır. Bu soğutma programı, Denklem (4.3) ve Denklem (4.4)'de gösterildiği gibi  $k$ . ve  $k + 1$ . iterasyonlardaki iki sıcaklık değeri ile ilgilidir.

$$T_{k+1} = \alpha T_k \quad (4.3)$$

$$\alpha = \sqrt[M]{\frac{T_f}{T_i}} \quad (4.4)$$

Denklem (4.3)'deki  $T_k$  ve  $T_{k+1}$  sırasıyla  $k$ . ve  $k + 1$ . iterasyonlarındaki sıcaklık değerleridir.  $\alpha$ , iki sıcaklık değeri arasındaki katsayıdır ve 0 ile 1 arasında değişir. Denklem (4.4)'deki  $M, T_f$  ve  $T_i$  sırasıyla iterasyon, son sıcaklık ve başlangıç sıcaklık değerleridir.

## 4.2. Tabu Arama Algoritması

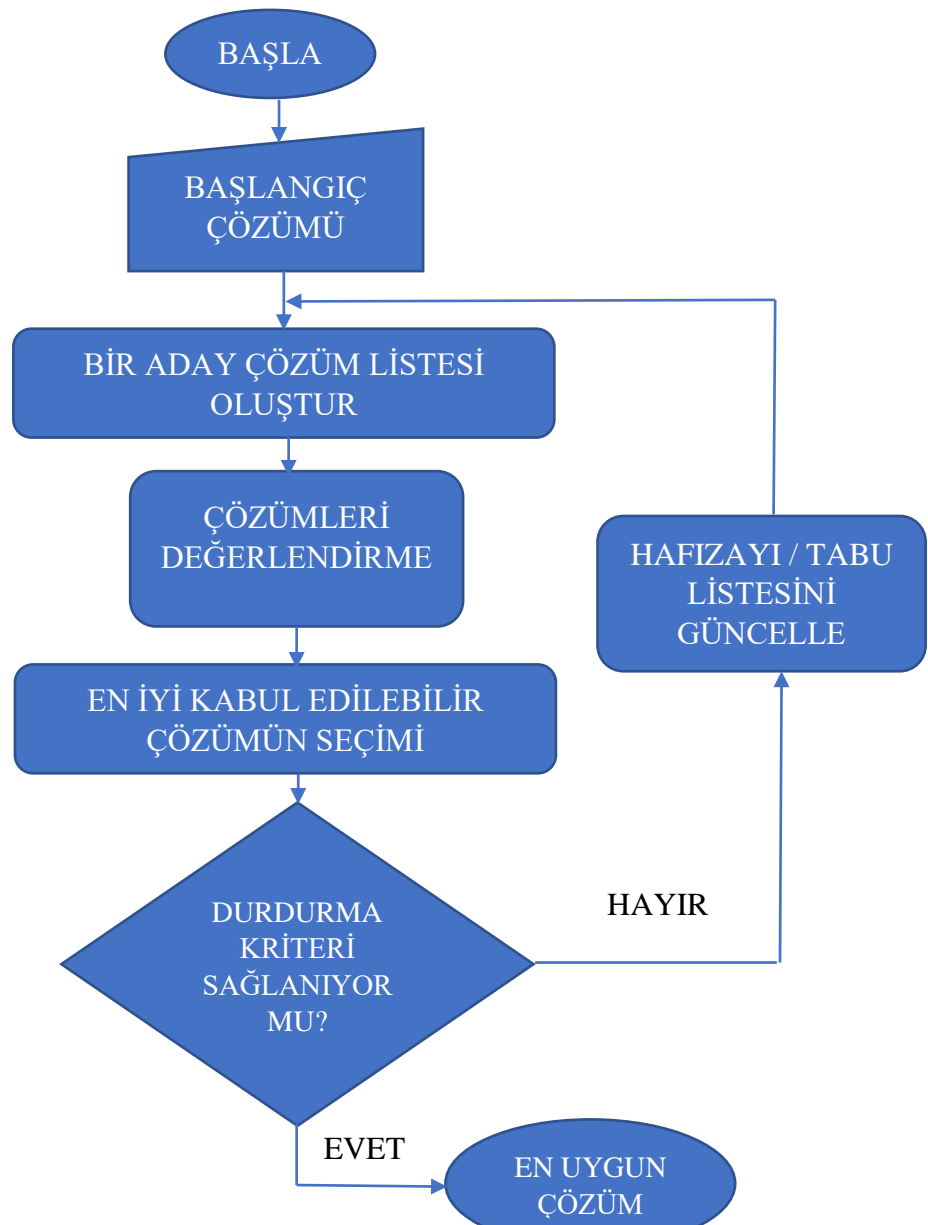
Tabu Arama Algoritması, uyarlanabilir veya esnek bellek yapılarının kullanımıyla yönlendirilen bir arama tekniğidir. Simulated Annealing (Benzetimli Tavlama) ve genetik algoritmalar gibi meta-sezgisel yöntemlerden farklıdır. Tabu arama, arama algoritmasının bir dizi iterasyon için yakın zamanda yürütülen hareketlere dönmesini engelleyen yerleşik bellek mekanizmalarını içerir. Mevcut iterasyon adımında tüm hareketleri içeren bir tabu listesi tutulur. Bu arama, bir komşuda en iyi kabul edilebilir hareketi bulmak için bir amaç fonksiyonu tarafından yönlendirilir (Reeves, 1993; Glover ve Laguna, 1993). Tabu Arama Algoritmasının (TAA) temel formu, Fred Glover (1977, 1986) tarafından önerilen fikirler üzerine kurulmuştur. Bu araştırmacılara göre, Tabu Arama, esnek bir bellek kullanımıyla karakterize edilen yinelemeli bir arama yaklaşımıdır. Tabu aramanın yerel optimaliteyi aştığı süreç, her iterasyonda en yüksek değerlendirme çözümünü seçen değerlendirme fonksiyonuna dayanır. Değerlendirme fonksiyonu, mevcut çözümün mahallinde, amaç fonksiyonunda en fazla gelişme veya en az bozulmayı sağlayan hareketi seçer. Hareket, bir olasılık fonksiyonuna dayanılarak kabul edildiğinden, kabul edilen hamlelerin özelliklerini saklamak için bir tabu listesi kullanılır, böylece sonraki iterasyonda bu özellikler tabu olarak sınıflandırılır. Tabu listesini kontrol etmek ve güncellemek için yasak olarak adlandırılan bir strateji kullanılır. Tabu aramasına dayalı bir algoritma bazı öğeler gerektirir: (i) Hareket, (ii) Komşu, (iii) Bir başlangıç çözümü, (iv) Bir arama stratejisi, (v) Bir bellek, (vi) Bir amaç fonksiyonu, (vii) Bir durdurma kriteri ve (viii) Tabu Listesi. *Hareket*, Mevcut olan bir çözümde yapılan değişiklikler ile yeni çözümlerin elde edilmesi bu mekanizmayla olur. Bu mekanizmada meydana gelebilecek olan hareketler, mevcut çözümümüzün komşularını oluşturmaktadır. *Komşu*, Tabu arama algoritmasında, uygun çözümün bulunması için komşuluk en temel bileşenlerden biridir. Komşu çözümler, mevcut olan çözüme yakın tanımlanmalıdır. En uygun çözümün bulunması için amaç

fonksiyonuna göre en iyi hareketin seçilmesi işlemidir. Komşuluk aynı zamanda takas ve yer değiştirme hareketi olarak da tanımlanmaktadır. *Bellek (Hafıza)*, Tabu arama algoritmasını diğer meta-sezgisel algoritmalarından ayıran temel bileşenlerden biridir. Bu algoritmada, arama işlemi süresince meydana gelebilecek durumlar, belleğe kaydedilir. Yasak olan hareketler tabu olarak isimlendirilir ve tabu listesine kaydedilir. Tabu arama algoritmasında iki farklı bellek türü vardır. *Kısa Süreli Bellek (Yakınlığa dayalı bellek)*, Zaman ve depolama kapasitesi bakımından sınırlı bir çeşit bellektir. TA'da, tabu listesi kısa süreli bir hafıza olarak kabul edilebilir. Bu süre tabu süresidir. Kısa süreli bir bellekle, önceden belirlenmiş bir çözüm farklı bir komşu ile yeniden gözden geçirilebilir. *Uzun süreli bellek (Sıklığa dayalı bellek)*, Zaman ve depolama kapasitesi açısından kısa süreli hafızadan farklı bir tür bellektir. Uzun süreli belleği kullanarak daha önce ziyaret edilen bir çözümü ziyaret etme olasılığı çok azdır. Bu bellek yapısında, hareketlerin sıklığı oldukça önemlidir ve bu hareketlerin sıklığı bellekte tutulur. *Tabu Listesi*, Önceden ziyaret edilen bir çözümü ziyaret etmeyi önlemek için, TA tabu hareketlerinin veya hareketlerin özelliklerinin listelendiği bir tabu listesi kullanır. Ayrıca, tabu adı bu yasaklanmış hareket durumlarından kaynaklanır. Tabu listesinin boyutunun belirlenmesi, yapılacak olan arama işleminin sonucunu önemli ölçüde etkilemektedir. *Durdurma Kriteri*, Bu algoritmada durdurma kriterleri sağlanıncaya kadar algoritma çalışmasına devam etmektedir. Durdurma kriterlerinden bazıları şu şekildedir: Belirlenen iterasyon sayısına ulaşılması durumunda, Uygun çözümün elde edilmesi, Algoritma iyi sonuç üretememesi ve seçilmiş olan komşu çözümün komşularının olmaması.

TA, yinelemeli yerel bir arama meta-sezgisel yöntemidir. Diğer meta-sezgisel yöntemlerle karşılaştırıldığında tabu aramasının en belirgin özelliği, arama sürecini yönlendirmek için bir belleğin sistematik olarak kullanılmasıdır. Tabu aramanın en yaygın uygulanan özelliği, yerel minimumdan kaçmak için kısa süreli belleğin kullanılmasıdır. TA tipik olarak, bir hareketin uygulanmasından kaynaklanan olası çözümler arasında komşular kümesi seçildikten sonra, her bir yinelemede mevcut çözüm ve en iyi çözüm olarak saklanan bir ilk uygulanabilir çözümün tanımına dayanmaktadır. Amaç fonksiyonunun değeri tüm olası hareketler için değerlendirilir ve en iyi olanı seçilir. Yeni çözüm, değeri bir öncekinden daha kötü olsa bile kabul edilir ve hareket tabu olarak adlandırılan bir listeye kaydedilir. TAA, Denklem (4.5)'de belirtilen formda gösterilebilir:

$$\text{Min } f(x); x \in X \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'deki ifadede,  $x \in R_n$ , amaç fonksiyonu  $f(x)$ , doğrusal veya doğrusal olmayabilir ve belirli kısıtlama türlerini karşılamaya yönelik ceza fonksiyonu bileşenlerini içerebilir.  $x \in X$  koşulu, özel stratejik varyasyonlar haricinde, aramanın her adımında sürdürülecek kısıtlayıcı koşulları özetler ve çoğu durumda  $x$ 'in belirli bileşenlerini ayrı ayrı değerler halinde alması gerekir. Tabu arama algoritmasında,  $x$  herhangi bir hareketi gösterir ve  $X$  ise, tüm hareketleri gösterir.  $X$  kümesindeki her bir hareket, mevcut olan çözümün bir komşusunun seçim işlemini gösterir. Tabu Arama Algoritmasının işleyiş şekli Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Tabu arama algoritmasının akış diyagramı

Bu algoritma bir başlangıç çözümü ile başlar. Bu başlangıç çözümü, rasgele değerler ele alınarak elde edilir. Bu algoritmanın amacı, yerel minimum değeri bulmaktır. Daha sonra, mevcut çözümün komşularından yeni bir çözüm ele alınır. Bir çözümden başka bir çözüme gitme işlemi hareket olarak tanımlanmaktaydı ve bu hareket işleminin sonucunda elde edilen daha iyi çözümler belleğe kaydedilir. Belleğe kaydedilen iyi çözüm, artık mevcut çözüm olarak dikkate alınır. Kötü sonuçlar ise, tabulaştırılır ve tabu listesine kaydedilir. Bu işlemler en iyi çözüm elde edilene kadar devam eder. En iyi çözüm elde edildikten sonra durdurma kriteri sağlanır ve arama işlemi sona erdirilir. Durdurma kriteri sağlanmazsa, bellek ve tabu listesi güncellenir ve tekrardan başa dönülür. Burada önemli olan bir başka durum ise, bazı hareketlerin tekrardan yapılması belli süreyle yasaklanır ve bunlarda tabu listesine kaydedilir.

Kesme ve Paketleme problemleriyle ilgili olarak, tabu arama ile az sayıda çözüm yaklaşımı, genetik algoritma ve benzetimli tavlama ile yapılan çalışmalardan önerilmiştir. Bu alandaki ilk çalışma, 90'lı yılların başlarında Blazewicz ve ortak araştırmacıları tarafından gerçekleştirildi. Blazewicz vd. (1993) tarafından düzensiz paketleme problemlerine tabu arama algoritması ilk olarak uygulandı. Basit bir yerleştirme prosedürü ile üretilen uygun bir yerleşim çözümü ile başlayarak, mevcut düzeni daha da geliştirmek için bir tabu arama işlemi kullanıldı. Tek bir öge seçildikten sonra, birkaç yeni pozisyon denenir ve en iyi olan pozisyona yerleştirme işlemi gerçekleştirilir. Hareket, bir parçanın bir konumdan başka bir konuma örtüşme olmadan yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Son yinelemeler sırasında konumları değişen parçalar, tabu listesinin üyeleridir.

## 5. UYGULAMALAR

Bu bölümde önceki bölümlerde anlatılan kesme ve paketleme problemlerine ait çözüm yaklaşımları ele alınmıştır. Bu çözüm yaklaşımlarında, alt-sol yerleşim yöntemi, uygun olmayan çokgen, NFDH, FFDH, BFDH ve alt-sol dolgu yöntemi gibi sezgisel yerleştirme yöntemleri ile benzetimli tavlama ve tabu arama algoritmaları gibi metasezgisel yöntemler kullanılmıştır. Çözüm yaklaşımları dört alt bölümde ele alınmış ve çeşitli uygulamalar ile incelenmiştir.

Birinci bölümde, iki boyutlu dikdörtgen bir yüzey/alan ve iki boyutlu dikdörtgen parçalardan oluşan düzenli şerit paketleme problemleri için, NFDH, FFDH, BFDH ve uygun olmayan çokgen sezgisel yöntemleri birlikte kullanılarak kesme ve paketleme problemlerinin çözümü için bir yerleşim modeli oluşturulmuştur.

İkinci bölümde, iki boyutlu dikdörtgen bir yüzey/alan ve iki boyutlu dikdörtgen parçalardan oluşan düzenli kesme ve paketleme problemleri için, alt-sol yerleşim yöntemi, uygun olmayan çokgen ve FFDH sezgisel yöntemleri birlikte kullanılarak bir yerleşim modeli oluşturulmuştur.

Üçüncü bölümde, iki boyutlu dikdörtgen bir yüzey/alan ve iki boyutlu dikdörtgen parçalardan oluşan düzenli kesme ve paketleme problemleri için, alt-sol yerleşim yöntemi ve uygun olmayan çokgen sezgisel yöntemleri ile benzetimli tavlama ve tabu arama meta-sezgisel yöntemleri birleştirilerek bir yerleşim modeli oluşturulmuştur.

Dördüncü bölümde ise, iki boyutlu dikdörtgen bir yüzey/alan ve iki boyutlu konveks şekillerden oluşan düzensiz kesme ve paketleme problemleri için, alt-sol yerleşim yöntemi, uygun olmayan çokgen ve FFDH sezgisel yöntemleri kullanılarak bir yerleşim modeli elde edilmiştir.

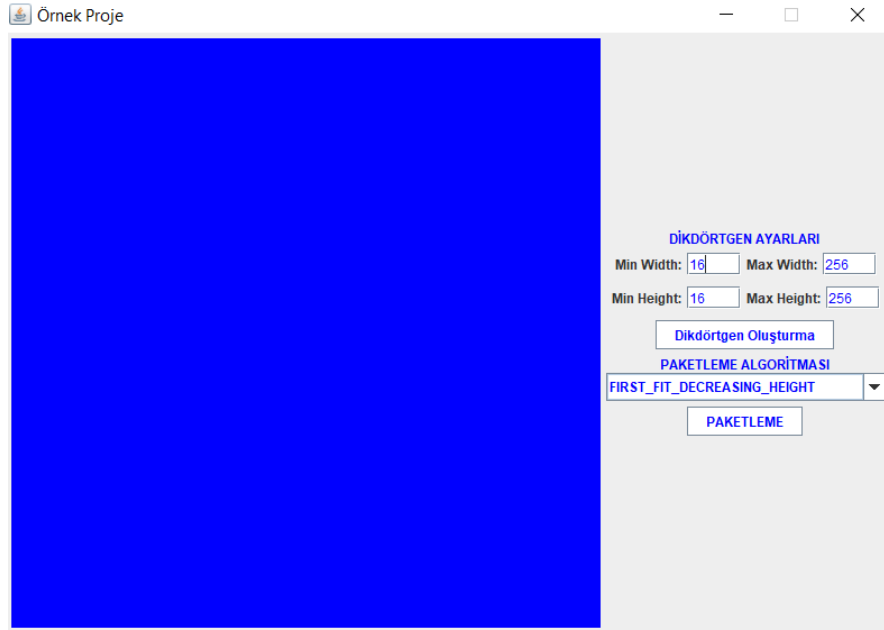
Uygulamalar, java programlama dili kullanılarak geliştirilmiş ve kodlar NetBeans IDE 8.2 programı kullanılarak yazılmıştır. Intel i7 2.6GHz işlemciye sahip bir bilgisayar üzerinde işlemler yürütülmüştür.

### 5.1. Düzenli Şerit Paketleme Problemleri için Çözüm Yaklaşımı

Şerit paketleme probleminde, dikdörtgenlerin sabit genişlikte ve değişken uzunlukta bir şerit halinde yerleştirilmesi optimize edilir, böylece şeridin toplam uzunluğu minimize edilir. Bu bölümde iki boyutlu şerit paketleme probleminin çözümü için iki uygulama yapılmış. Her iki uygulamada da, Bölüm 3.6.2.1’de anlatılan düzenli şerit paketleme problemleri çözüm yöntemlerinden, NFDH, FFDH, BFDH sezgisel yöntemleri ile Bölüm 3.2’de anlatılan uygun olmayan çokgen yöntemleri birleştirilerek ele alınmış ve kesme & paketleme problemlerine bir çözüm sunulmuştur.

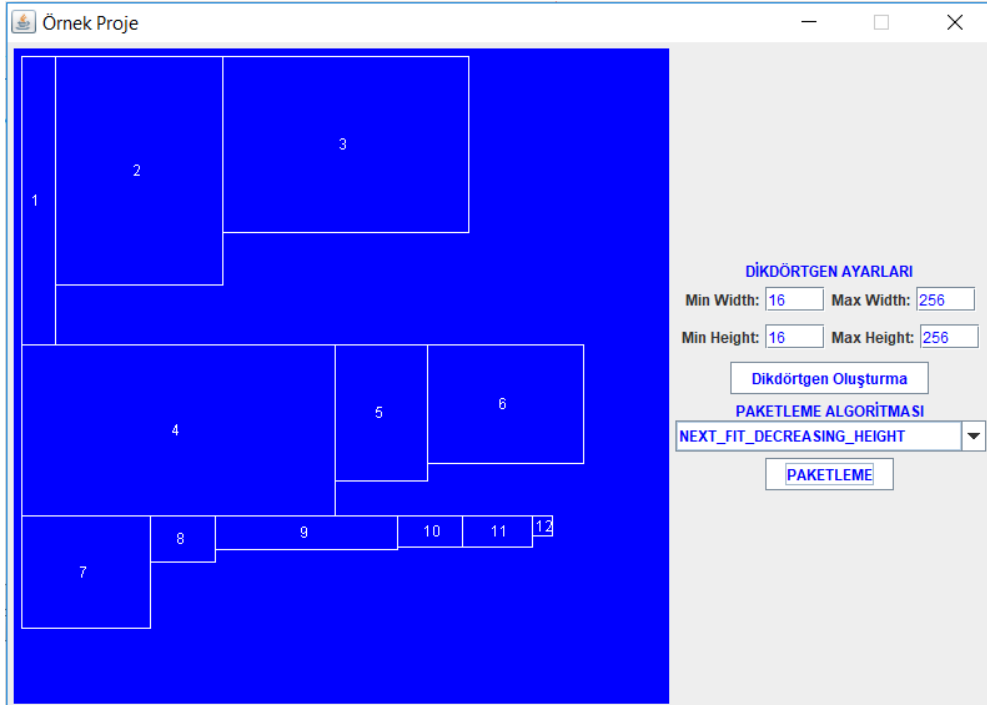
Next-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritmasında (NFDH), önce yerleştirilecek olan dikdörtgen parçalar/şekiller yüksekliklerine göre büyükten küçüğe doğru sıralı olarak ele alınırlar ve sırayla yerleştirilecek olan dikdörtgen yüzeye (alana) yerleştirme işlemi gerçekleştirilir. First-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritmasında (FFDH), NFDH algoritmasında olduğu gibi dikdörtgen parçalar/şekiller yüksekliklerine göre büyükten küçüğe doğru sıralı olarak ele alınırlar ve yerleştirme işlemi en fazla yüksekliğe sahip dikdörtgen ile başlar ve daha sonra yerleştirilecek her dikdörtgen yüksekliklerine göre uygun konumlara yerleştirilir. Son algoritma olan Best-Fit Decreasing Height Yerleştirme Algoritması (BFDH) ise, aynı diğer sezgisel yerleştirme algoritmalarında olduğu gibi yerleştirilecek olan dikdörtgenler yüksekliklerine göre azalan sırada sıralanır ve yerleştirme işlemi yine en fazla yüksekliğe sahip dikdörtgen parça ile başlar ve her seviyede boşluk kalmayacak şekilde dikdörtgen parçalar yerleştirilir.

Birinci uygulamada, yerleştirme yapılacak yüzeyin genişliği  $W = 600$  ve yüksekliği  $H = 600$ , yerleştirilecek  $n$  tane dikdörtgen parçanın her birinin genişliği  $w_i$  ve yüksekliği  $h_i$  olsun. Bu  $n$  tane dikdörtgen, yükseklik ve genişlikleri minimum 16 birim ve maksimum 256 birim olacak şekilde rasgele uzunluklara sahip şekillerden oluşmaktadır. Geliştirilen uygulamada yerleştirme işlemi sol-üst köşeden yerleştirilmeye başlanmaktadır. Bu yerleştirme işlemlerinde amacımız dikdörtgenler arasında herhangi bir örtüşme olmadan yerleşim işleminin gerçekleşmesidir. Yerleştirme işlemi için geliştirilen uygulamanın ara yüzü Şekil 5.1’deki gibidir.

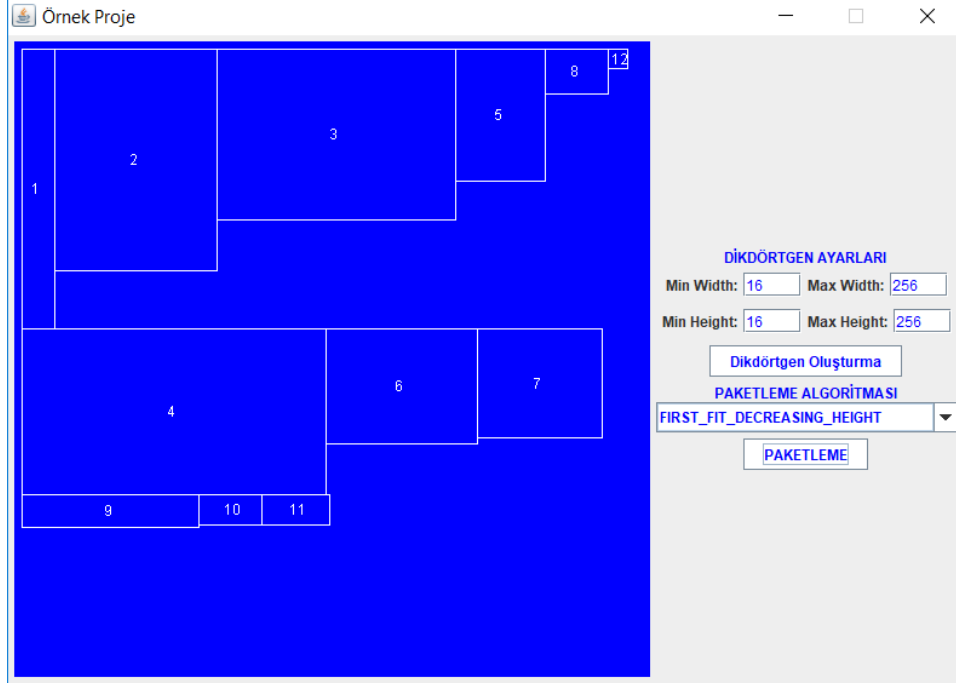


Şekil 5.1. Geliştirilen uygulama ara yüzü

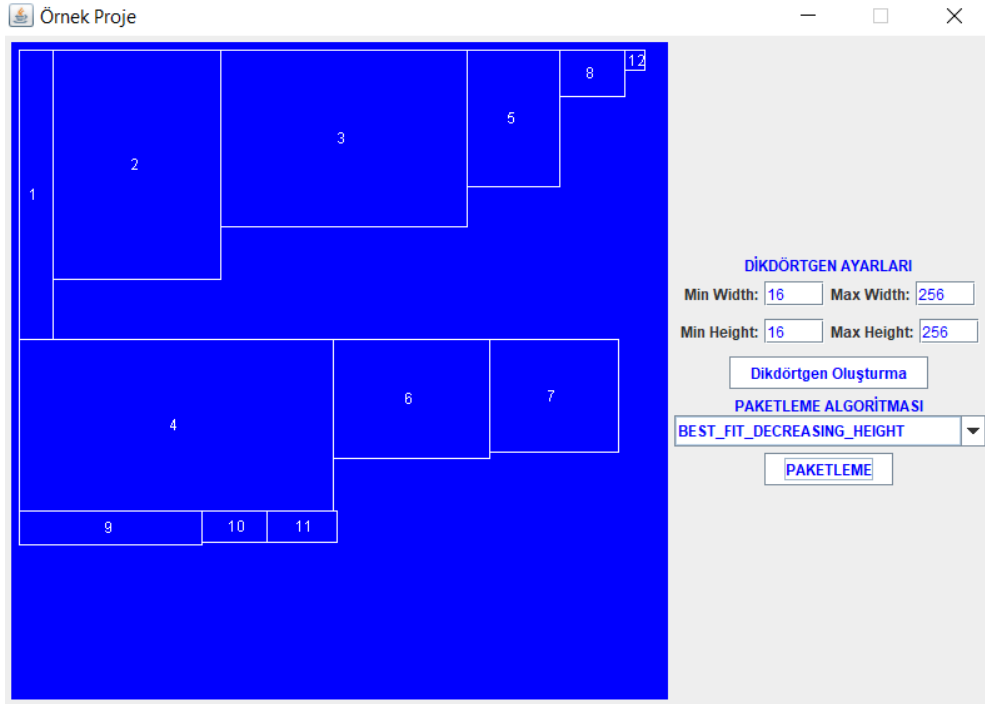
Geliştirilmiş uygulamada NFDH, FFDH ve BFDH sezgisel algoritmalarıyla yapılmış olan yerleşim işlemleri, sırasıyla Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. NFDH kullanılarak gerçekleştirilen yerleşim düzeni



Şekil 5.3. FFDH kullanılarak gerçekleştirilen yerleşim düzeni



Şekil 5.4. BFDH kullanılarak gerçekleştirilen yerleşim düzeni

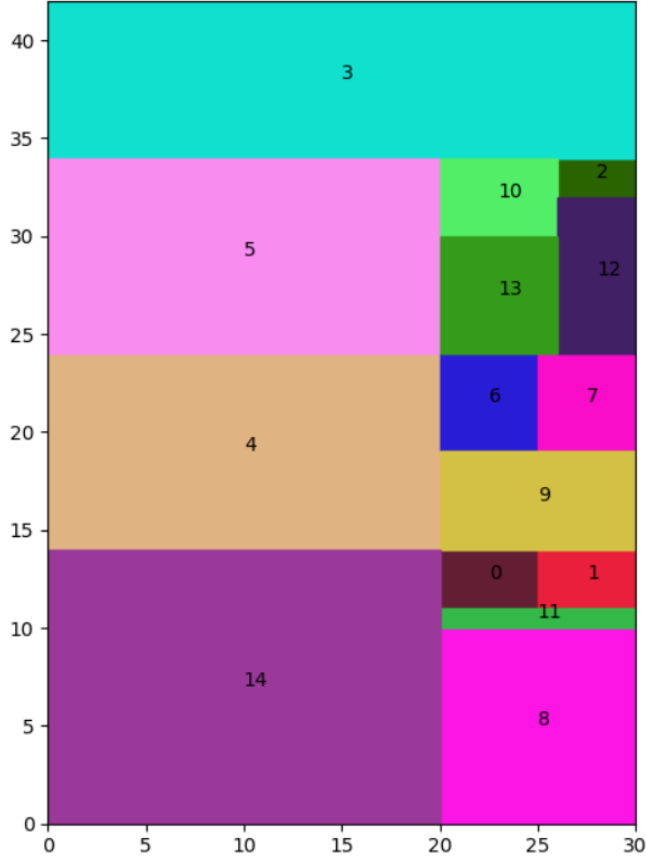
Genişlik ve yükseklikleri 16 ile 256 birim arasında farklı boyutlarda rasgele 12 tane dikdörtgen parçanın yerleşimi gösterilmiştir. Bu üç tane sezgisel algoritmadan FFDH ve BFDH ile gerçekleştirilen yerleşim düzeni aynı çıkmıştır. Şerit paketleme

probleminde amaç, şeridin uzunluğunu minimize etmektir. Bu üç sezgisel algoritma karşılaştırıldığında, FFDH ve BFDH yerleştirme algoritmaları NFDH yerleştirme algoritmasından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

İkinci uygulamada ise, yerleştirme yapılacak olan dikdörtgen alanımızın genişliği sabittir ve  $W = 30$  birimdir. Yükseklik ise, yerleştirilecek olan dikdörtgen parçalara göre değişkenlik göstermektedir. Yerleştirilecek olan  $n$  tane dikdörtgen parçanın yükseklikleri ( $h_i$ ) ve genişlikleri ( $w_i$ ) Çizelge 5.1'deki gibidir. Sezgisel yöntemler ile yerleştirme işlemi gerçekleştirildikten sonraki model Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Yerleştirilecek dikdörtgen parçaların genişlik ve yükseklikleri

Şekil No ( $i$ )	Genişlik ( $w_i$ )	Yükseklik ( $h_i$ )
0	5	3
1	5	3
2	4	2
3	30	8
4	20	10
5	20	10
6	5	5
7	5	5
8	10	10
9	10	5
10	6	4
11	10	1
12	4	8
13	6	6
14	20	14



Şekil 5.5. Düzenli şerit paketleme problemi çözüm örneği

## 5.2. Düzenli Kesme & Paketleme Problemleri için Çözüm Yaklaşımı 1

Bu bölümde, düzenli kesme ve paketleme problemlerinin çözümü için, Bölüm 3.6.2.1’de anlatılan düzenli şerit paketleme problemleri çözüm yöntemlerinden FFDH algoritması, Bölüm 3.2’de anlatılan uygun olmayan çokgen ve Bölüm 3.3’te anlatılan alt-sol yerleşim sezgisel yöntemleri birleştirilerek ele alınmış ve düzenli kesme & paketleme problemlerine bir çözüm sunulmuştur. Geliştirilen sezgisel uygulamada dikdörtgen parçaların yerleşimlerinin başlangıç noktası olarak sol-üst köşe alınmıştır. Bu bölümde FFDH algoritması, dikdörtgen parçaları/şekilleri alanlarına göre büyükten küçüğe doğru sıralı olarak ele alır ve yerleştirme işlemi en fazla alana sahip dikdörtgen ile başlar ve daha sonra yerleştirilecek her dikdörtgen alanlarına göre uygun konumlara yerleştirilir. Geliştirilmiş olan uygulamanın algoritma adımları şu şekildedir:

**Adım 1:** Genişliği  $W$  ve yüksekliği  $H$  olan dikdörtgen bir yüzeyi ve genişliği  $w_i$  ve yüksekliği  $h_i$   $i = \{1,2, \dots, n\}$  olan  $n$  tane yerleştirilecek olan dikdörtgeni belirle.

**Adım 2:** Yerleştirilecek olan dikdörtgenleri alanlarına göre büyükten küçüğe doğru sırala.

**Adım 3:** Yerleştirilecek olan dikdörtgenlerden alanı büyük olanı başlangıç olarak belirlenen sol-üst köşeye yerleştir.

**Adım 4:** Yerleştirme işlemi için kullanılacak boş yerleri belirle.

**Adım 5:** Boş yerlere yerleştirilecek olan dikdörtgenleri alanlarına göre azalan sırada yerleştir.

**Adım 6:**  $n$  tane dikdörtgen yerleştirildikten sonra Adım 7'ye git.

**Adım 7:** Bitir.

Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra verimlilik Denklem (5.1)'deki formülle hesaplanmaktadır.

$$Verimlilik = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i * h_i)}{W * H} * 100 \quad (5.1)$$

### **rnek 1:**

Yerleştirme Yapılacak Yüzeyin Boyutları (Genişlik x Yükseklik) = 40x45

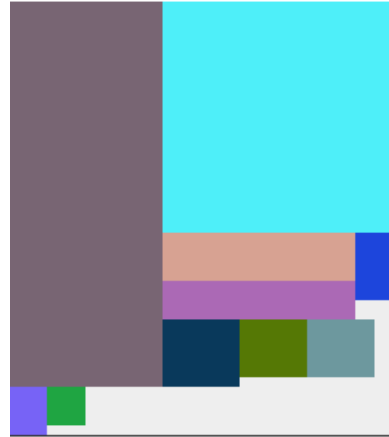
Yerleştirilecek Parça Sayısı: 10

Yerleştirilecek parçaların genişlik ve yükseklikleri izelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Örnek 1'e ait dikdörtgen parçaların boyutları

Parça No	Genişlik ( $w_i$ )	Yükseklik ( $h_i$ )
1	16	40
2	24	24
3	20	5
4	20	4
5	8	7
6	7	6
7	7	6
8	4	7
9	4	5
10	4	4

Verilen bu dikdörtgen parçalar ile oluşan yerleşim modeli Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Örnek 1'e ait yerleşim modeli

Örnek 1'e ait yerleşim düzeninde verimlilik %88,8'dir.

### Örnek 2:

Yerleştirme Yapılacak Yüzeyin Boyutları (Genişlik x Yükseklik) = 30x59

Yerleştirilecek Parça Sayısı: 20

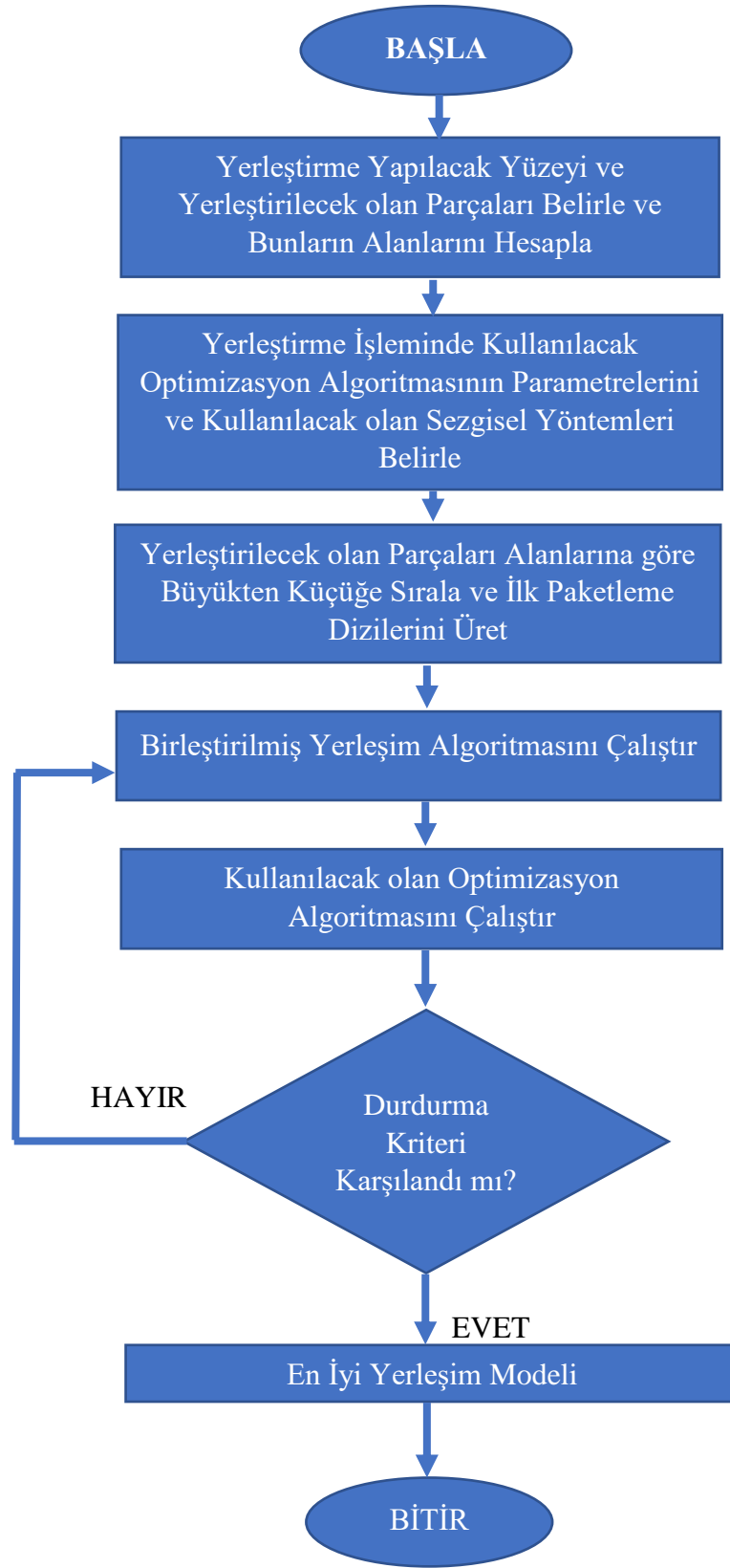
Yerleştirilecek parçaların genişlik ve yükseklikleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Örnek 2'e ait dikdörtgen parçaların boyutları

Parça No	Genişlik ( $w_i$ )	Yükseklik ( $h_i$ )
1	9	23
2	6	14
3	4	19
4	6	6
5	12	21
6	4	5
7	4	6
8	6	4
9	7	13
10	4	6
11	9	4
12	6	7
13	6	4
14	14	11
15	6	23
16	7	4
17	16	6
18	8	4
19	4	14
20	14	4

Verilen bu dikdörtgen parçalar ile oluşan yerleşim modeli Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

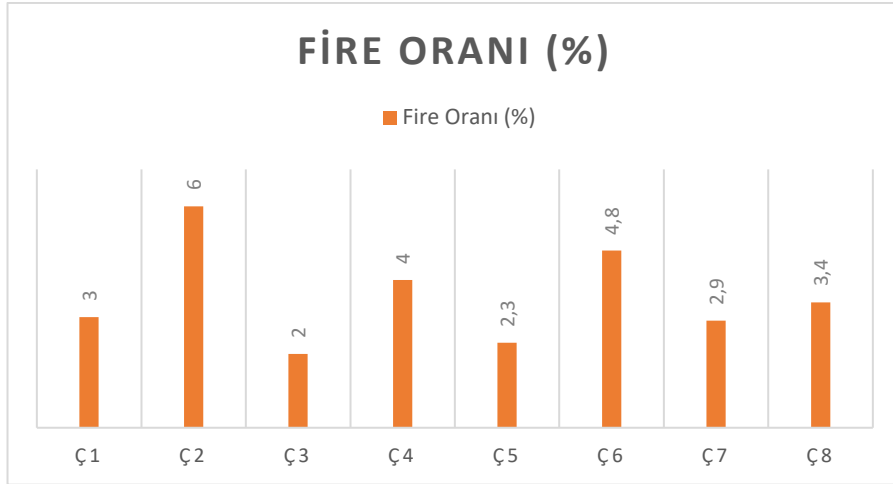




Şekil 5.8. Geliştirilen metasezgisel yerleşim yöntemlerine ait akış diyagramı

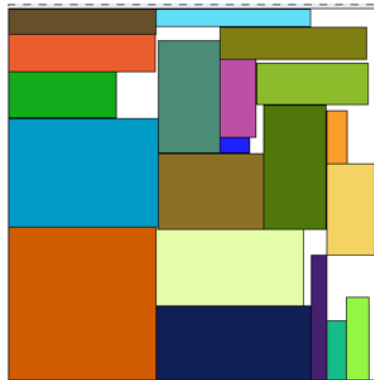


orandır. Şekil 5.10’de benzetimli tavlama algoritmasının farklı başlangıç sıcaklıkları sonucunda oluşan fire oranları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.10. Örnek 3’e ait fire oranları

Çizelge 5.4’de 20 adet dikdörtgen parçadan oluşan bir problemin yerleştirme simülasyonu sonucunda sekiz değişik başlangıç sıcaklığı değeri için elde edilen verimlilik ve fire oranı değerleri hesaplanmıştır. Verimliliğin en fazla fire oranının en düşük olduğu başlangıç sıcaklık değeri 0,3’tür. Şekil 5.11’de 0,3 başlangıç sıcaklığı kullanılarak elde edilen en fazla verimliliğe sahip Ç3 çalışmasının yerleşim düzeni gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Ç3 çalışmasının yerleşim düzeni

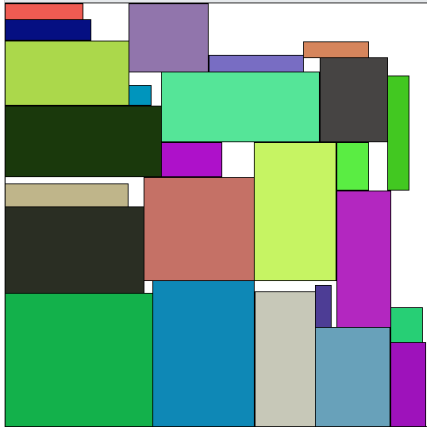
#### Örnek 4:

Düzenli şekillerden dikdörtgen şekillerin kesme ve paketleme problemlerinin çözümü için tabu arama algoritması kullanılarak yapılmış bir uygulamadır. Bu çalışmada, iki boyutlu dikdörtgen bir yüzey/alan üzerine yine iki boyutlu dikdörtgen şekillerin yerleştirilmesi ile ilgili bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulamada alt-sol yerleşim yöntemi, uygun olmayan çokgen yöntemi ve tabu arama algoritması birleştirilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak tabu arama algoritması kullanıldığında, problemin boyutunun (dikdörtgen sayısının) değişmesinin yerleşimdeki verimliliği nasıl etkilediği incelenmiştir. 5 farklı problem boyutu üzerinde çalışma yapılmış ve bu problemlerin yerleşimdeki verimlilik değerleri hesaplanmıştır.

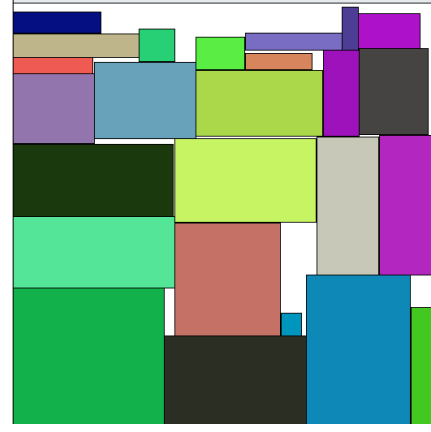
Çizelge 5.5. 5 farklı problem boyutu için yerleşimdeki verimlilik değerleri

<b>Problem Boyut Numarası</b>	<b>Problem Boyutu (Dikdörtgen Sayısı)</b>	<b>Verimlilik Değerleri</b>
P1	15	%92,8
P2	20	%95,8
P3	25	%97,2
P4	30	%96,5
P5	35	%97,0

Bu çalışmada 5 farklı problem boyutu için yerleşimdeki verimlilik değerleri hesaplanmıştır ve Çizelge 5.5'teki değerlere göre verimlilik değerleri dikdörtgen sayısı 25 olana kadar artmış, dikdörtgen sayısı 30 olduğunda azalmış ve dikdörtgen sayısı 35 olduğunda tekrardan verimlilik değeri artmıştır. En fazla verimlilik dikdörtgen sayısı 25 olduğunda elde edilmiştir. Yani dikdörtgen bir yüzeye/alana 25 dikdörtgen parça yerleştirildiğinde ve tabu arama algoritması uygulandığında en iyi ve en fazla verime sahip bir yerleşim düzeni elde edilmiştir. Aşağıda Şekil 5.12'de 25 dikdörtgenin ilk yerleşim düzeni ve Şekil 5.13'de ise alt-sol, uygun olmayan çokgen ve tabu arama algoritması uygulandıktan sonra elde edilen yerleşim düzenleri gösterilmiştir.

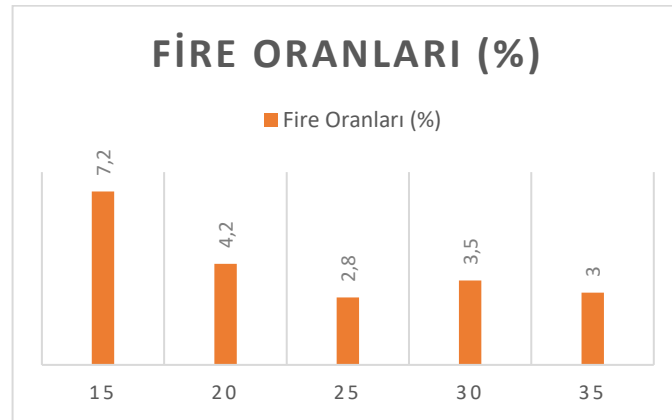


Şekil 5.12. P3 probleminin ilk yerleşim düzeni



Şekil 5.13. P3 probleminin optimize edilmiş yerleşim düzeni

Çizelge 5.5'te hesaplanan verimlilik değerlerine göre elde edilen fire oranları %2,8 ile %7,2 arasında değişmektedir. Şekil 5.14'de geliştirilen uygulamada parça sayısı ile fire oranlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu oranlar kesme ve paketleme problemlerinin çözümü için oldukça iyidir ve endüstriyel sektörde çoğu şirket için kabul edilebilir değerlerdir.



Şekil 5.14. Örnek 4'e ait fire oranları

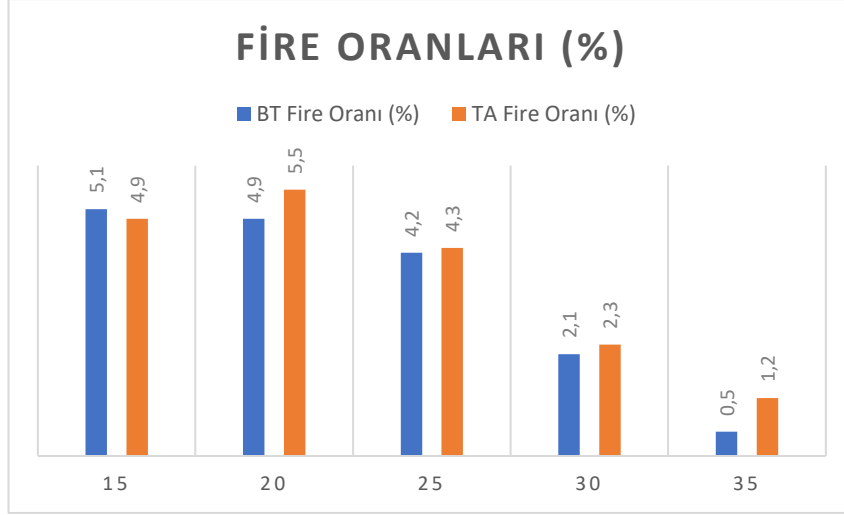
### Örnek 5:

Düzenli şekillerden dikdörtgen şekillerin kesme ve paketleme problemlerinin çözümü için tabu arama ve benzetimli tavlama algoritmaları kullanılarak bu optimizasyon algoritmalarından hangisinin daha iyi ve verimli bir yerleşim düzeni verdiğini araştırmak için yapılmış bir uygulamadır. 5 farklı problem boyutu (Dikdörtgen Sayısı) üzerinde çalışmalar yapılmıştır. 100 iterasyon sonucunda her iki optimizasyon algoritmasını için yerleşimdeki verimlilik değerlerine göre karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 5.6. Optimizasyon algoritmaların verimliliklerinin karşılaştırılması

Problem No	Dikdörtgen Sayısı	BT	TA
P1	15	%94,9	%95,1
P2	20	%95,1	%94,5
P3	25	%95,8	%95,7
P4	30	%97,9	%97,7
P5	35	%99,5	%98,8

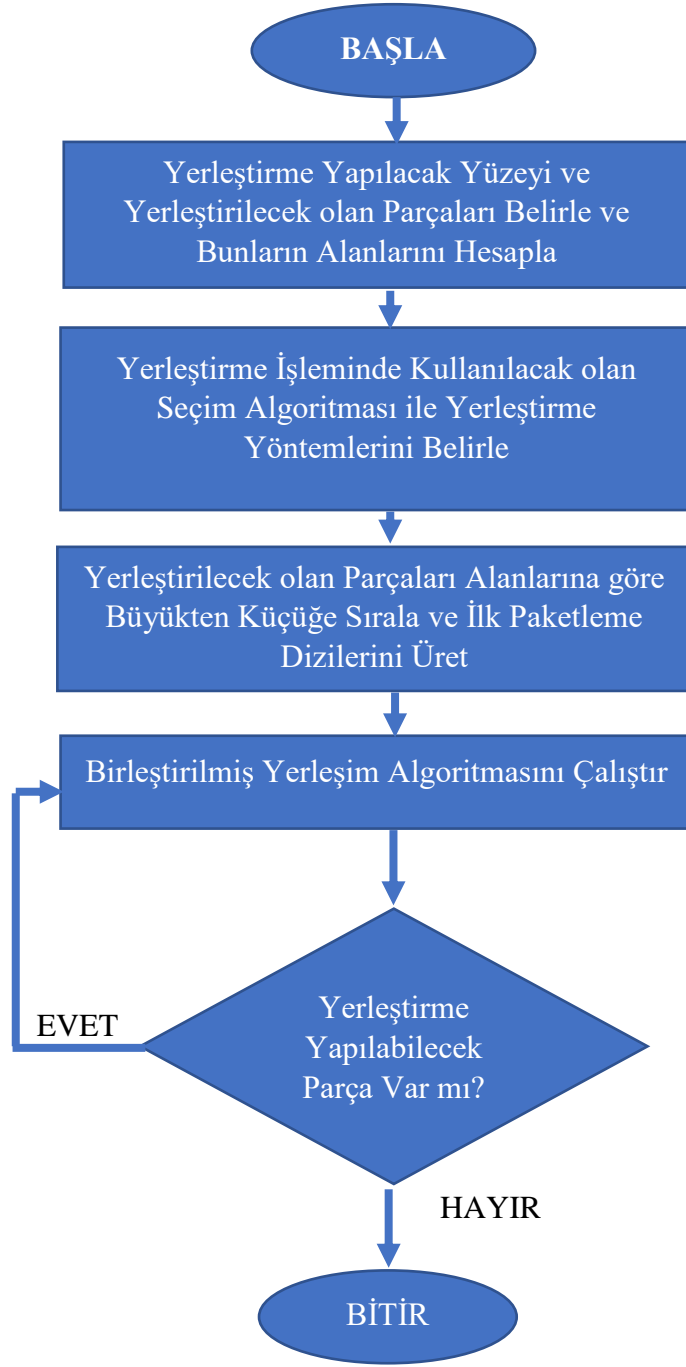
Verimlilik değerleri hesaplandıktan sonra elde edilen değerlere göre, her iki optimizasyon algoritmasının verimlilik değerleri birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ancak yerleştirilecek olan dikdörtgen sayısı arttıkça benzetimli tavlama algoritması tabu arama algoritmasından daha iyi ve verimli bir sonuç vermektedir. Yerleştirme işlemi gerçekleştirildikten sonra benzetimli tavlama optimizasyon algoritması çalıştığında, yerleştirme sonucunda oluşacak fire oranı tabu arama algoritmasından daha az olacaktır. Her iki optimizasyon algoritması çalıştıktan sonra oluşan fire oranları Şekil 5.15'te karşılaştırılmıştır. Benzetimli Tavlama algoritmasında fire oranları %0,5 ile %5,1 arasında değişirken, Tabu Arama algoritmasında fire oranları %1,2 ile %5,5 arasında değişmektedir. Bu fire oran değerleri oldukça iyi değerlerdir ve çoğu endüstrilerde bu değerler kabul edilebilir değerlerdir.



Şekil 5.15. Örnek 5'e ait fire oranları

#### 5.4. Düzensiz Kesme & Paketleme Problemleri için Çözüm Yaklaşımı

Bu bölümde, iki boyutlu düzensiz kesme ve paketleme problemlerinin çözümü için, Bölüm 3.6.2.1'de anlatılan düzenli şerit paketleme problemleri çözüm yöntemlerinden FFDH algoritması, Bölüm 3.2'de anlatılan uygun olmayan çokgen ve Bölüm 3.3'te anlatılan alt-sol yerleşim sezgisel yöntemleri birleştirilerek ele alınmış ve düzensiz kesme & paketleme problemlerine bir çözüm sunulmuştur. Seçim algoritması olarak kullanılan FFDH algoritması ile düzensiz şekilli parçalar alanlarına göre büyükten küçüğe doğru sıralanır. Parçaların birbiri ile çakışmasını önlemek için, uygun olmayan çokgen yöntemi kullanılır ve alt-sol yerleşim yöntemi ile başlangıç noktası sol alt köşeden başlayacak şekilde yerleştirme işlemi gerçekleştirilir. Geliştirilen uygulamanın akış diyagramı Şekil 5.16'te gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Önerilen yerleşim yöntemine ait akış diyagramı

Geliştirilen uygulamada, yerleştirme işleminde kullanılan alan 200x200 boyutundadır. Yerleştirilecek olan parçalar 3 ile 8 arasında kenar sayısına sahip düzensiz şekillerden (konveks ve konkav) oluşmaktadır. 4 farklı veri kümesi için Şekil 5.17’de gösterildiği gibi 12 tane örnek yerleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir veri kümesi için 3 tane yerleşim şekli bulunmaktadır. Veri kümelerinde yerleştirilecek olan parçaların x ve y koordinatları bulunmaktadır. Yerleşim işlemi bu koordinatlara göre yapılmaktadır.



## 6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, iki boyutlu düzenli ve düzensiz kesme & paketleme problemleri için çözüm yaklaşımları incelenmiştir. Sezgisel ve metasezgisel yöntemler kullanılarak çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda, alt-sol yerleşim, uygun olmayan çokgen, alt-sol dolgu, NFDH, FFDH ve BFDH sezgisel yöntemleri ile benzetimli tavlama ve tabu arama metasezgisel algoritmaları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, büyük bir dikdörtgen parça üzerine küçük düzenli veya düzensiz parçaların örtüşme olmadan en iyi yerleşimini bulmak, oluşabilecek maliyeti minimum yapmak ve metasezgisel algoritmaların kullanılmasıyla, daha hızlı ve daha verimli paketleme işlemlerinin gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Yani, kullanılan malzemeden en iyi verim alınacak şekilde bir planlama yapılmıştır. En iyi verim ise, malzemeden minimum fire (atık) verilecek şekilde kesim işleminin gerçekleşmesiyle mümkündür.

Geliştirilen uygulamalarda, birden fazla sezgisel yöntemi veya sezgisel yöntemler ile metasezgisel yöntemleri birleştiren bir hibrid metodoloji tanımlanmıştır. Birinci bölümde, seçim algoritması olarak NFDH, FFDH ve BFDH algoritmaları, yerleşim algoritması olarak alt-sol yerleşimi ve yerleştirilecek olan şekillerin üst üste gelme durumunu önlemek için uygun olmayan çokgen yöntemi birleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi yapılırken, parçalar yüksekliklerine göre büyükten küçüğe doğru sıralanır ve yerleştirme algoritması ile sol-üst köşeden başlayacak şekilde yerleştirme işlemi gerçekleştirilir. İkinci bölümde, seçim algoritması olarak FFDH algoritması, alt-sol yerleşim algoritması ve uygun olmayan çokgen yöntemi birleştirilmiştir. Yerleşim işlemi yapılırken, yerleştirilecek olan parçalar alanlarına göre büyükten küçüğe doğru sıralanır ve en büyük alana sahip parça ile başlanılacak şekilde sol-üst köşeden yerleştirme işlemi gerçekleştirilir. Üçüncü bölümde, seçim algoritması olarak metasezgisel algoritmalarından benzetimli tavlama algoritması ile tabu arama algoritması ve alt-sol yerleşim ve uygun olmayan çokgen sezgisel algoritmaları birleştirilerek bir yerleşim modeli elde edilmiştir. Bu bölümde yapılmış olan uygulamaların birincisinde, benzetimli tavlama algoritmasının farklı başlangıç sıcaklık değerleri için yerleştirme modelinde elde edilecek olan verim ve oluşacak fire değerleri hesaplanmıştır. İkincisinde, farklı problem boyutlarında tabu arama algoritması kullanılarak yerleşim modelinde meydana gelen değişim, elde edilen

verim ve oluşacak olan fire değerleri hesaplanmıştır. Üçüncüsünde ise, farklı problem boyutuna sahip problemler için benzetimli tavlama ve tabu arama optimizasyon algoritmalarından elde edilen verimlilik ile fire değerleri karşılaştırılmış ve problem boyutu arttıkça benzetimli tavlama algoritmasının tabu arama algoritmasından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Dördüncü bölümde ise, düzenli dikdörtgen bir yüzey üzerine düzensiz şekillerin yerleştirilmesiyle bir yerleşim modeli elde edilmiştir. Bu bölümde, seçim algoritması olarak FFDH sezgisel algoritması, alt-sol yerleşim algoritması ve düzensiz şekillerin çakışmasını önlemek için uygun olmayan çokgen yöntemleri birleştirilmiştir. Yerleştirilecek olan düzensiz parçalar alanlarına göre büyükten küçüğe sıralanır ve sol alt köşeden başlayacak şekilde yerleştirme işlemi gerçekleştirilir.

Düzensiz kesme & paketleme problemleri, düzenli kesme & paketleme problemlerine göre daha karmaşık problemlerdir. Çünkü, bu tür problemlerin geometrisi düzensiz şekillerden oluşmaktadır ve daha fazla hesaplama yükü gerektirmektedir. Bu problemler, deri ve tekstil endüstrilerinde oldukça sık kullanılmaktadır. Bundan ötürü, (i) düzenli bir yüzey üzerine düzensiz parçaların yerleştirme işlemleri ile ilgili daha fazla çalışma yapılması ve (ii) düzensiz şekle sahip bir yüzey üzerine düzensiz şekillerin yerleştirilmesi ile ilgili çalışmalar ileride yapılması planlanmaktadır.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] B. A. Junior, P. R. Pinheiro, and R. D. Saraiva, *A hybrid methodology for nesting irregular shapes: Case study on a textile industry ?*, **IFAC Proc. Vol.**, 6:1 (2013) 15–20.
- [2] E. Hopper and B. C. H. Turton, *A review of the application of meta-heuristic algorithms to 2D regular and irregular strip packing problems* *A Review of the Application of Meta-Heuristic Algorithms to 2D Strip Packing Problems*, **Artificial Intelligence Review**, (2001) 257–300.
- [3] M. Chen and W. Huang, *A two-level search algorithm for 2D rectangular packing problem*, **Computers and Industrial Engineering**, 53:1 (2007) 123–136.
- [4] A. Soke and Z. Bingul, *Hybrid genetic algorithm and simulated annealing for two-dimensional non-guillotine rectangular packing problems*, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 19:5 (2006) 557–567.
- [5] E. Lo Valvo, *Meta-heuristic Algorithms for Nesting Problem of Rectangular Pieces*, **Procedia Engineering**, 183 (2017) 291–296.
- [6] K. A. Dowsland, S. Vaid, and W. B. Dowsland, *An algorithm for polygon placement using a bottom-left strategy*, **European Journal of Operational Research**, 141:2 (2002) 371–381.
- [7] A. M. Gomes and J. F. Oliveira, *Solving Irregular Strip Packing problems by hybridising simulated annealing and linear programming*, **European Journal of Operational Research**, 171:3 (2006) 811–829.
- [8] E. Hopper and B. Turton, *Application of genetic algorithms to packing problems—a review*, **Soft Computing in Engineering Design and ...**, (1997) 279–288.
- [9] H. Dyckhoff, *A typology of cutting and packing problems*, **European Journal of Operational Research**, 44:2 (1990) 145–159.

- [10] S. C. H. Leung, Y. Lin, and D. Zhang, *Extended local search algorithm based on nonlinear programming for two-dimensional irregular strip packing problem*, **Computers and Operations Research**, 39:3 (2012) 678–686.
- [11] M. B. Aryanezhad, N. Fakhim Hashemi, A. Makui, and H. Javanshir, *A simple approach to the two-dimensional guillotine cutting stock problem*, **Jornal of Industrial Engineering International**, 8:1 (2012) 1–10.
- [12] S. Nozarian, M. V. Jahan, and M. Jalali, *An Imperialist Competitive Algorithm for 1-D Cutting Stock Problem*, **International Journal of Information Science**, 3:2 (2013) 25–36.
- [13] A. Crispin, P. Clay, G. Taylor, T. Bayes, and D. Reedman, *Genetic algorithm coding methods for leather nesting*, **Applied Intelligence**, 23:1 (2005) 9–20.
- [14] W. Huang, T. Ye, and D. Chen, *Bottom-Left Placement Theorem for Rectangle Packing*, **Science and Technology**, (2011) 1–10.
- [15] J. F. Oliveira, A. Neuenfeldt Júnior, E. Silva, and M. A. Carravilla, *a Survey on Heuristics for the Two-Dimensional Rectangular Strip Packing Problem*, **Pesquisa Operacional**, 36:2 (2016) 197–226.
- [16] J. Peralta, M. Andretta, and J. F. Oliveira, *Solving Irregular Strip Packing Problems With Free Rotations Using Separation Lines*, (2017) 1–18.
- [17] E. Burke, R. Hellier, G. Kendall, and G. Whitwell, *A New Bottom-Left-Fill Heuristic Algorithm for the Two-Dimensional Irregular Packing Problem*, **Operations Research**, 54:3 (2006) 587–601.
- [18] A. Bortfeldt, *Discrete Optimization A genetic algorithm for the two-dimensional strip packing problem with rectangular pieces*, **European Journal of Operational Research**, 172 (2006) 814–837.
- [19] A. F. Mahmoud, M. Samia, S. Eid, and A. Bahnasawi, *Genetic algorithms for solving 2D cutting stock problem*, 2003 46th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Cairo, Egypt, Dec. 27-30, (2003), pp. 956-960.
- [20] E. López-Camacho, G. Ochoa, H. Terashima-Marín, and E. K. Burke, *An effective heuristic for the two-dimensional irregular bin packing problem*, **Annals of Operations Research**, 206:1 (2013) 241–264.

- [21] E. K. Burke, R. S. R. Hellier, G. Kendall, and G. Whitwell, *Complete and robust no-fit polygon generation for the irregular stock cutting problem*, **European Journal of Operational Research**, 179:1 (2007) 27–49.
- [22] F. Glover, *Tabu Search—Part II*, **ORSA Journal on Computing**, 2:1 (1990) 4–32.
- [23] H. Pirim, E. Bayraktar, and B. Eksioğlu, *Tabu Search : A Comparative Study, ILocal Search Techniques: Focus on Tabu Search*, Wassim JAZIRI, October (2008) 1–29.
- [24] B. Kröger, *Guillotineable bin packing: A genetic approach*, **European Journal of Operational Research**, 84:3 (1995) 645–661.
- [25] D. Liu and H. Teng, *An improved BL-algorithm for genetic algorithm of the orthogonal packing of rectangles*, **European Journal of Operational Research**, 112:2 (1999) 413–420.
- [26] J. Heistermann and T. Lengauer, *The nesting problem in the leather manufacturing industry*, **Annals of Operations Research**, 57:1 (1995) 147–173.
- [27] G. Wäscher, H. Haußner, and H. Schumann, *An improved typology of cutting and packing problems*, **European Journal of Operational Research**, 183:3 (2007) 1109–1130.
- [28] Alev Söke, *Genetik Algoritma ve Benzetilmiş Tavlama ile İki Boyutlu Giyotinsiz Kesme Problemlerine Olasılıksal Yaklaşım*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Türkiye, 2003.
- [29] Kadriye Ergün, *Kesme ve Paketleme Problemleri ve Araştırmaya Yönelik Bir Metot Geliştirilmesi ve Bu Metodun Etkinliğinin Sınanması*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Türkiye, 2004.
- [30] Emrah Albayrak, *İki Boyutlu Dikdörtgen Şekilli Stok Kesme Problemleri için Sezgisel-Metasezgisel Algoritma ve Yazılım Geliştirme*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Türkiye, 2013.

- [31] Glenn Whitwell, *Novel Heuristic and Metaheuristic Approaches to Cutting and Packing*, Thesis Submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy England, 2004.
- [32] V. Mancapa, T. I. Van Niekerk and T. Hua, *A Genetic Algorithm for two dimensional strip packing problems*, **South African Journal of Industrial Engineering**, 20:2 (2009) 145-162.
- [33] R.Alvarez-Valdes, F.Parreno, J.M.Tamarit, *A Tabu Search Algorithm for Two-Dimensional Non-Guillotine Cutting problems*, **European Journal of Operational Research**, 183:3 (2007) 1167-1182.
- [34] Kenan Yavuz, *Deri Ürünlerinin Kesiminde Verimlilik Araştırması ve Yüksek Başarılı Hesaplama Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Türkiye, 2010.
- [35] Anonymous (2018), <https://workshopped.com/2012/06/cutting-stock/>, (Son Erişim Tarihi: 9 Haziran 2018)
- [36] B. K. Nielsen, M.Brazil, *Nesting Problems and Steiner Tree Problems*, Copenhagen, Denmark, 2007, 1-29.
- [37] T.Imamichi, M.Yagiura, and H.Nagamochi, *An iterated local search algorithm based on nonlinear programming for the irregular strip packing problem*, **Discrete Optimization**, 6:4 (2009) 345–361.
- [38] Graham Kendall, *Applying Meta-Heuristic Algorithms to the Nesting Problem Utilising the No Fit Polygon*, A thesis submitted to the University of Nottingham for the Degree of Doctor of Philosophy England, 2000.
- [39] Luiz Henrique Cherri, *Nesting Problems*, Ph.D. Thesis, Universidade do Porto Portugal, 2016.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Hüseyin FIRAT  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** BATMAN-09.11.1990  
**Adres:** Mezopotamya mahallesi peyas caddesi özfirat 2 sitesi C/blok No:24 DİYARBAKIR/KAYAPINAR  
**E-Posta:** [huseyinfirat21@hotmail.com](mailto:huseyinfirat21@hotmail.com)  
**Lisans:** Çukurova Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü (2009-2014)

### Ödüller:

Çukurova Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
2010- 2011 Bahar Dönemi: **YÜKSEK ONUR BELGESİ**  
2011- 2012 Güz Dönemi: **YÜKSEK ONUR BELGESİ**  
2011– 2012 Bahar Dönemi: **ONUR BELGESİ**

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR