

T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİR HALI ÜRETİM İŞLETMESİNDE DOKUMA TEZGAHLARININ İKİ
BOYUTLU ŞERİT PAKETLEME PROBLEMİ KISITLARI KULLANILARAK
ÇİZELGELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

HAZIRLAYAN
SONER ASLAN

DANIŞMAN
DOÇ. DR. OĞUZHAN AHMET ARIK

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2024
KAYSERİ

T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİR HALI ÜRETİM İŞLETMESİNDE DOKUMA TEZGAHLARININ İKİ
BOYUTLU ŞERİT PAKETLEME PROBLEMİ KISITLARI KULLANILARAK
ÇİZELGELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

HAZIRLAYAN
SONER ASLAN

DANIŞMAN
DOÇ. DR. OĞUZHAN AHMET ARIK

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Soner ASLAN

İmza



YÖNERGEYE UYGUNLUK ONAYI

Bir Halı Üretim İşletmesinde Dokuma Tezgahlarının İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi Kısıtları Kullanılarak Çizelgelenmesi adlı Yüksek Lisans tezi, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Soner ASLAN

İmza

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Oğuzhan Ahmet ARIK

İmza

KABUL VE ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Oğuzhan Ahmet ARIK danışmanlığında Soner ASLAN tarafından hazırlanan “**Bir Halı Üretim İşletmesinde Dokuma Tezgahlarının İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi Kısıtları Kullanılarak Çizelgelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında **yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

..... /..... /

.....

(Tez savunma sınav tarihi yazılacaktır.)

JÜRİ:

Danışman :.....

Üye :.....

Üye :.....

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../...../.....

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını gerçekleştirmemde koşullar ne olursa olsun yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, yoğun süreçler geçirmem ve kendisinin de zorlu süreçleri olmasına rağmen pes etmeyip, motivasyonumuzu koruyan, Doç. Dr. Oğuzhan Ahmet ARIK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Eğitim hayatım süreci boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen, başta abim Fatih ASLAN, babam Ali ASLAN, annem Muazzez ASLAN, üniversitedeki diğer hocalarıma, işyeri yöneticim Erkan ŞEKERCİ, iş arkadaşım Emre KARAKAYA ve yanımda olan arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Soner ASLAN
Kayseri, Haziran 2024

İmza

BİR HALI ÜRETİM İŞLETMESİNDE DOKUMA TEZGAHLARININ İKİ BOYUTLU ŞERİT PAKETLEME PROBLEMİ KISITLARI KULLANILARAK ÇİZELGELENMESİ

Soner ASLAN

**Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Yüksek Lisans Tezi, Eylül 2020

Danışman: Doç. Dr. Oğuzhan Ahmet ARIK

ÖZET

Bu çalışmada, bir halı üretim işletmesinde kısa vadeli üretim planının çizelgelenmesi üzerine yapılmıştır. Çalışmanın amacı, halı dokuma tezgahlarına atanan birbirinden farklı kısıtlamalara ve sürelerle sahip işlerin çizelgelenmesi yapılarak hazırlık sürelerinin azaltılması, kaynakların doğru kullanımı ve verimliliğin artırılmasıdır. Halı üretiminde kullanılan iplik, halının ilmek sıklığı, hav yüksekliği gibi özelliklerin değişiminin kalite kavramını ifade ettiği ve bu kalitelerin her tezgahta aynı koşullarda üretiminin sağlanamadığı belirtilmiştir. Bu nedenle, farklı kalitelerden gelen siparişlerin en doğru biçimde sıralanması önemlidir. Çalışmada, halı üretim işletmelerinde kısa vadeli üretim planlarının çizelgelenmesi için yeni bir matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller, halı dokuma tezgahlarına atanan işlerin kısıtlamalarını ve sürelerini dikkate alarak, hazırlık sürelerini azaltacak ve kaynakları doğru bir şekilde kullanacak bir çizelge üretmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın bulguları, geliştirilen yöntemin halı üretim işletmelerinde kısa vadeli üretim planlarının çizelgelenmesi için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çizelgeleme, halı üretim, üretim planlama, iki boyutlu Atama, iki boyutlu şerit paketleme, paralel makine, tekstil.

SCHEDULING OF WEAVING LOOMS IN A CARPET PRODUCTION FACTORY USING TWO DIMENSIONAL STRIP PACKAGING CONSTRAINTS

Soner ASLAN

**Nuh Naci Yazgan University, Graduate School of
Sciences**

Master of Science (M.Sc.) Thesis, Industrial Engineering Department, June 2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Oğuzhan Ahmet ARIK

ABSTRACT

This study was conducted on scheduling the short-term production plan in a carpet production enterprise. The aim of the study is to reduce preparation times, use resources correctly and increase efficiency by scheduling jobs with different restrictions and durations assigned to carpet weaving looms. It has been stated that the change in characteristics such as the yarn used in carpet production, the stitch density of the carpet, and the pile height express the concept of quality, and that these qualities cannot be produced under the same conditions on every loom. Therefore, it is important to sort orders of different qualities in the most accurate way. In the study, a new mathematical model was developed for scheduling short-term production plans in carpet production enterprises. The developed models aim to produce a schedule that will reduce preparation times and use resources correctly, taking into account the constraints and durations of jobs assigned to carpet looms. The findings of the study show that the developed method is an effective method for scheduling short-term production plans in carpet production enterprises.

Keywords: Scheduling, carpet production, production planning, two-dimensional strip packaging, parallel machine, textile.

İÇİNDEKİLER

BİR HALI ÜRETİM İŞLETMESİNDE DOKUMA TEZGAHLARININ İKİ BOYUTLU ŞERİT PAKETLEME PROBLEMİ KISITLARI KULLANILARAK ÇİZELGELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	iii
YÖNERGEYE UYGUNLUK ONAYI.....	iv
KABUL VE ONAY SAYFASI.....	v
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xii

1. BÖLÜM: GİRİŞ

1.1. Giriş ve Motivasyon.....	1
-------------------------------	---

2. BÖLÜM: LİTERATÜR ANALİZİ

2.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar ve Özet Tablo.....	4
--	---

3. BÖLÜM: PARALEL MAKİNE ÇİZELGELEME

3.1. Paralel Makine Çizelgeleme Problemi Tanımı.....	12
3.2. Paralel Makine Problemleri Sınıflandırmaları.....	13

4. BÖLÜM: İKİ BOYUTLU ATAMA KISITLARINA SAHİP

MATEMATİKSEL MODELLER

4.1. İki Boyutlu Atama Kısıtlarına Sahip Problemler.....	16
4.2. İki Boyutlu Sırt Çantası Problemi.....	18
4.3. İki Boyutlu Kutulama Problemi.....	20
4.4. İki Boyutlu Stok Kesim Problemi.....	21
4.5. İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi.....	23

5. BÖLÜM: PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODELLER	
5.1.	Paralel Makine Çizelgeleme Problemi.....39
5.2.	Şerit Paketleme Problemi.....41
6. ÇÖZÜM YAKLAŞIM ÖNERİLERİ	
6.1.	Tek Aşamalı Çözüm Yöntemi ve Matematiksel Model.....45
6.2.	İki Aşamalı Çözüm Yöntemi ve Matematiksel Model.....49
7. DENEY	
7.1.	Deney Senaryoları Oluşturma.....54
7.2.	Deney Senaryoları Bilgileri.....54
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	
8.1.	Sonuçların Değerlendirmesi ve Tartışma.....70
REFERANSLAR.....72	
ÖZGEÇMİŞ.....78	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Çizelgeleme problemleri sınıflandırması (Arık, [37]).....	12
Şekil 4.1. İki boyutlu kısıtlamalara sahip problemler	18
Şekil 4.2. İki boyutlu kutulama problemi	20
Şekil 4.3. Giyotinsiz kesim (a), giyotinli kesim (b) (Lodi vd. [[45]).....	22
Şekil 4.4. Ögeler (a), optimal iki boyutlu şerit paketleme (b), optimal iki boyutlu kutulama problemi (c), optimal iki boyutlu sırt çantası problemi (d) (Iori vd. [47])	24
Şekil 4.5. İki boyutlu şerit paketleme gösterimi (Neuenfeldt vd. [48])	24
Şekil 5.1. Halının yapısı.....	27
Şekil 5.2. Halı dokuma tezgâhı teknik görünüm	28
Şekil 5.3. Halı dokuma tezgâhı genel görünüm.....	28
Şekil 5.4. Yüz yüze dokuma tekniği	29
Şekil 5.5. Halının ikizi ile birlikte üretilmesi.....	30
Şekil 5.6. Halı üretim süreci	31
Şekil 5.7. Halı en ve boy gösterimi.....	32
Şekil 5.8. Üretim firesi.....	33
Şekil 5.9. Fireli halı üretimi yapılmış halı şeridi	34
Şekil 5.10. Fireli üretim yapılmış halı şeridi 2	34
Şekil 5.11. Fireli üretim yapılmış halı şeridi 3.....	35
Şekil 5.12. Boşluk doldurma yapılan fire kısım	35
Şekil 5.13. Firesiz yerleştirme yapılmış halı şeridi.....	36
Şekil 5.14. Firesiz yerleştirme yapılmış halı şeridi 2.....	36
Şekil 5.15. Firesiz yerleştirme yapılmış halı şeridi 3.....	37
Şekil 5.16. Dokuma tezgahında ipliklerin konumu	38
Şekil 5.17. Şerit Paketleme Problemi Sınıflandırması (Oliveira vd. [51])	42
Şekil 6.1. Bir müşteri siparişinin karşılanma adımları.....	44

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Literatür taraması özet tablo	9
Tablo 3.1: Çizelgeleme ortamı notasyonları	13
Tablo 3.2: Çizelgeleme işlem karakteristiği notasyonları	13
Tablo 3.3: Çizelgeleme amaç fonksiyonu notasyonları	14
Tablo 7.1: Oluşturulan problem senaryoları	54
Tablo 7.2: Problem#1 sipariş bilgileri.....	55
Tablo 7.3: Problem#1 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi	56
Tablo 7.4: Problem#1 tezgâh en uzunlukları	56
Tablo 7.5: Problem#2 sipariş bilgileri.....	57
Tablo 7.6: Problem#2 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi	57
Tablo 7.7: Problem#2 tezgâh en uzunlukları	57
Tablo 7.8: Problem#3 sipariş bilgileri.....	58
Tablo 7.9: Problem#3 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi	58
Tablo 7.10: Problem#3 tezgâh en uzunlukları	59
Tablo 7.11: Problem#4 sipariş bilgileri.....	59
Tablo 7.12: Problem#4 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi	60
Tablo 7.13: Problem#4 tezgâh en uzunlukları	61
Tablo 7.14: Problem#5 sipariş bilgileri.....	61
Tablo 7.15: Problem#5 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi	65
Tablo 7.16: Problem#5 tezgâh en uzunlukları	66
Tablo 7.17. Deney senaryoları çözüm karşılaştırmaları.....	69

1. BÖLÜM: GİRİŞ

1.1.Giriş ve Motivasyon

Teknolojideki hızlı değişimler ve pazardaki rekabet koşulları nedeniyle günümüz rekabet ortamı, işletmeler için giderek daha karmaşık ve zorlayıcı hale gelmektedir. Bu rekabetçi atmosferde işletmelerin sürdürülebilirliğini ve pazardaki konumlarını koruyabilmeleri için üretim planlarının titizlikle yapılması büyük önem taşımaktadır. Üretim planlaması, ürünlerin müşterilere istenilen veya en uygun zamanda ulaşmasını sağlamak, müşteri memnuniyetini en üst düzeye çıkarmak ve rekabet avantajı elde etmek amacıyla gerekli olan hammadde, kapasite, zaman ve makine ihtiyaçlarını belirlemektedir. Bu bağlamda, sınırlı kaynakların verimli ve etkin bir şekilde kullanılması zorunludur.

Üretim planlamasının doğru ve verimli bir şekilde yapılabilmesi için çizelgeleme yönteminin kullanılması esas konulardan biridir. Çizelgeleme, belirli bir zaman dilimi içinde faaliyetlere sınırlı kaynak tahsis etmek için bir karar verme sürecinin bütünüdür. Bu süreç, önceden tanımlanmış işleri kaynaklara, zaman aralıklarına, süreç kısıtlamalarına ve hedeflere dayalı olarak en uygun şekilde atamayı amaçlar. Çizelgeleme metodolojisi, üretim süreçlerinin genel verimliliğini artırmada kritik bir rol oynar.

Bu çalışmada, bir halı üretim işletmesinde kısa vadeli üretim planlaması üzerinde durulmaktadır. Halı dokuma tezgahlarına atanan farklı kısıtlama ve sürelerle sahip işlerin planlanması, hazırlık sürelerinin kısaltılması, kaynakların doğru kullanılması ve verimliliğin artırılması hedeflenmektedir. Halı üretiminde kullanılan iplik türü, halının ilmek sıklığı, hav yüksekliği gibi özellikler kalite kavramını ifade eder. Bu değişen kalite özellikleri, farklı nitelikler ortaya koyar ve her makinede her kalite üretilemez.

İşletmede farklı kalitelerden gelen siparişlerin 16 tezgâha en uygun şekilde sıralanması, hazırlık sürelerinin en aza indirilmesi, yüksek maliyet oluşturan hazırlık sürelerinin azaltılması, hammaddelerin zamanında tedarik edilmesinin sağlanması, doğru kapasite planlamasının yapılması, fire miktarının azaltılması ve müşterilere hızlı geri

dönüşler sağlanabilmesi öngörülmektedir. Bu çalışmada, birden fazla işin bir arada işlenebildiği yığın üretim yapan paralel makinelerin çizelgelemesi konusu ele alınmaktadır. Yığın olarak üretilen işlerin makine kapasitelerini göz önüne alarak, atamaların en verimli şekilde gerçekleştirilebilmesi için iki boyutlu şerit paketleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde makine kapasiteleri dikdörtgen bir alanı temsil eder ve iş atamaları en uygun şekilde yapılır.

Yapılan çalışmada makinelerin hazır olma durumları ve hazırlık süreleri dikkate alınarak işlerin makinelere ataması ve halı yerleşimlerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilecek sonuçlarla işletmenin planlama departmanı tarafından sezgisel olarak yapılan mevcut üretim planı iyileştirilecek ve müşterilere en hızlı geri dönüş sağlanacaktır. Süreci etkileyen en büyük maliyet kalemleri arasında yer alan hazırlık sürelerinin iyileştirilmesi ve firelerin azaltılması sağlanacaktır. Bu sonuçlar doğrultusunda işletme, sektöründeki rakiplerine göre avantajlı hale gelecektir.

Literatürde, yığın çizelgeleme genellikle tek makine problemleri için yapılan çalışmalardan oluşmaktadır. Yığın işlerin paralel makineler üzerinde yapılan çalışmaların sayısı sınırlıdır. Aynı zamanda, paralel makine çizelgelemesinde iki boyutlu şerit paketleme kısıtlamaları kullanılarak yapılan çalışmalar da oldukça sınırlıdır. Halı üretiminde dokuma tezgahlarının planlanmasına ilişkin mevcut bir çalışma bulunmamaktadır ve bu nedenle bu çalışmanın literatüre katkı sağlaması beklenmektedir. Bu bağlamda, çalışmanın ortaya koyduğu yöntemler ve elde edilecek bulgular hem akademik literatüre yeni bir bakış açısı sunacak hem de pratik uygulamalar için değerli sonuçlar doğuracaktır. Üretim işletmeleri, bu yöntemleri uygulayarak müşteri memnuniyetini artırabilecek, üretim süreçlerinde daha etkin ve verimli planlama yapabilecek, maliyetlerini düşürebilecek ve sektördeki rekabet güçlerini artıracaklardır.

Çizelgeleme süreçleri, kaynakların en verimli şekilde kullanılması için çok çeşitli teknikler ve algoritmalar gerektirir. Özellikle, çok kısıtlı kaynakların bulunduğu ve çok çeşitli üretim parametrelerinin dikkate alınması gerektiği durumlarda çizelgeleme metodolojileri karmaşık hale gelir. Bu noktada, iki boyutlu şerit paketleme yöntemi, paralel makineler üzerindeki işlerin optimal şekilde dağıtılmasını sağlayarak verimliliği artırır. Bu yöntem, her bir makinenin kapasitesini dikdörtgen bir alan olarak kabul eder

ve işler bu alanın içine yerleştirilir. Bu yerleştirme, işlemlerin zamanında tamamlanmasını ve makinelerin olabildiğince az boş kalmasını sağlar.

Halı üretiminde, farklı iplik türleri ve halı özellikleri nedeniyle her bir dokuma tezgahının üretim kapasitesi ve uygunluğu farklılık gösterebilir. Bu durum, tezgahların doğru şekilde çizelgelenmesini zorunlu kılar. Çizelgeleme sırasında dikkate alınması gereken başlıca faktörler arasında, tezgahların hazır olma durumları, üretim süreçlerinin süresi, hammadde tedarik süreleri ve kalite kontrol aşamaları bulunur. Bu faktörlerin tümü, üretim sürecinin verimliliğini ve müşteri memnuniyetini doğrudan etkiler.

Halı üretim işletmelerinde, çizelgeleme süreçlerinin iyileştirilmesi ve optimize edilmesi, hem maliyetlerin düşürülmesi hem de müşteri memnuniyetinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada önerilen yöntemler ve elde edilecek sonuçlar, halı üretiminde kullanılan tezgahların daha verimli kullanılmasını sağlayarak işletmelerin rekabet gücünü artıracaktır. Aynı zamanda, bu yöntemlerin diğer üretim sektörlerine de uygulanabilirliği araştırılabilir ve geniş bir uygulama alanı bulunabilir.

Sonuç olarak, çizelgeleme metodolojileri ve iki boyutlu şerit paketleme teknikleri kullanılarak halı üretiminde verimliliğin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi sağlanabilir. Bu çalışmalar, işletmelerin üretim süreçlerini optimize etmelerine ve rekabet avantajı elde etmelerine yardımcı olacaktır. Literatürdeki sınırlı sayıda çalışma ve bu alanda yapılan yenilikçi uygulamalar, bu çalışmanın önemini ve katkısını daha da artırmaktadır. Gelecekte, bu tür çalışmaların sayısının artması ve farklı sektörlerde uygulanabilirliğinin araştırılması, üretim planlaması ve çizelgeleme alanında önemli gelişmelere yol açacaktır.

2. BÖLÜM: LİTERATÜR ANALİZİ

2.1.Literatürde Yapılan Çalışmalar ve Özet Tablo

Çalışmada ele alınan problemler makine çizelgeleme ve iki boyutlu atama probleminden oluşmaktadır. Literatürde dokuma makinelerinin çizelgenmesi ile alakalı olarak fazla çalışma bulunmadığı tespit edilmiştir.

Mourtos vd. [1] tarafından yapılmış çalışmada, yazalar tekstil endüstrisi için ilişkisiz paralel dokuma tezgahlarının çizelgelemesini işlere ait teslim zamanlarını dikkate alarak işlerin tamamlanma zamanını en küçükleyecek şekilde incelemiştir. Ele aldıkları problemde iş bölme (job splitting), sıra bağımlı hazırlık süreleri, hazırlık işlemleri için personel ve ekipman kısıtlamalarını dikkate almışlardır. Problemleri için hem karma tam sayılı matematiksel model hem de iki tane sezgisel yöntem sunmuşlardır. Tekstil sektöründe yapılan başka bir çizelgeleme çalışması Tucci ve Rinaldi [2] tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada tabu arama meta sezgiselini dokuma çizelgeleme problemine uygulamışlardır. Ele aldıkları problemde doğrusal olmayan ceza fonksiyonları, sıra bağımlı hazırlık süreleri ve zamanları bulunmaktadır. Yılmaz Eroğlu ve Ozmutlu [3] çalışmalarında büyük ölçekli dokuma çizelgeleme problemini ele almıştır. Çalışmalarında makine uygunluk, iş bölme kısıtları ve sıra bağımlı hazırlık süresi olan ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemini yayılma zamanını en küçüklemek üzere incelemiştir.

Uzsoy [4] çalışmasında işlerin yığın bir şekilde işlem görmesi üzerine çalışmıştır. İşleri en verimli şekilde çizelgenmesi amaçlanmıştır. Çalışmasının amacı tek makinada yığın işlerin yayılma zamanı minimize etmektir. Gazvini ve Dupont [5] çalışmalarında tek makine yığın işleri çizelgeleme probleminde yayılma zamanını minimize etmek için dal sınır algoritmasını önermişlerdir. Önerdikleri yöntemle yayılma zamanını minimize etmek için, mevcut ve yeni algoritmalar arasından en iyi algoritmanın dal sınır algoritması olduğunu önermişlerdir. Trindade vd. [6] çalışmasında farklı işlem sürelerinden oluşan partilenmiş yığın işlerin tek makine çizelgenmesi üzerine çalışmıştır. Yayılma zamanını minimize etmek amacıyla yay akışı yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile 100 milyon işe kadar rasgele örneklerin optimalliği kanıtlanmıştır. Bu modelin literatürdeki

modellere kıyasla açık üstünlüğü olduğu belirtilmiştir. Lee vd.[7] çalışmalarında tek makinede yığın işlerin sezgisel yöntemler kullanarak yayılma zamanını minimize etmeye çalışmışlardır. Çalışmada 9 farklı sezgisel yöntem kullanarak birbirleri arasında üstünlük karşılaştırılması, daha iyi ve benzer çözümler sağladığı durumlar incelenmiştir. Çözümleri yaparken fazla zamana ihtiyaç duyulduğu fakat bu sürelerin makul olduğu sonucuna varmışlardır.

Chang vd. [8] çalışmalarında özdeş paralel makinalarda yığın işlerin simüle tavlama yaklaşımı algoritmasıyla yayılma zamanını minimize etmeye çalışmışlardır. Simüle tavlama yönteminin sonucu ile CPLEX çözümlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Simüle tavlama yöntemi, birçok atamada CPLEX'e göre daha hızlı ve daha iyi bir sonuç vermiştir. Performans karşılaştırılmasına göre simüle tavlama yaklaşımının CPLEX' göre daha bir çözüm yöntemi olduğu sonucuna varmışlardır. Chung vd. [9] çalışmalarında paralel makinalarda yığın işlerin yayılma zamanını minimize etmeye çalışmaktadırlar. Minimize etmek için tam sayılı programlama kullanılmıştır. Aynı zamanda tam sayılı programlama modelini daha verimli bir şekilde çözmek için parti sayısını belirlemek ve bu sayıyı modelde bir parametre olarak uygulayarak problemin karmaşıklığını azaltmak için algoritmalar önermişlerdir. Cheng vd. [10] çalışmalarında eşit kapasitelere sahip olan paralel makinalarda yığın işlerin karma tamsayı programlama yöntemi ile toplam yayılma zamanı ve yayılma zamanını minimize etmeyi hedeflemek için bir algoritma önermişlerdir. Mönch vd. [11] çalışmalarında paralel makinalarda yığın işlerin ataması yapılarak toplam ağırlıklı gecikmeyi en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. NP zor problem sınıfında olduğu için sezgisel algoritmalarından birisi olan genetik algoritmayı önermişlerdir. Muter [12] çalışmasında tek makine ve paralel makinada yığın işlerin çizelgelemesi yaparak yayılma zamanlarını minimize etmek için kesin algoritmalar (exact algorithms) önermiştir. Algoritma iki kısımdan oluşmaktadır. Kullanılan algoritmanın paralel makine çizelgelemede tek makine çizelgelemeye göre daha iyi sonuç verdiğini savunmaktadır. Lee [13] çalışmasında tek bir parti işleme makinesinde yayılma zamanını minimize etme problemini ele almıştır. İşlenen iş sayısı aynı anda B adet kadar olabilmektedir. Bir partinin işlem süresi, partideki en uzun işin işlem süresine eşittir. Özel durumlar için polinom ve yarı polinom zamanlı algoritmalar sunmuştur. Probleme özel sezgisel yöntemler geliştirmiş ve deneylerle performanslarını değerlendirmiştir. Sonuç olarak birkaç sezgisel yöntemin çok iyi ortalama performans gösterdiği ve hesaplama yükünün makul bir sürede tamamlandığını gözlemlemiştir. Dupont ve Dhaenens-Flipo

[14] çalışmalarında yarı iletken endüstrilerindeki yakma işlemleri veya metal işleri endüstrisindeki ısı işlemleri gibi çeşitli ortamlarda bulunan toplu işleme makinelerini ele almaktadır. Birden fazla işi aynı anda işleyerek toplu bir parti oluşturarak ve parti yayılma süresini minimize etmeye çalışmışlardır. Numaralandırma şeması kullanarak bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Arrayo ve Leung [15] çalışmalarında paralel makinalarda yığın işlerin çizelgelemesi için yeni bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Hesaplama karmaşıklığından dolayı, ilk uyan ve en uygun en erken işin hazır olma süresi kurallarına dayanan birkaç sezgisel yöntem sunmuşlardır. Sonuç olarak elde edilen sezgisel yöntemin, literatürde önerilen sezgisel yöntemlerden daha iyi sonuç ve daha iyi performansa sahip olduklarını savunmaktadırlar. Jia vd. [16] çalışmalarında paralel makinada yığın işlerin yayılma zamanını minimize etmek amacıyla max-min karınca sistemine dayalı sezgisel yöntem önermişlerdir. Önerdikleri sezgisel yöntemi daha önce literatürde yer alan birkaç algoritma ile karşılaştırmalarını yaparak daha iyi sonuç aldıklarını savunmaktadırlar.

Bu çalışma içerisinde ele alınan problem hem makine çizelgeleme hem de iki boyutlu atama problemidir. Ele alınmış olan iki boyutlu atama probleminin literatürde karşımıza çıkan örnekleri şu şekildedir:

- İki boyutlu sırt çantası problemi (tek bir atama yapılacak birim var [$\text{kapasite} = 1$], bu birime faydayı en büyüyecek şekilde her bir parça sadece bir defa eklenecek şekilde yerleşim gerçekleştiriliyor)
- İki boyutlu kutulama problemi (birden fazla birim var [$\text{kapasite} \geq 1$], bu birimlere faydayı en büyüyecek şekilde her bir parça sadece bir defa eklenecek şekilde yerleşim gerçekleştiriliyor)
- İki boyutlu stok kesim problemi (birden fazla birim var [$\text{kapasite} \geq 1$], bu birimlere faydayı en büyüyecek şekilde her bir parça en az talebi kadar yerleştirilecek şekilde yerleşim gerçekleştiriliyor)
- İki boyutlu şerit paketleme problemi (tek bir şeride eni veya boyu sabit kalacak şekilde, şeride faydayı en büyüyecek şekilde her bir parça sadece bir defa eklenecek şekilde yerleşim gerçekleştiriyor)

Yukarıdaki problem tiplerinden *İki boyutlu şerit paketleme problemi* ele aldığımız probleme daha çok benzemektedir fakat literatürde paralel makine çizelgeleme problemleri ile şerit paketleme problemlerine yer veren belirgin çalışmalar bulunmamaktadır. Daha ziyadesi ile paralel makine/ tek makine çizelgeleme problemleri yığın işleme durumunda iki boyutlu sırt çantası ve kutulama kısıtları ile çalışılmıştır.

Li ve Zhang [17] tek makine yığın işlerin çizelgelemesi için iki boyutlu sırt çantası yöntemini önermişlerdir. Bir makinenin kapasitesinin tek boyutlu sırt çantası kısıtlamaları olarak modellendiği klasik toplu işleme makinesi çizelgeleme problemlerinden farklı olarak, makinenin kapasitesi iki boyutlu bir dikdörtgenle temsil etmektedir ve birbirinden farklı olan iş boyutları alanı oluşturmaktadır. Bennell vd. [18] çalışmalarında makine kapasitesinin dikdörtgen olarak temsil edildiği bir problem tipinde işlerin teslim tarihleri de göz önünde bulundurmaktadır. İki boyutlu sırt çantası problemi ve teslim tarihleri harmanlanarak ortaya çıkarılmış bir çalışmadır. Tabu arama ve genetik algoritma ile çözümler elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Maksimum gecikmeyi minimize edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak genetik algoritma tabu arayama göre daha başarılı performans göstermiştir. [19] makine kapasitesini dikdörtgen alan temsil ederek iki boyutlu sırt çantası problemi yöntemini kullanmış ve teslim tarihlerini (L_{max}) minimize etmeye çalışmışlardır. Tercinet vd. [20] çalışmalarında paralel makine çizelgelemede hazırlık süreleri kısıtlı problemler için sırt çantası alt sınırlandırmalarını kullanarak yayılma zamanını minimize etmeye dayalı bir yöntem önermişlerdir. Xie vd. [21] çalışmalarında paralel makinalarda çizelgelenecek yığın işleri dikdörtgen bir alanda iki boyutlu sırt çantası problemine dönüştürmüş ve karma tamsayı programlama modeli ile yayılma zamanını minimize etmek için algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritmanın metasezgisel yöntemlerden daha verimli ve daha etkin olduğunu göstermişlerdir. Lodi vd. [22] iki boyutlu paketleme problemleri ile ilgili genel bir literatür araştırması yapmış ve modellerin detaylarına değinerek açıklamışlardır. Zhou vd. [23] çalışmalarında paralel makinada yığın işlerin çizelgelemesini iki boyutlu sırt çantası probleminin bir kombinasyonudur. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışma bir araç filosu üzerinde çalışılmıştır. Müşterilere teslim edilecek mobilyaları nakliye sırasında üst üste binemeyecek olanlar için iki boyutlu sırt çantası yöntemi ile çözmektedir. Her mobilyanın bir teslim süresi bulunmaktadır. Mobilya müşteriye teslim edildikten sonra depoya döner ve başka mobilyayı teslim etmek için yola çıkar. Her seferin teslimat süresi, iş süresini temsil etmektedir. Çalışmadaki amaç toplam yayılma süresini minimize etmektedir. Bunun için sezgisel yöntemler önermişlerdir. Sezgisel yöntemler arasından en uygun

maksimal dikdörtgen algoritması en iyi sonucu vermiştir. Zhang vd. [24] çalışmalarında paralel makinada yığın işlerin çizelgelemesini iki boyutlu sırt çantası problemi ile çözümünün daha iyi performans elde edebilmesi için rasgele anahtarlı genetik algoritmayı önermişlerdir. Önerdikleri algoritma dışında literatürde kullanılan 5 farklı algoritma ile karşılaştırma yapmışlardır. Önerilen algoritmanın 200 yığın işe kadar diğerlerinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır. Zhou vd. [25] çalışmalarında iki boyutlu iş boyutlarına sahip tek partili işleme makinesi çizelgeleme problemini ele almışlardır. İşler döndürülebilmektedir fakat üst üste gelmeden dikey olarak yerleştirilmesi gerekmektedir. Kapasite aşılmadığı sürece gruplandırılmış işler aynı anda işlenebilmektedir. Bir partinin işlem süresi, partideki en uzun işlem süresi ile tanımlamaktadır. Amaç makine kapasitesi göz önünde bulundurularak yayılma zamanını en aza indirilecek şekilde gruplara atamaktır. Çözüm uzayını azaltmak için probleme özel geliştirilmiş bir karma tamsayılı programlama kullanmışlardır. 16 farklı yöntem kullanmışlar ve sonuç olarak yöntemlerden birinin en iyi sonucu verdiği sonucuna varmışlardır. Hu vd. [26] çalışmalarında iki boyutlu sırt çantası kısıtlarıyla ilgisiz yığın paralel makine problemini ele almışlardır. Amaç, aynı olmayan iş büyüklüklerini, eşit olmayan yayın tarihlerini ve teslim tarihlerini dikkate alarak toplu işleme makinelerinin planlamasını ve iki boyutlu paketlemeyi entegre etmektir. Makinenin kapasitesi iki boyutlu bir dikdörtgen olarak modelleyecek şekilde genişletilir ve makinenin kapasitesi göz önünde bulundurularak işlerin üst üste binmesi kısıtlar ile önlenmiştir. Karma tamsayılı modelleme ve büyük problemler için büyük komşu arama yöntemleri önerilmiştir. Büyük komşu arama yöntemi, çözümleri kapsamlı bir şekilde keşfetmek ve geliştirmek için çıkarma ve ekleme operatörlerini içermektedir. Deneyler sonucunda yaklaşımın etkinliğini doğrulamışlardır. Berkey ve Wang [27] çalışmalarında bir dizi dikdörtgen parçanın, parçaların yüksekliğini en aza indirecek şekilde sonsuz yükseklikte bir kutuya yerleştirilmesini sağlayan iki boyutlu paketleme problemini ele almaktadır. Mevcutta kullanılan yöntemleri geliştirerek, yeni bir yöntem ortaya koymuşlar ve daha iyi bir performans gösterdiği sonucuna varmışlardır. Mehta ve Uzsoy [28] çalışmalarında yarıiletken üretiminde uyumsuz iş ailelerine sahip bir parti işleme makinesinde toplam gecikmeyi minimize etme problemini incelemişlerdir. Aynı aileye ait tüm işlerin aynı işleme sürelerine sahip olduğu ve farklı iş ailelerine ait işlerin bir arada işlenemeyen bir senaryo üzerinde çalışmışlardır. Polinom zaman karmaşıklığına sahip dinamik programlama kısıtlarını kullanmışlardır.

Salem vd. [29] ev tekstili sektöründe kumaş rulolarının kesimi için giyotin kısıtlanmalı iki boyutlu stok kesim problemini ele almışlardır. Fireyi en azlayarak, talepleri karşılayabilmek ve kumaş rulolarının kesimleri için kesim modeli oluşturan bir matematiksel model ortaya koymuşlardır. Hifi [30] sabit genişliğe ve sınırsız uzunluğa sahip bir problemin şerit kesme/paketleme problemini çözebilmek için dallanma-sınırlanma ve dinamik programlama yaklaşımlarını önermiştir. Bortfeldt [31] dikdörtgen parçaların bulunduğu bir küme ve sabit genişliğe sahip, değişken uzunluktaki bir konteyner içerisinde parçaların üst üste gelmeden ve genel uzunluğunu minimize edecek şekilde düzenlemek için genetik algoritma önermiştir. Leung vd. [32] dik şerit paketleme problemi için iki aşamalı arama algoritması sunmuşlardır. Yerel arama ve simüle edilmiş tavlama algoritması kullanmışlardır. Hesaplamalar sonucunda birçok algoritmadan daha iyi sonuç almışlardır. Kenmochi vd. [33] 90 derece dönüşlü ve dönüşsüz iki boyutlu paketleme probleminin için dal ve sınır algoritması önermişlerdir. Önerilen yöntem ile daha verimli ve daha hızlı bir çözüm elde edildiği sonucuna varmışlardır. Bekrar vd. [34] iki boyutlu şerit paketleme problemi için geliştirilmiş dal ve sınır algoritması önermişlerdir. Literatürdeki örnekler üzerinde test ederek, mevcut algoritmalarla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır. He vd. [35] iki boyutlu şerit paketleme problemi için deterministik sezgisel algoritma önermişlerdir ve literatürdeki en gelişmiş algoritmalarla karşılaştırıldığında oldukça rekabetçi sonuçlar verdiği sonucunu elde etmişlerdir. Castro vd. [36] iki boyutlu dikey şerit paketleme problemi için karma tamsayı programlama tabanlı yaklaşım önermişler ve literatürdeki 29 farklı örnek ile karşılaştırılarak daha iyi bir yaklaşım olduğun sonucuna varmışlardır.

Literatür araştırmasının genel olarak özeti ve çalışma konuları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Literatür taraması özet tablo

Yazar/Yazarlar	Yıl	Çalışma Konusu
Mourtos vd. [1]	2021	Paralel Makine Çizelgeleme
Tucci vd Rinaldi [2]	1999	Paralel Makine Çizelgeleme

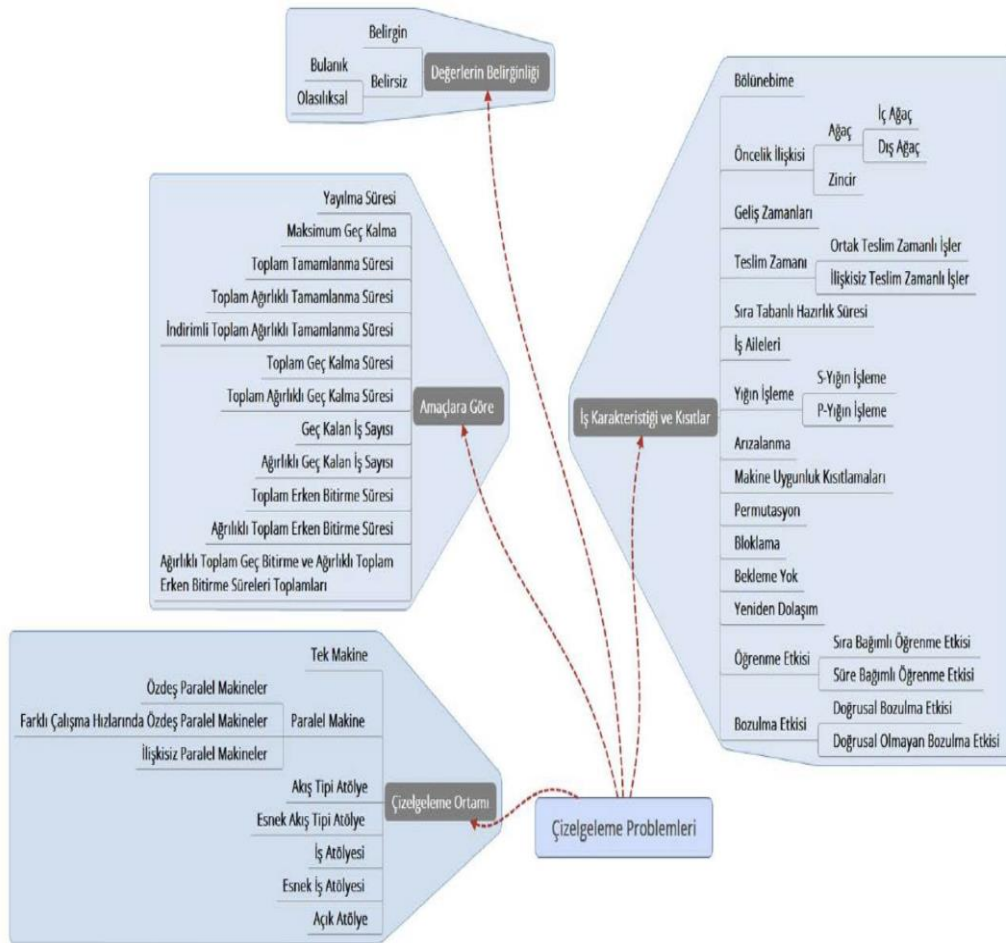
Yılmaz Eroğlu ve Ozmutlu [3]	2017	Paralel Makine izelgeleme
Uzsoy [4]	1994	Tek Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Ghazvini vd Dupont [5]	1998	Tek Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Trindade vd. [6]	2021	Tek Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Lee vd. [7]	2013	Tek Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Chang vd. [8]	2004	Paralel Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Chung vd.[9]	2009	Paralel Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Cheng vd. [10]	2012	Paralel Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Mönch vd. [11]	2005	Paralel Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Muter [12]	2020	Tek ve Paralel Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Lee [13]	1999	Tek Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Dupont ve Dhaenens-Flipo [14]	2002	Yığın İş Makine izelgeleme
Arroyo ve Leung [15]	2017	Paralel Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Jia vd. [16]	2016	Paralel Makine Yığın İş Makine izelgeleme
Li ve Zhang [17]	2018	Tek Makine Yığın İş Makine izelgeleme – İki Boyutlu Sırt antası Problemi
Bennell vd. [18]	2013	Makine izelgeleme – İki Boyutlu Sırt antası Problemi
Polyakovskiy ve Hallah [19]	2018	Makine izelgeleme – İki Boyutlu Sırt antası Problemi

Tercinet vd. [20]	2006	Paralel Makine Çizelgeleme – İki Boyutlu Sırt Çantası Problemi
Xie vd. [21]	2020	Paralel Makine Çizelgeleme – İki Boyutlu Sırt Çantası Problemi
Lodi vd. [22]	2002	İki Boyutlu Paketleme Problemleri
Zhou vd. [23]	2022	Paralel Makine Yığın İş Makine Çizelgeleme – İki Boyutlu Sırt Çantası Problemi
Zhang vd. [24]	2022	Paralel Makine Yığın İş Makine Çizelgeleme – İki Boyutlu Sırt Çantası Problemi
Zhou vd.[25]	2022	Tek Makine Yığın İş Makine Çizelgeleme – İki Boyutlu Sırt Çantası Problemi
Hu vd. [26]	2024	Paralel Makine Yığın İş Makine Çizelgeleme – İki Boyutlu Sırt Çantası Problemi
Berkey ve Wang [27]	1987	İki Boyutlu Paketleme Problemi
Mehta ve Uzsoy [28]	1998	Yığın İş Makine Çizelgeleme
Salem vd. [29]	2023	İki Boyutlu Stok Kesme Problemi
Hifi vd. [30]	1998	İki Boyutlu Şerit Kesme/Paketleme Problemi
Bortfeldt [31]	2006	İki Boyutlu Kutulama Problemi
Leung vd. [32]	2011	İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi
Kenmochi vd. [33]	2009	İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi
Bekrar vd. [34]	2010	İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi
He vd. [35]	2013	İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi
Castro vd. [36]	2012	İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi

3. BÖLÜM: PARALEL MAKİNE ÇİZELGELEME

3.1.Paralel Makine Çizelgeleme Problemi Tanımı

Pazarın ve rekabet ortamının gelişmesi ile birlikte işletmeler, müşteri memnuniyetini arttırmak adına siparişlerini zamanında teslim etmek istemektedir. Üretim sistemlerinde bu süreci yönetebilmek için makine çizelgeleme yöntemi kullanmaktadır. Makine çizelgeleme problemleri, tek makine, paralel makine, akış tipi, atölye tipi çizelgeleme gibi alt başlık altında incelenmektedir. (Şekil 3.1). Bu başlıklardan birisi ve yıllardır popülerliğini yitirmeyen, dikkat çeken konulardan birisi olan paralel makine çizelgelemedir.



Şekil 3.1. Çizelgeleme problemleri sınıflandırması (Arık, [37])

3.2.Paralel Makine Problemleri Sınıflandırmaları

Çizelgeleme problemleri için üç kısımda sınıflandırma bulunmaktadır. Bu notasyonlar şu şekildedir:

- α parametresi çizelgeleme ortamına göre
- β parametresi işlem karakteristiğine göre
- γ parametresi amaç fonksiyonuna göre

Tablo 3.1: Çizelgeleme ortamı notasyonları

α parametresi	Notasyon
Tek makine	(1)
Özdeş paralel makine	(Pm)
Özdeş olmayan paralel makine	(Qm)
İlişkisiz paralel makine	(Rm)
Atölye tipi	(Jm)
Esnek atölye tipi	(FJc)
Açık atölye tipi	(Om)
Akış tipi atölye	(Fm)
Esnek akış tipi atöyle	(FFc)

Tablo 3.2: Çizelgeleme işlem karakteristiği notasyonları

β parametresi	Notasyon
Geliş zamanı	(r_j)
Sıra bağımlı hazırlık süresi	(S_{jk})
Bölünebilme	(prmp)
Öncelik kısıtları	(prec)
Öncelik kısıdı (ağaç)	(tree)
Öncelik kısıdı (iç ağaç)	(in tree)
Öncelik kısıdı (dış ağaç)	(out tree)
Öncelik kısıdı (zincir)	(chains)

Arızalanma	(brkdwn)
Permütasyon	(prmu)
Makine uygunluk kısıtlamaları	(M_j)
Bloklama	(block)
Bekleme yok	(nwt)
Yeniden dolaşım	(rcrc)
Öğrenme etkisi	(LE)
Sıra bağımlı öğrenme etkisi	($P_{[r]} = P_i r^a$)
Zaman bağımlı öğrenme etkisi	($P_{[r]} = (1 - \sum_{i=1}^{r-1} P_{[i]})^a P_r$)
Bozulma etkisi	(DE)
Doğrusal bozulma etkisi	($P_{[r]} = P_r + at$)
Doğrusal olmayan bozulma etkisi	($P_{[r]} = P_r + at^b$)
Ortak teslim zamanı	\bar{d}
İlişkisiz teslim zamanı	d_i
Yığın işleme	(batch)
S tipi yığın işleme	(s-batch)
P tipi yığın işleme	(p-batch)

Tablo 3.3: Çizelgeleme amaç fonksiyonu notasyonları

γ parametresi	Notasyon
Maksimum tamamlanma süresi	C_{max}
Toplam tamamlanma süresi	$\sum C_j$
Toplam ağırlıklı tamamlanma süresi	$\sum w_j C_j$
İndirimli toplam ağırlıklı tamamlanma süresi	$\sum w_j (1 - e^{-rC_j})$
Maksimum geç kalma süresi	L_{max}
Toplam gecikme süresi	$\sum T_j$
Toplam ağırlıklı gecikme süresi	$\sum w_j T_j$
Geç kalınmış iş sayısı toplamı	$\sum U_j$

Ağırlıklı geç kalınmış iş sayısı toplamı	$\sum w_j U_j$
Toplam erken tamamlanma süresi	$\sum E_j$
Ağırlık toplam erken tamamlanma süresi	$\sum w_j E_j$
Toplam erken tamamlanma süresi ve toplam geç kalma süresi toplamı	$\sum E_j + \sum T_j$
Ağırlıklı toplam erken tamamlanma süresi ve ağırlıklı toplam geç kalma süresi toplamı	$\sum w_j' E_j + \sum w_j'' T_j$

Paralel makine çizelgeleme, n tane işin m adet makinede belirli hedefler doğrultusunda işlenerek, istenen hedefler için en iyi sıralama oluşturma veya yerleştirme sürecidir. İşler bir makinede işlem görürken, başka bir makinede aynı anda işlem göremezler. Aynı zamanda bir makine de bir işi işlerken, başka bir işi işleyemezler. Makineler birbirinden bağımsız çalışabilen ve aynı anda tüm makinelerin çalışabilir durumdadır.

Tek makine ve paralel makine çizelgeleme iki farklı tip çizelgeleme problemidir. Tek makine çizelgeleme tek bir makine üzerinde tüm işlerin işlenmesi durumu, paralel makine çizelgeleme birden fazla makinenin bulunduğu bir sistemde tüm işlerin bu makineler arasında dağıtılarak işlendiği durumdur. Paralel makine çizelgeleme problemleri, tek makine çizelgeleme problemlerine göre daha zor ve karmaşıktır.

Paralel makine çizelgeleme problemleri, özdeş olan, özdeş olmayan ve ilişkisiz paralel makine üç farklı kategoride çeşitlendirilmektedir.

- Özdeş olan paralel makine: Tüm makineler aynı hızlara ve özelliklere sahiptir. Herhangi bir iş, herhangi bir makinede aynı sürede tamamlanır.
- Özdeş olmayan paralel makine: Makineler farklı hızlara ve özelliklere sahiptir. Bir işin tamamlanma süresi o makinenin hızına ve özelliğine bağlı olarak değişir.
- İlişkisiz (bağımsız) paralel makine: Her makinenin her bir iş için farklı hız, farklı özellik ve işlem sayısı farklılığı değişir.

4. BÖLÜM: İKİ BOYUTLU ATAMA KISITLARINA SAHİP MATEMATİKSEL MODELLER

4.1.İki Boyutlu Atama Kısıtlarına Sahip Problemler

Kesme ve paketleme problemleri, geniş uygulama alanları ve ekonomik etkileri nedeniyle operasyon araştırmaları ve mühendislik alanlarında önemli bir yere sahiptir. Bu problemler, çeşitli matematiksel ve algoritmik yöntemler kullanılarak çözülmektedir. Kesme ve paketleme problemlerinin temel amacı, kaynakların etkin bir şekilde kullanılması, maliyetlerin düşürülmesi ve verimliliğin artırılmasıdır. Bu amaçlara ulaşabilmek için, doğru problem sınıflandırması ve uygun çözüm yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Günümüz dünyasında, farklı alanlarda birçok problem tipi ile karşılaşmaktadır. Problemlerin en iyi şekilde çözülebilmesi ve maksimum verim alınabilmesi için, problem sınıfının doğru belirlenmesi büyük önem taşır. Dyckhoff [38], kesme ve paketleme problemleri için ortak özellikler belirleyerek kapsamlı bir sınıflandırma sistemi önermiştir. Bu sınıflandırma sistemi, problem türlerini ve özelliklerini belirleyerek, uygun çözüm yöntemlerinin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu sayede, kaynakların etkin kullanımı, maliyetlerin düşürülmesi ve verimliliğin artırılması sağlanır. Dyckhoff'un [38] sınıflandırma sistemi dört ana kriterden oluşmaktadır:

1. Boyutluluk:

Bu kriter, problemin geometrik boyutlarını açıklar ve kesme ve paketleme problemlerini sahip oldukları boyutlara göre sınıflandırır.

- Tek boyutlu: Bu sınıflandırmaya giren problemler, yalnızca bir boyut (uzunluk) içeren nesnelere ilgilidir. Örneğin, çubukların, çelik çubukların veya ahşap kirişlerin belirli uzunluklarda kesilmesi.
- İki boyutlu: Bu sınıflandırmaya giren problemler, iki boyut (uzunluk ve genişlik) içeren nesnelere ilgilidir. Örneğin, kağıt, metal levha veya kumaşın kesilmesi.

- Üç boyutlu: Bu sınıflandırmaya giren problemler, üç boyut (uzunluk, genişlik ve yükseklik) içeren nesnelere ilgilidir. Örneğin, konteynerlerin gemilere yerleştirilmesi.
- Çok boyutlu (N boyutlu): Bu sınıflandırmaya giren problemler, üçten fazla boyut içeren nesnelere ilgilidir.

2. Atama Türü:

Bu kriter, tüm nesnelere ve öğelerin mi yoksa yalnızca belirli bir seçimin mi atanması gerektiğini açıklar.

- Tüm büyük nesnelere ve küçük parçaların seçimi: Bu tür problemlerde, hem büyük nesnelere hem de küçük parçalar seçilerek yerleştirilir.
- Büyük nesnelere seçimi ve tüm küçük parçaların seçimi: Bu tür problemlerde ise büyük nesnelere seçildikten sonra tüm küçük parçalar yerleştirilir.

3. Nesnelere Çeşitliliği:

Bu kriter, aynı veya farklı şekle sahip nesnelere bulunup bulunmadığını açıklar.

- Aynı türden ve boyuttan oluşan nesnelere: Bu tür problemlerde, tüm nesnelere aynı türde ve boyuttadır.
- Farklı türden ve boyuttan oluşan nesnelere: Bu tür problemlerde ise, nesnelere farklı türde ve boyuttadır.

4. Öğelerin Çeşitliliği:

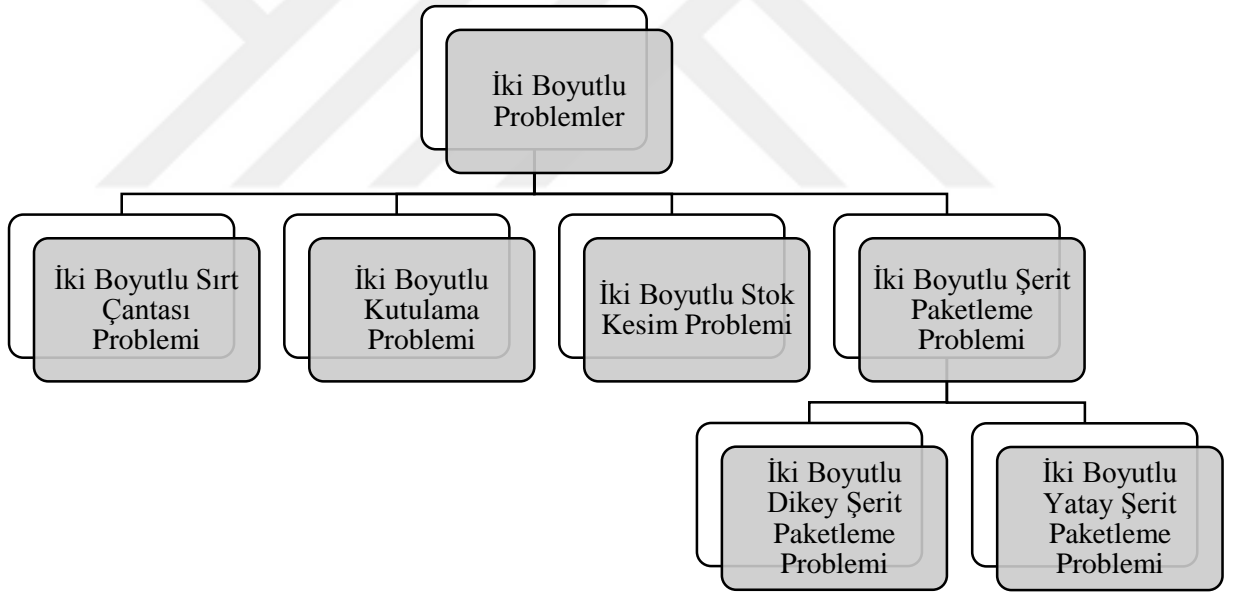
Bu kriter, öğelerin şekil ve sayısına göre problemlere birbirinden ayrılmasını açıklar.

- Farklı şekillerde birkaç parça: Bu tür problemlerde, az sayıda farklı şekle sahip birkaç parça bulunur.
- Birçok farklı şekillerde birçok parça: Bu tür problemlerde ise, birçok farklı şekle sahip birçok parça bulunur.
- Nispeten az sayıda farklı şekillerde birçok parça: Bu tür problemlerde, nispeten az sayıda farklı şekle sahip birçok parça bulunur.

- Özdeş çok sayıda parça: Bu tür problemlerde ise, aynı şekle sahip çok sayıda parça bulunur.

Bu çalışma kapsamında ele alınan problem, iki boyutlu sınıflandırma altında yer almaktadır. İki boyutlu problemler, literatürde en çok çalışılan kesme ve paketleme problem türleri arasında yer alır. İki boyutlu kesme problemleri, özellikle kağıt, metal levha, kumaş gibi materyallerin belirli boyutlarda kesilmesi gereken durumlarda ortaya çıkar. Bu tür problemler, kaynakların etkin kullanımını ve atık miktarının en aza indirilmesini hedefler.

Çalışmada yer alan problem, iki boyutlu sınıflandırması altında yer almaktadır. İki boyutlu problemlerin literatürde en çok kullanılan türleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. İki boyutlu kısıtlamalara sahip problemler

4.2.İki Boyutlu Sırt Çantası Problemi

İki boyutlu sırt çantası problemi literatürde en iyi bilinen ve önemli bir yere sahip problemlerden birisidir. Son kırk yılda yöneylem araştırması konusunda çalışma yapanlar tarafından dikkat çekmiş bir konudur. Genel olarak ifade etmek gerekirse, ana parça

içerisine yerleştirecek daha küçük parçaların ağırlık veya hacmi göz önünde bulundurularak mevcut kapasitesini aşmadan toplam değeri maksimize etmektir (Fréville, [39]). Bu problem klasik kesme ve paketleme problemlerinin bir alt kümesine aittir ve NP-zor sınıfa dahildir (Zhang vd. [40]). İki boyutlu sırt çantası matematiksel modeli aşağıdaki gibidir. (Kellerer vd.[41]).

Matematiksel Model

Parametreler:

n : Eşyaların sayısı.

W_1 : Sırt çantasının birinci boyutundaki taşıma kapasitesi.

W_2 : Sırt çantasının ikinci boyutundaki taşıma kapasitesi.

w_{1i} : i numaralı eşyanın birinci boyutundaki ağırlık.

w_{2i} : i numaralı eşyanın ikinci boyutundaki ağırlık.

v_i : i numaralı eşyanın değeri.

Karar Değişkenleri:

x_i : i numaralı eşyanın seçilip seçilmediğini gösteren ikili değişken

Amaç Fonksiyonu: Toplam değeri maksimize et:

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i=1}^n v_i * x_i$$

Kısıtlamalar: Sırt çantasının birinci boyutundaki taşıma kapasitesini ve ikinci boyutundaki taşıma kapasitesini aşmamalı:

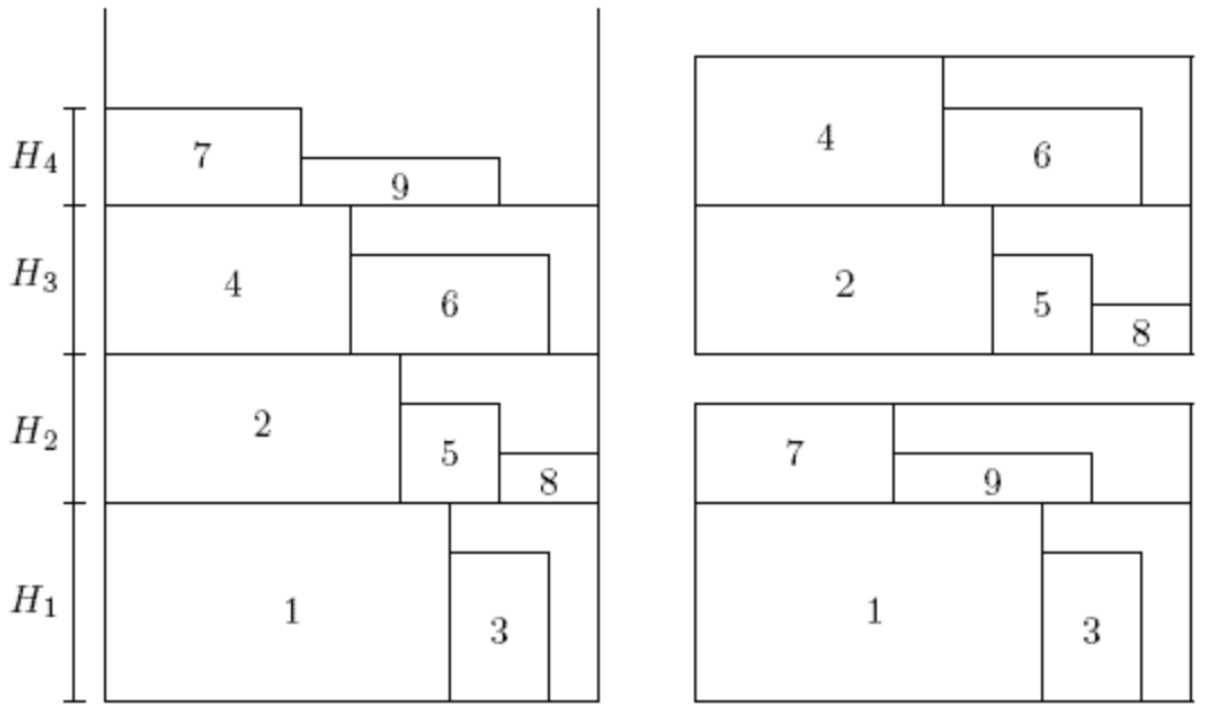
$$\sum_{i=1}^n w_{1i} * x_i \leq W_1$$
$$\sum_{i=1}^n w_{2i} * x_i \leq W_2$$

İkili kısıtlamalar:

$$x_i, z_j \in \{0,1\}$$

4.3.İki Boyutlu Kutulama Problemi

İki boyutlu kutulama problemi yapısı ve uygulamalarıyla 1930'lu yıllardan beri araştırılan ve popüler olan bir konudur. İki boyutlu kutu paketleme problemi, bir dizi küçük dikdörtgenin (öğelerin) minimum sayıda daha büyük dikdörtgenlere (kutular) paketlenmesini içeren bir optimizasyon problemidir. İki boyutu kutulama problemi matematiksel aşağıda gibidir. (Liu vd. [42])



Şekil 4.2. İki boyutlu kutulama problemi

Matematiksel Model

Parametreler:

n : Eşyaların sayısı.

m : Kutu sayısı

W_i : i eşyasının ağırlığı (değeri)

C : Her bir kutunun taşıyabileceği maksimum ağırlık

Karar Değişkenleri:

x_{ij} : i numaralı eşyanın seçilip seçilmediğini gösteren ikili değişken
 z_j : j kutusu kullanılmışsa (en az bir ürün atanmışsa) 1, değilse 0

Amaç Fonksiyonu: Toplam kullanılan kutu sayısını minimize et:

$$\text{Maximize } Z = \sum_{j=1}^n z_j$$

Kısıtlamalar:

Her eşya bir kutuya atanmış olmalıdır:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Bir kutuya atanacak toplam eşyaların ağırlığının toplamı, kutunun taşıyabileceği maksimum ağırlığı aşamaz:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} * W_i = C, \quad \forall j = 1, \dots, m$$

Bir kutu, ancak bu kutuya en az bir eşya atanmışsa açılabilir:

$$x_{ij} \leq z_j: \quad \forall ij$$

Kutular, ilk kutudan başlamak üzere açılır:

$$z_{(j+1)} \leq z_j: \quad \forall j = 1, \dots, m$$

İkili kısıtlamalar:

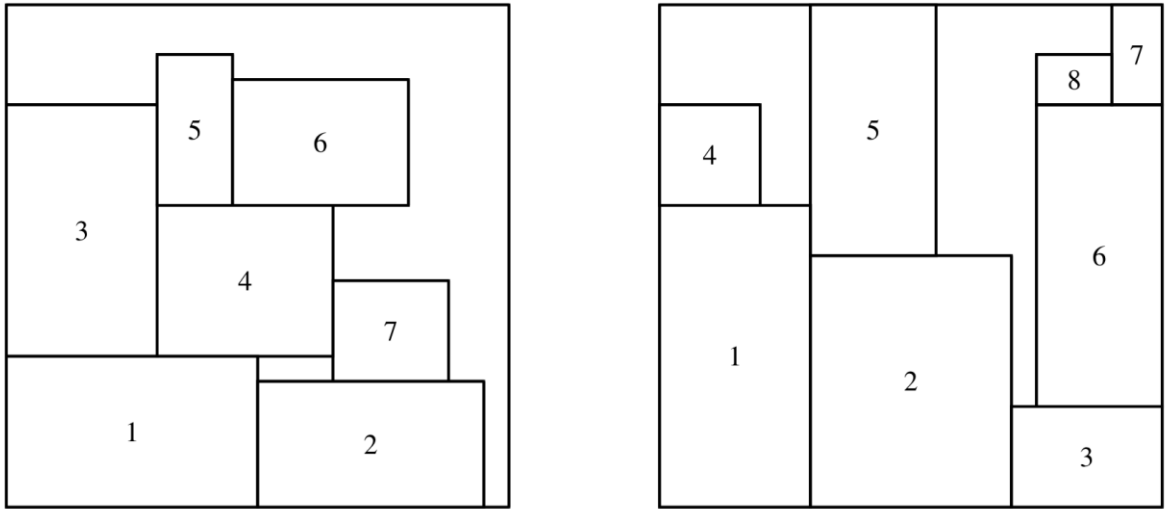
$$x_{ij}, z_j \in \{0,1\}$$

4.4. İki Boyutlu Stok Kesim Problemi

Stok kesim problemi önceden tanımlanmış boyutlara sahip bir dizi daha büyük nesneden, bir veya daha fazla boyutla (uzunluk, genişlik, yükseklik) ve talebe göre

karakterize edilen, öge adı verilen belirli bir küçük nesne kümesinin kesilmesinden oluşur. Genelde amaç israfın (firenin) azaltılmasını sağlamaktır. İlk çalışmalar 1960'lı yıllarda ortaya atılmıştır. ([43])

İki boyutlu kesim problemleri dikey yerleşim ve dikey olmayan yerleşim olarak iki grup altında incelenir. Bunlara ek olarak dikey kesim problemleri, giyotinli ve giyotinsiz olarak iki farklı şekilde incelenmektedir. (Haessler ve Sweeney, [44]). Giyotinli kesim, her parçanın kesilme işleminden sonraki kesimlerin parçanın tüm uzunluğu boyunca, iki ucu arasında yapılmasını sağlayan bir kesim türüdür. Giyotinsiz kesim, parçalar kesim planı içerisinde çakışmada olmadan herhangi bir yerinden kesilebilecek şekilde olan bir kesim türüdür. Şekil 4.3'de görüldüğü üzere iki farklı kesim türü gösterilmiştir. İki boyutlu stok kesim problemi matematiksel modeli aşağıdaki gibidir. (Kellerer vd.[41]).



Şekil 4.3. Giyotinsiz kesim (a), giyotinli kesim (b) (Lodi vd.[45])

Matematiksel Model

Parametreler:

n : Kesilecek malzemelerin sayısı.

m : Talep edilen parça sayısı.

L : Ana malzemenin uzunluğu.

l_i : i numaralı parçanın uzunluğu.

d_i : i numaralı parçanın talep edilen adedi.

Karar Değişkenleri:

x_{ij} : i numaralı parçanın, j numaralı kesimden elde edilip edilmediğini gösteren ikili değişken.

Amaç Fonksiyonu: Toplam kullanılan ana malzeme miktarını minimize et:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n \sum_j^m x_{ij} * l_i$$

Kısıtlamalar:

Her parçanın talep edilen adedi kadar üretilmelidir:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = d_i, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Her bir kesimden elde edilen parçaların toplam uzunluğu, ana malzemenin uzunluğunu aşmamalıdır:

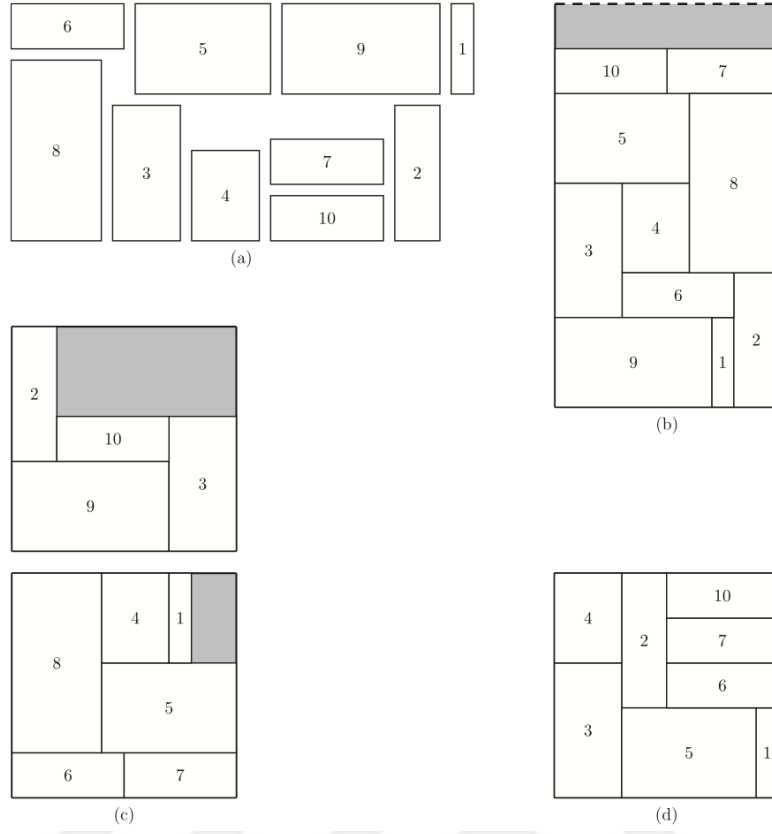
$$\sum_{i=1}^n x_{ij} * l_i \leq L, \quad \forall j = 1, \dots, m$$

İkili kısıtlamalar:

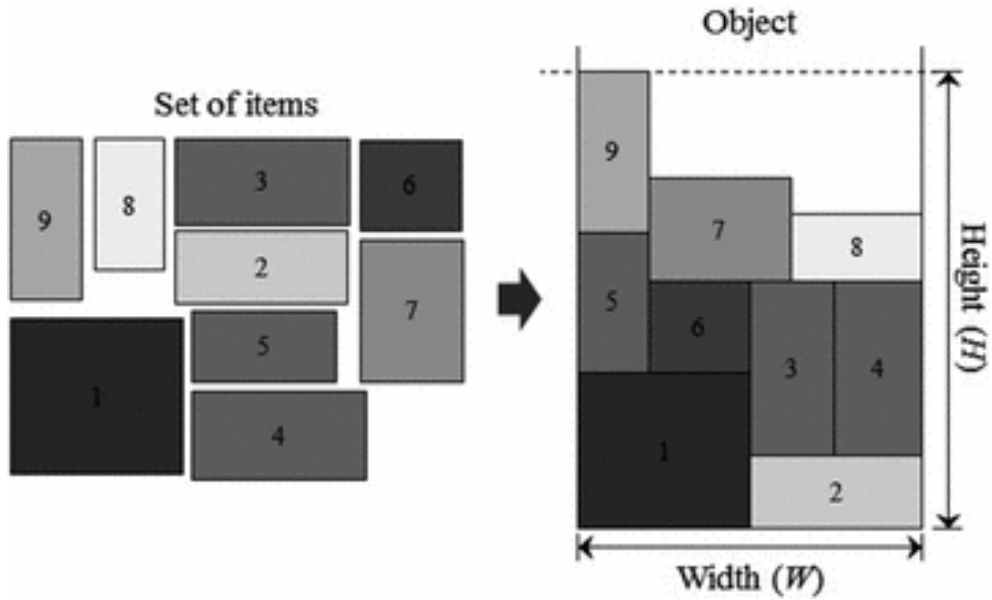
$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

4.5.İki Boyutlu Şerit Paketleme Problemi

İki boyutlu şerit paketleme problemi bir dizi dikdörtgen parçanın sabit genişlikte, sonsuz yükseklikte bir şerit halinde paketlenmesini içerir. Amaç mümkün olduğunca az rulo uzunluğu kullanan bir düzen bulmaktır. (Chauny vd. [46]). Bu problem için sezgisel yöntemler, metasezgisel yöntemler ve kesin algoritmalar dahil olmak üzere çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Genellikle kağıt ve tekstil endüstrisinde hammaddeler rulo halinde bulunmaktadır. Dolayısıyla bu çözüm yöntemi rulo yüksekliğini azaltarak problem çözümü sağlamaktadır. Bu şerit paketleme olarak bilinir. Matematiksel model aşağıdaki gibidir. (Kellerer vd. [41])



Şekil 4.4. Öğeler (a), optimal iki boyutlu şerit paketleme (b), optimal iki boyutlu kutulama problemi (c), optimal iki boyutlu sırt çantası problemi (d) (Iori vd. [47])



Şekil 4.5. İki boyutlu şerit paketleme gösterimi (Neuenfeldt vd. [48])

Matematiksel Model

Parametreler:

n : Paketlenmesi gereken dikdörtgen sayısı.

w : Şeridin genişliği.

Karar Değişkenleri:

x_{ij} : i numaralı dikdörtgenin, j konumda olup olmadığını gösteren ikili değişken.

Amaç Fonksiyonu: Şeridin toplam yüksekliğini minimize et:

$$\text{Minimize } H = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w h_i * x_{ij}$$

Kısıtlamalar:

Her dikdörtgen yalnızca bir kez yerleştirilebilir:

$$\sum_{j=1}^w x_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Hiçbir iki dikdörtgen üst üste gelmemelidir:

$$\sum_{i=1}^n h_i * x_{ij} \leq w, \quad \forall j = 1, \dots, W$$

İkili kısıtlamalar:

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

5. BÖLÜM: PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODELLER

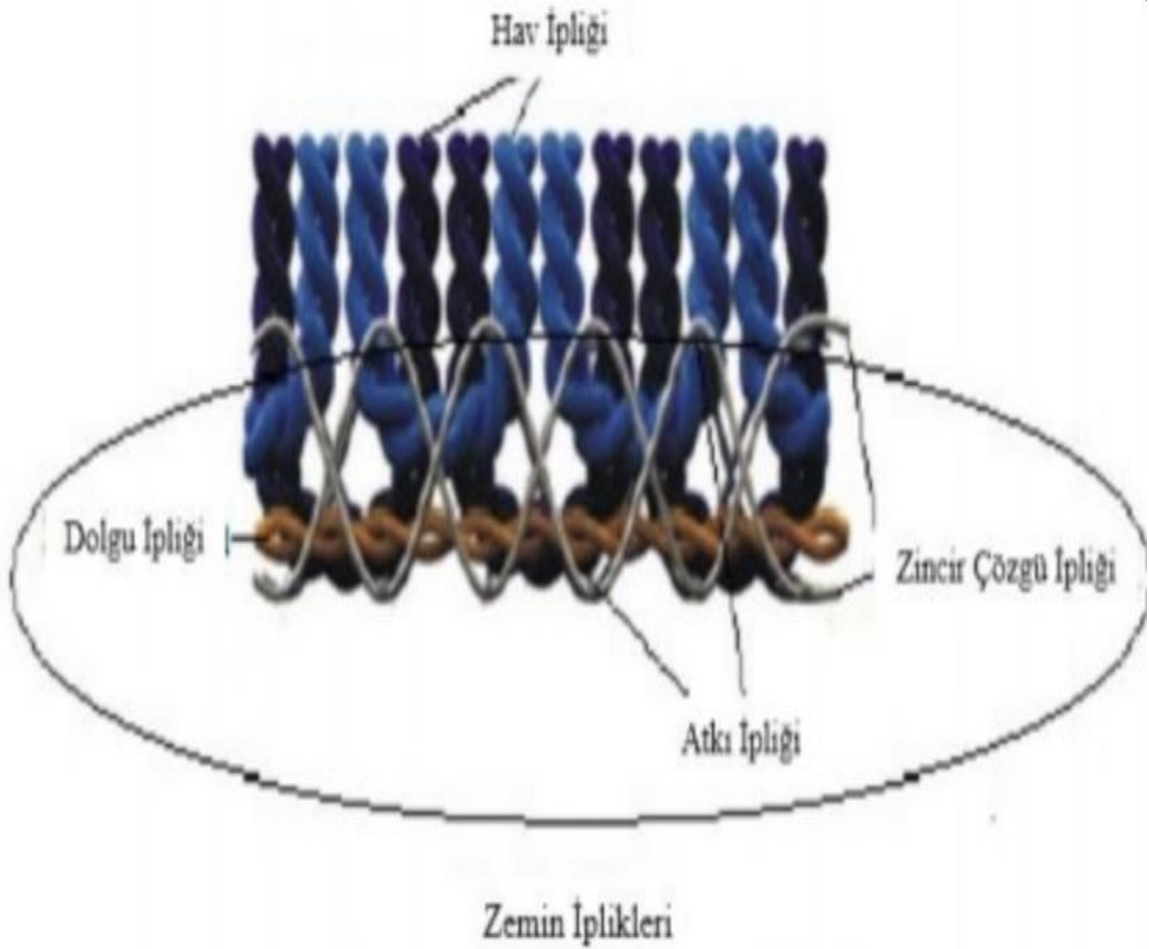
Çalışmanın yapıldığı kuruluş uzun yıllar boyunca sektörde önde gelen, yurtdışında 24 ülkeye ihracat sağlayan ve yurtiçinde 2000'den fazla satış noktası olan büyük bir markadır. İşletme 16 dokuma tezgâh kapasiteli ve 40.000 m² lik bir alanda faaliyet gösteren tam entegre bir tesise sahiptir. Marka ulaşılabilirliği yüksek, geniş ürün gamı ve inovatif ürünleri ile sektörü yönlendiren güçlü bir marka olmayı hedefleme yolunda ilerlemektedir.

Halı dokuma işlemleri birbirinden farklı özellikte ve kapasitede halı dokuma tezgahlarında yapılmaktadır. Tezgahların tarak sıklığı, tezgâh eni, lansetli gibi birbirinden farklı özellikler bakımından birbirinden ayrılmaktadır. Bu yüzden üretim planlamaları bu uygunluklara göre yapılmaktadır.

İşletmede yer alan 16 dokuma tezgahına, farklı kalitelere gelen siparişlerin en doğru biçimde sıralanması ile birlikte yayılma zamanını minimize ederek yüksek maliyetleri oluşturan hazırlık sürelerini azaltabilmek, hammadde tedarikleri zamanında yapabilmek, kapasite planlamaları yapabilmek ve müşteriye hızlı geri dönüşleri yapabilmek öngörülmüştür. Ayrıca dokuma tezgahlarındaki şeritlerin içerisindeki halıların yerleşimi kararı da çizelgeleme problemi içerisinde dikkate alınmıştır. Şerit içerisine yerleştirilen halıların optimizasyonu ile, fire miktarlarının da azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca şerit uzunluğu ve genişliği makinenin işi tamamlama zamanını belirleyen unsurlardır. Her bir makinedeki işlerin tamamlanma zamanları hem hazırlık sürelerine hem de şeritlere ait en ve boy değerlerine bağlıdır. Bu durumda hem paralel halı dokuma tezgahlarının çizelgelenmesi hem de tezgahlarda dokunacak olan halıların yerleştirilmesinin yapılacağı şerit paketleme problemleri aynı anda ele alınmıştır.

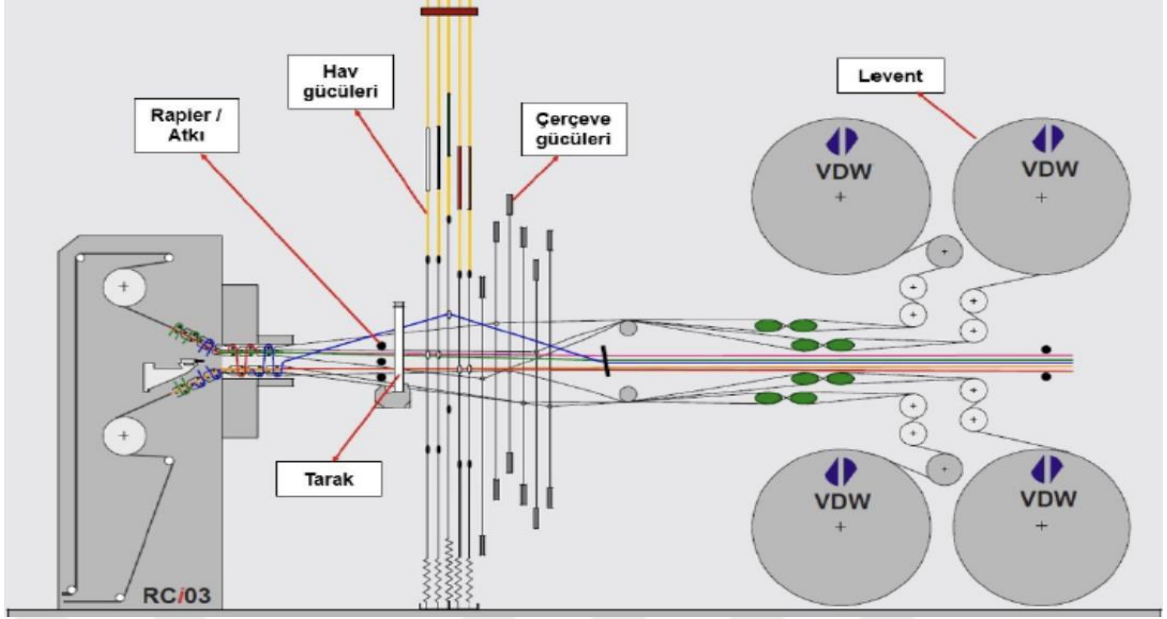
Şekil 5.6'da bir halı üretim süreci genel hatları ile özetlenmiştir. Çözümlenen iplikleri üzerine hav/desen ipliği ile değişik şekillerde sabitlenerek aralarından atkı ipliği geçirilerek sıkıştırılan aynı yükseklikte ya da efekt amaçlı farklı yüksekliklerde kesilmiş

olan havlı ya da bukleli görünümü olan tekstil yapısına halı denir. Halı atkı, çözgü ve hav ipliklerinden oluşan bir yapıya sahiptir. Zemin yapısını atkı iplikleri ve çözgü iplikleri oluşturur. Deseni hav iplikleri oluşturmaktadır. Şekil 5.1’ de görüldüğü üzere bir halıyı oluşturan iplikler ve genel yapısı verilmiştir.

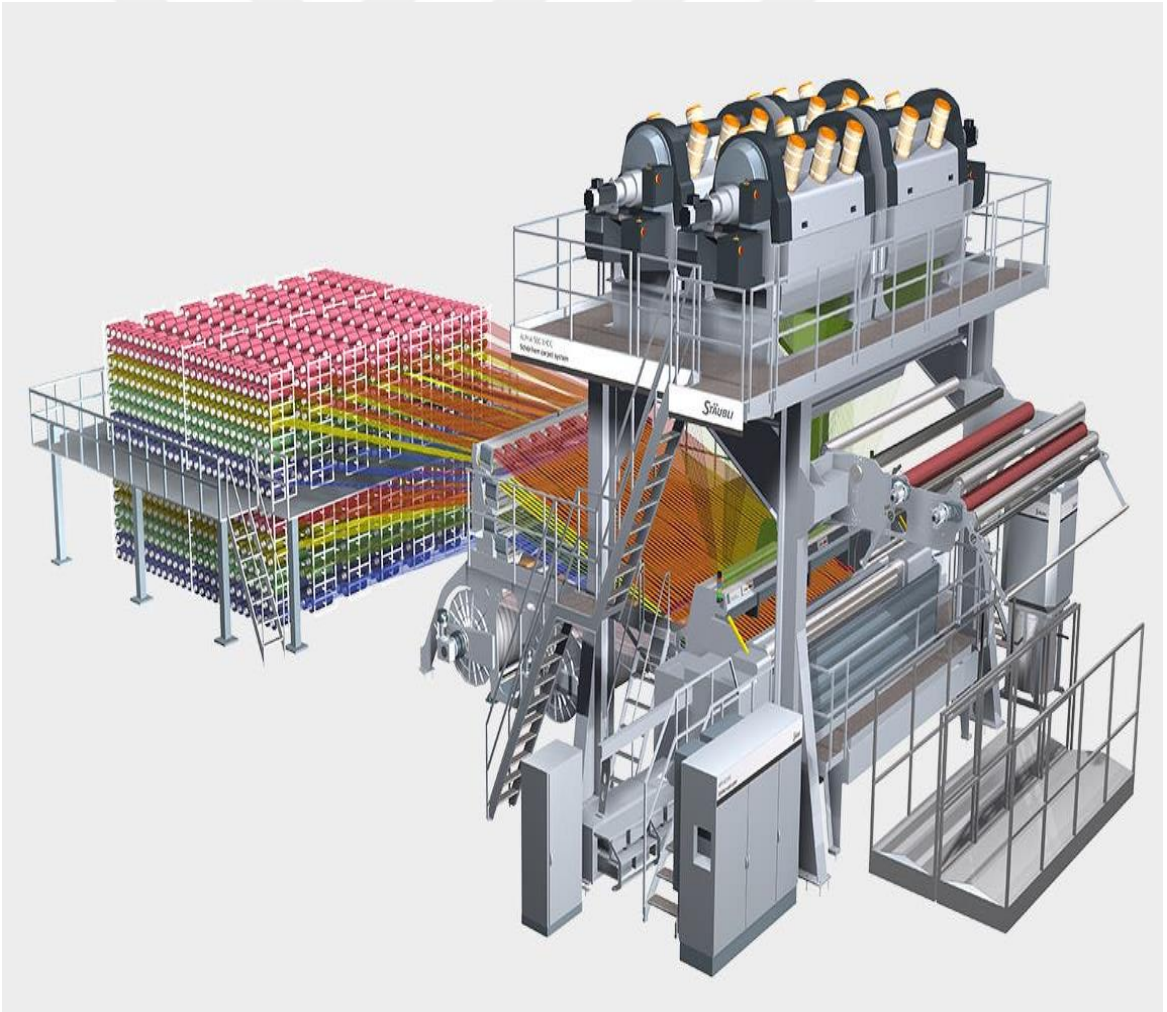


Şekil 5.1. Halının yapısı

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de görüldüğü üzere bir halı dokuma tezgâhı ve arkasında cağlık denilen kısım üzerinde hav ipliklerini yani deseni oluşturan renkli binlerce bobin bulunmaktadır. Üst kısmında tezgâhın beyini olarak tabir edebileceğimiz jakarlar bulunmaktadır. Üretilmesi istenen halı işleme alındığında tezgâhta atkı, çözgü ve hav ipliklerin birbiri arasında bir örgü yaparak halının yapısı oluşturur. Üretilen halılar makinenin ön kısmındaki halı arabalarına alt ve üst şeklinde stoklanır.

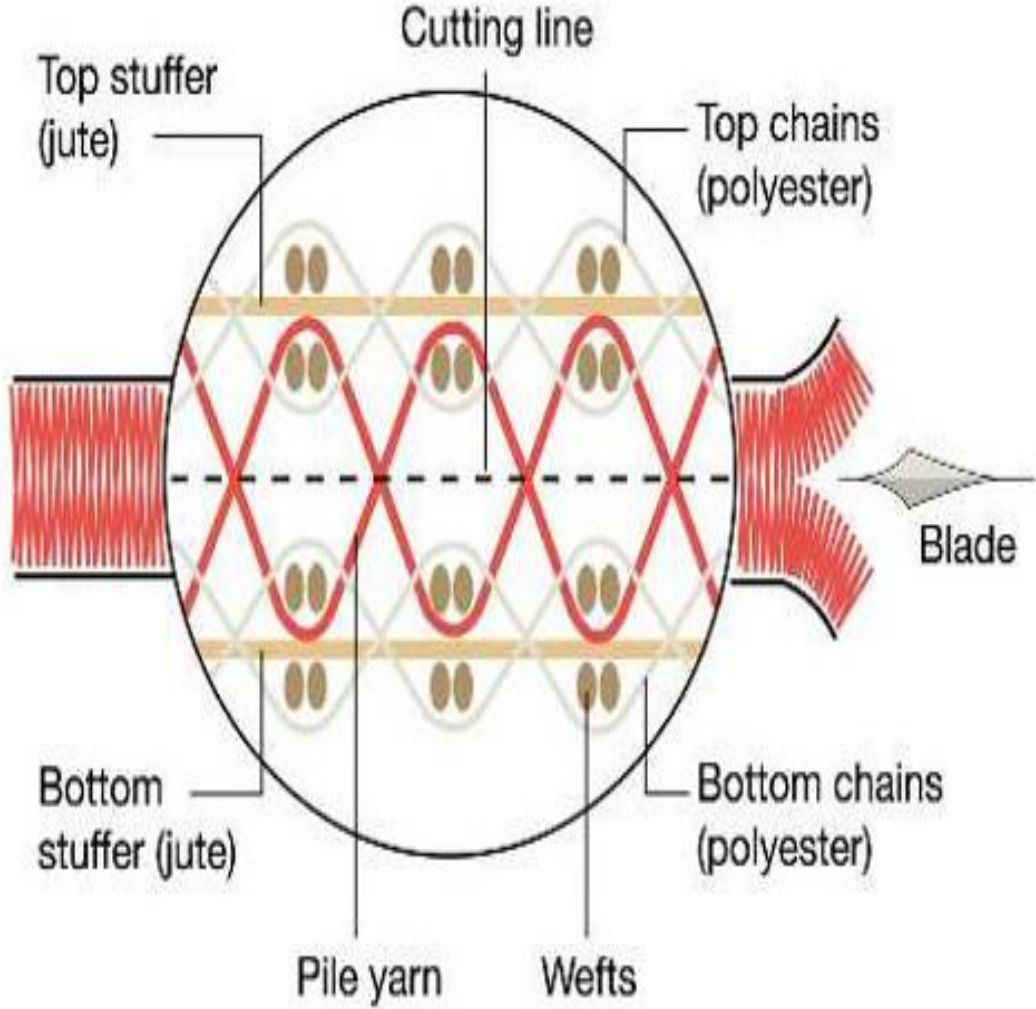


Şekil 5.2. Halı dokuma tezgâhı teknik görünüm



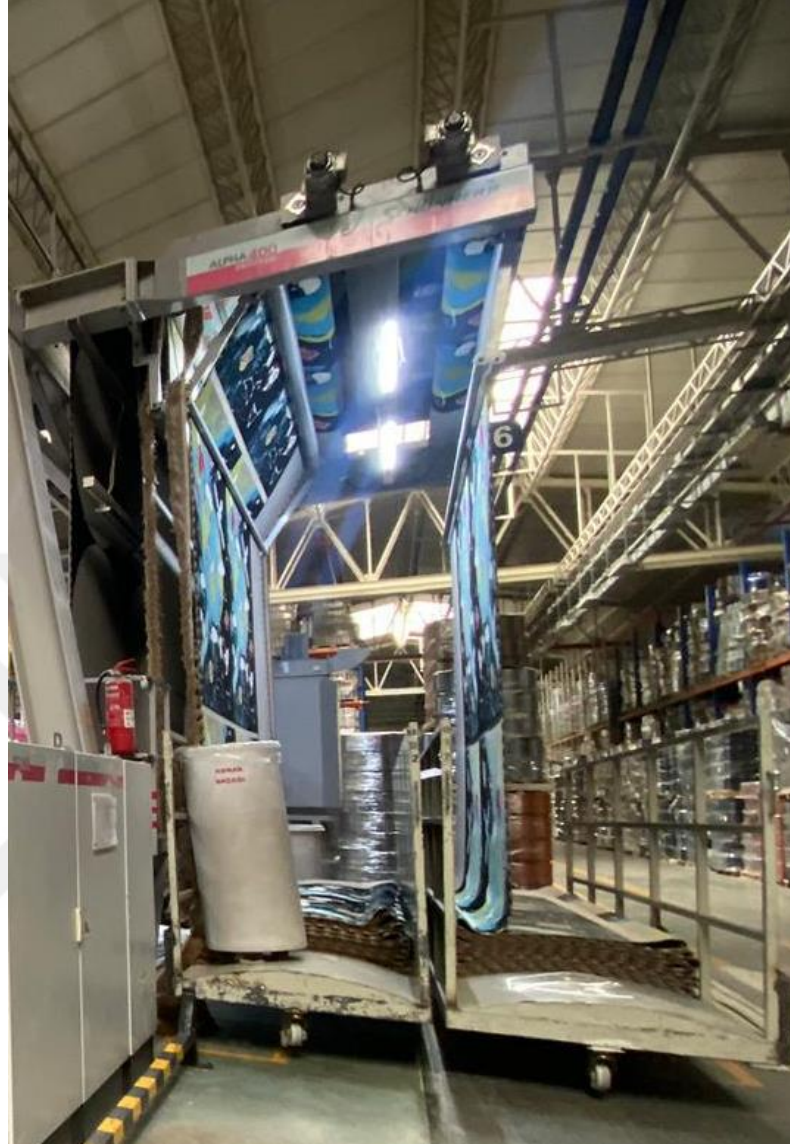
Şekil 5.3. Halı dokuma tezgâh genel görünüm

İşletmede Wilton tipi yüz yüze dokuma (face to face) tekniği kullanılmaktadır. Bu teknik makine halı dokumacılığında en yaygın yöntemlerden birisidir. Şekil 5.4’de görüldüğü üzere yüz yüze tekniği ile birim zamanda aynı anda iki halı dokunur ve bu halılar makine içerisindeki bir bıçak sayesinde ortadan ikiye ayrılır. Simetrik olarak iki halı ortaya çıkmış olur. Bu yüzden ki üretim hızı diğer yöntemlere göre daha yüksektir.



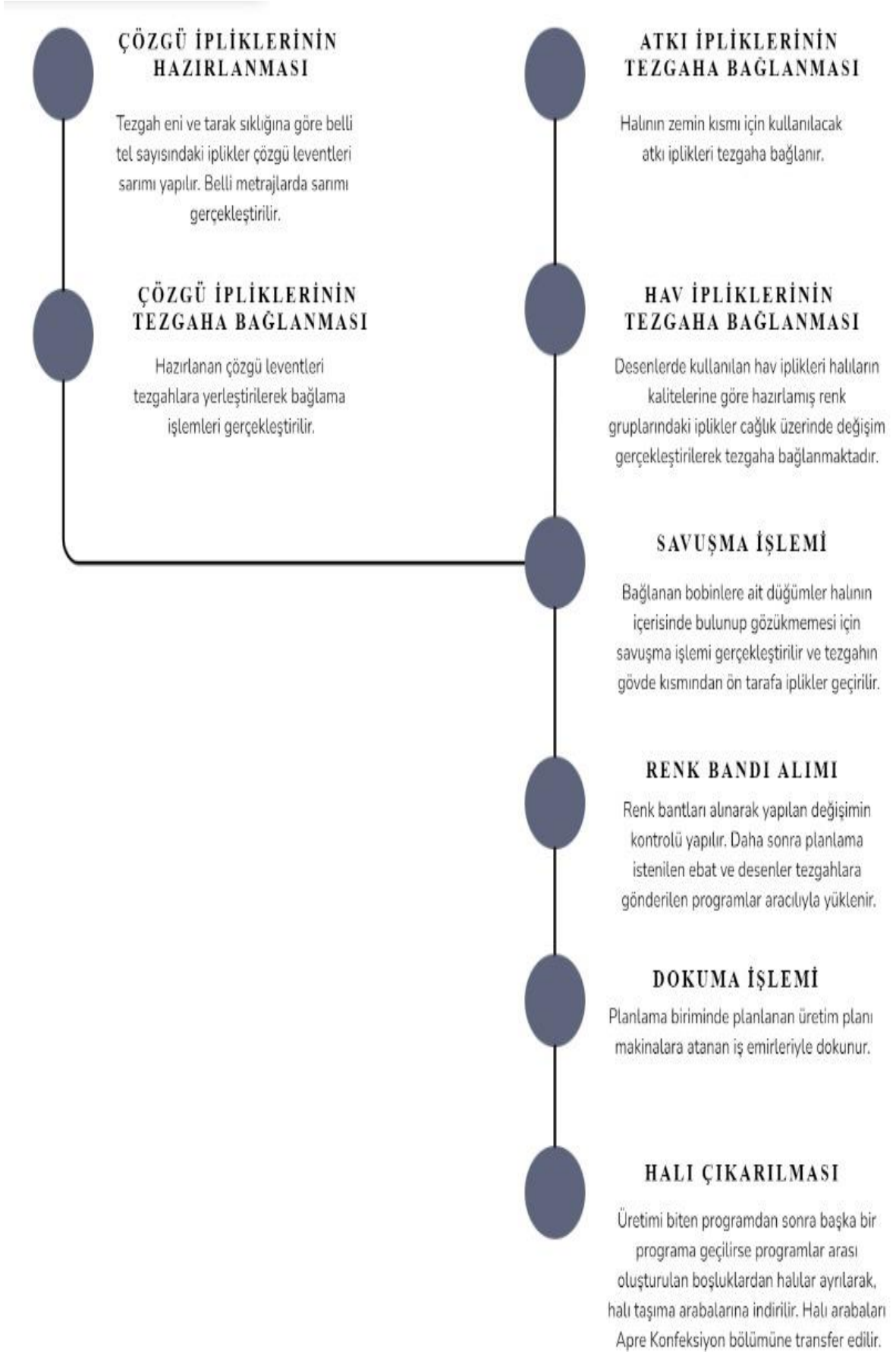
Şekil 5.4. Yüz yüze dokuma tekniği

Şekil 5.5’de görünen üretim sürecinde yüz yüze dokunmuş bir halı ikizi ile birlikte üretilmektedir. Bu aynı şerit paketleme düzeni (halı yerleşim planından) iki tane bulunmakta olduğu ve şeridin her seferinde dokuma tezgahı tarafından keskin bir bıçak kullanılarak ortadan ikiye bölerek aynı halıyı ikizi ile birlikte üretmesine neden olmaktadır. Bu durum matematiksel model tasarımı için önemli bir husustur.



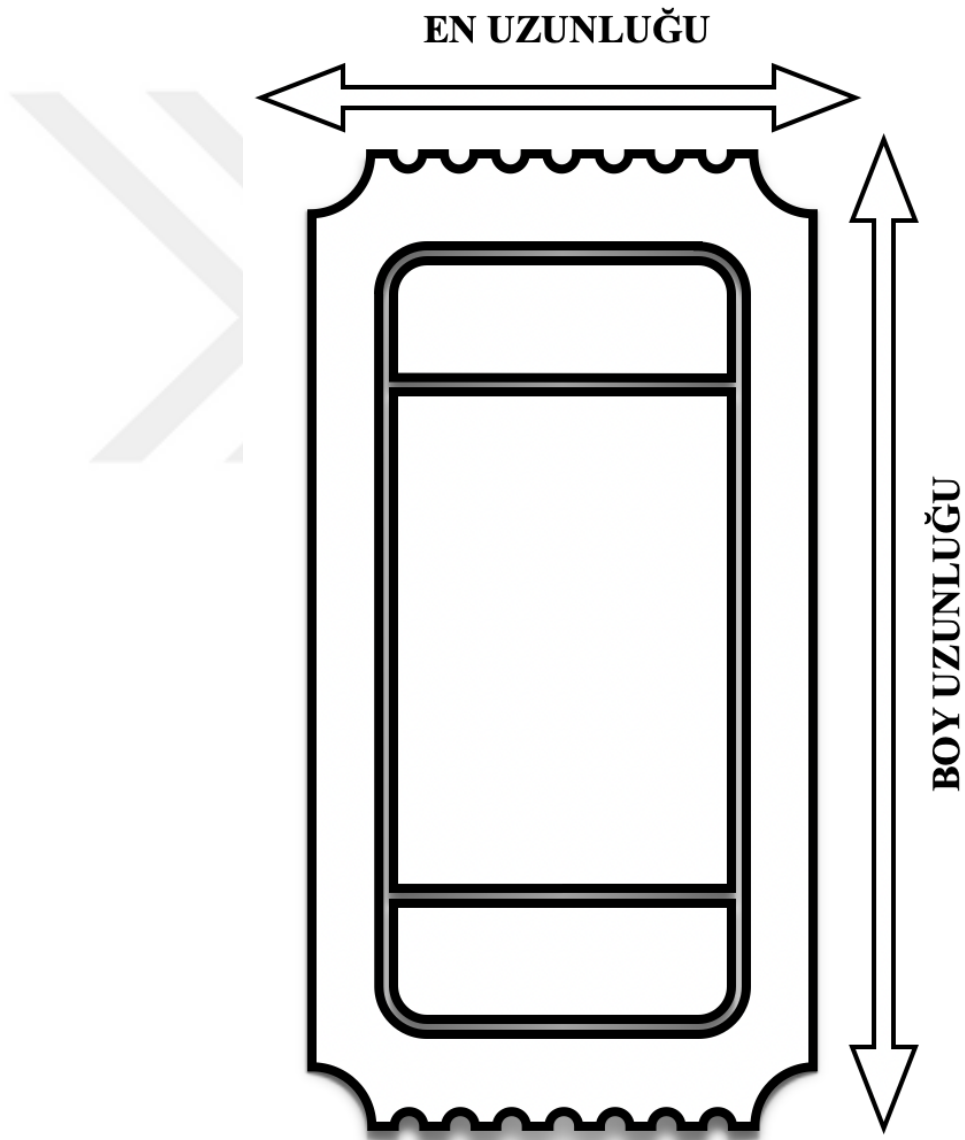
Şekil 5.5. Halının ikizi ile birlikte üretilmesi

Planlama birimi üretilen olan ürünleri planlar ve dokuma tezgahlarına aktarım sağlar. Dokuma tezgahlarında ürünlerde kullanılması istenilen atkı, çözü ve hav ipliğine göre değişim adı verilen süreç başlatılır. Değişim sonrasında oluşan düğümlerin halı içerisinde kalmaması ve değişen ipliklerin tarağa gelebilmesi için savuşma adı verilen süreç gerçekleştirilir. Kalite için belirlenen atkı sıklığı ve hav yüksekliğinde dokunarak, apre konfeksiyon işlemleri için makinadan çıkarılır. Şekil 5.6'daki şemada halı üretimi için önce çözü leventlerinin hazır edilmesi ardından atkı ve hav ipliklerinin tezgâha bağlanması gerekmektedir. Binlerce bobinden gelen iplikler dokuma tezgahına bağlanır. Arıdan gerekli ayarlamalar yapılarak dokuma süreci başlar.



Şekil 5.6. Halı üretim süreci

Halı üretimi eni ve boyu olan dikdörtgen ebat şeklinde gerçekleştirilmektedir (Şekil 5.7). Siparişlerde yer alan ebatların nasıl yerleştirildiği hem şeride ait boy ve en ölçülerini etkilemektedir. Belirli bir hızda dokuma gerçekleştiren tezgâh için bu uzunluklar işlem süresini ne kadar süreceğini belirlemektedir. Halı siparişlerinin toplam metrekaresi yani dokunacak halı miktarı şeridin boyu ne olursa olsun değişmeyecektir. Fakat şeride halılar iyi yerleştirilmez ise şerit üzerinde dokuma yapılmayacak boş alanlar oluşacaktır. Bu boş alanlara sadece atkı ipliği (zemin dokuması) yapılacaktır. Bu durum da fire miktarlarının artmasını ve verimsiz üretim yapılmasına sebebiyet verecektir.



Şekil 5.7. Halı en ve boy gösterimi

- Şerit Optimizasyonundan Dolayı Zorunlu Fireli Üretim

Yapılan halı yerleştirme optimizasyonda, halı üretim süreçlerinden dolayı şeridin eninin ve boyunun halı üretim süreçlerinden dolayı boşluklar kalabilmektedir. Bu yüzden boşluklu yani sadece atkı ve çözgü ipinden oluşan, hav ipliği olmayan bir dokuma yapılmaktadır. Boşluklu dokuma yapmak, halının dokunduktan sonraki işlemleri olan apre konfeksiyon gibi süreçlerinde hatalı üretime sebebiyet vermesi, üretim kaybı yaşatması ve düzeltmek için ekstra iş gücü harcanmasına sebebiyet vermektedir.

Halı yerleşimleri sonucunda eğer bir boşluk var ise verimli bir üretim yapmak için bu boşluğun bir hav ipliği ile doldurulması gerekmektedir. Hav ipliği ile doldurulan boşluklar dokuma sonrası kesilerek, farklı süreçlerde kullanılmakta ya da hurda niteliğinde değerlendirilmektedir. Bu miktarın artması, işletme açısından maliyetlerin artmasına neden olmaktadır.

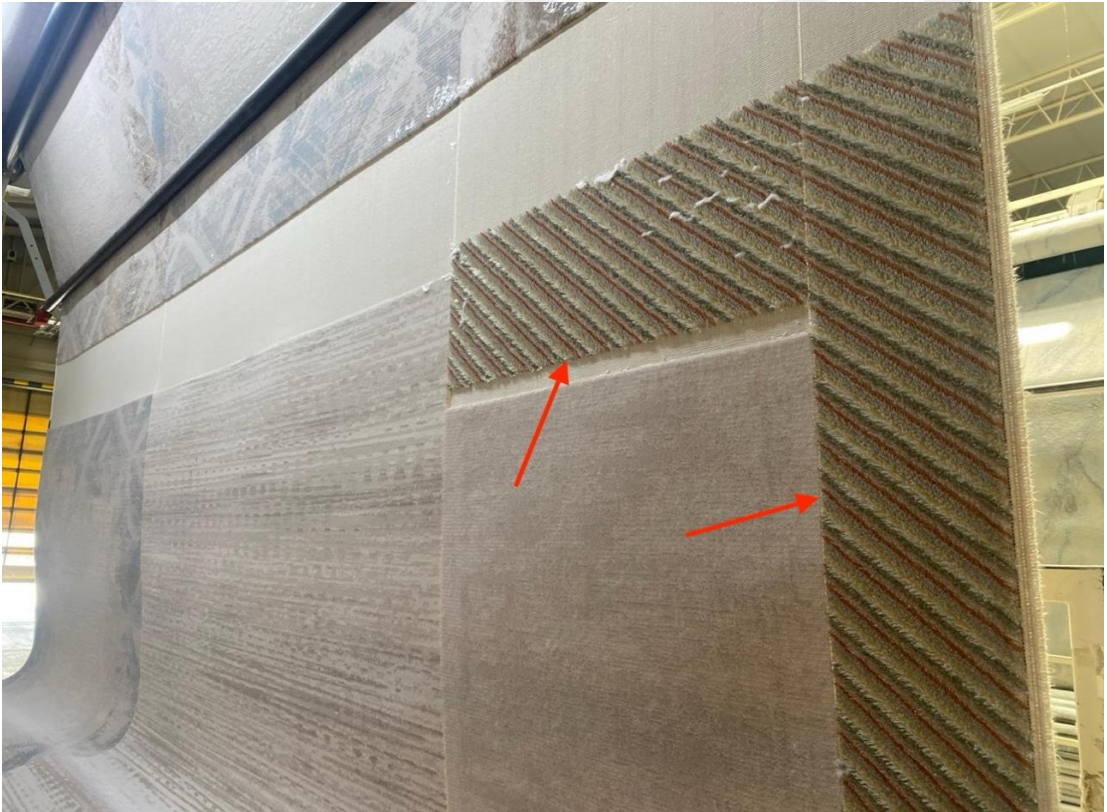
Şekil 5.9'da görüldüğü üzere halı yerleştirmeleri yapılarak üretim şeridi oluşturulmuştur. 3 farklı en ve boy ebadında halının üretildiği görülmektedir. En sağ kısımda kalan alan en kısmını tamamlamak için yapılmış bir boşluk doldurmadır. Fire olarak nitelendirilmektedir. Halı niteliği taşımamaktadır.



Şekil 5.8. Üretim firesi



Şekil 5.9. Fireli halı üretimi yapılmış halı şeridi



Şekil 5.10. Fireli üretim yapılmış halı şeridi 2



Şekil 5.11. Fireli üretim yapılmış halı şeridi 3



Şekil 5.12. Boşluk doldurma yapılan fire kısım

İyi bir şerit optimizasyonu halı ebatlarının iyi bir şekilde yerleştirilmesi, hem enlerden hem de boylardan fire olmamasıyla elde edilir. şerit optimizasyonu iyi yapıldığı durumlarda bile fire dokuma olabilir. Fakat üretim sistemlerinde planlama yapılırken maliyetlerin en aza indirilmesi için fire miktarları azaltılmak zorundadır.



Şekil 5.13. Firesiz yerleştirme yapılmış halı şeridi



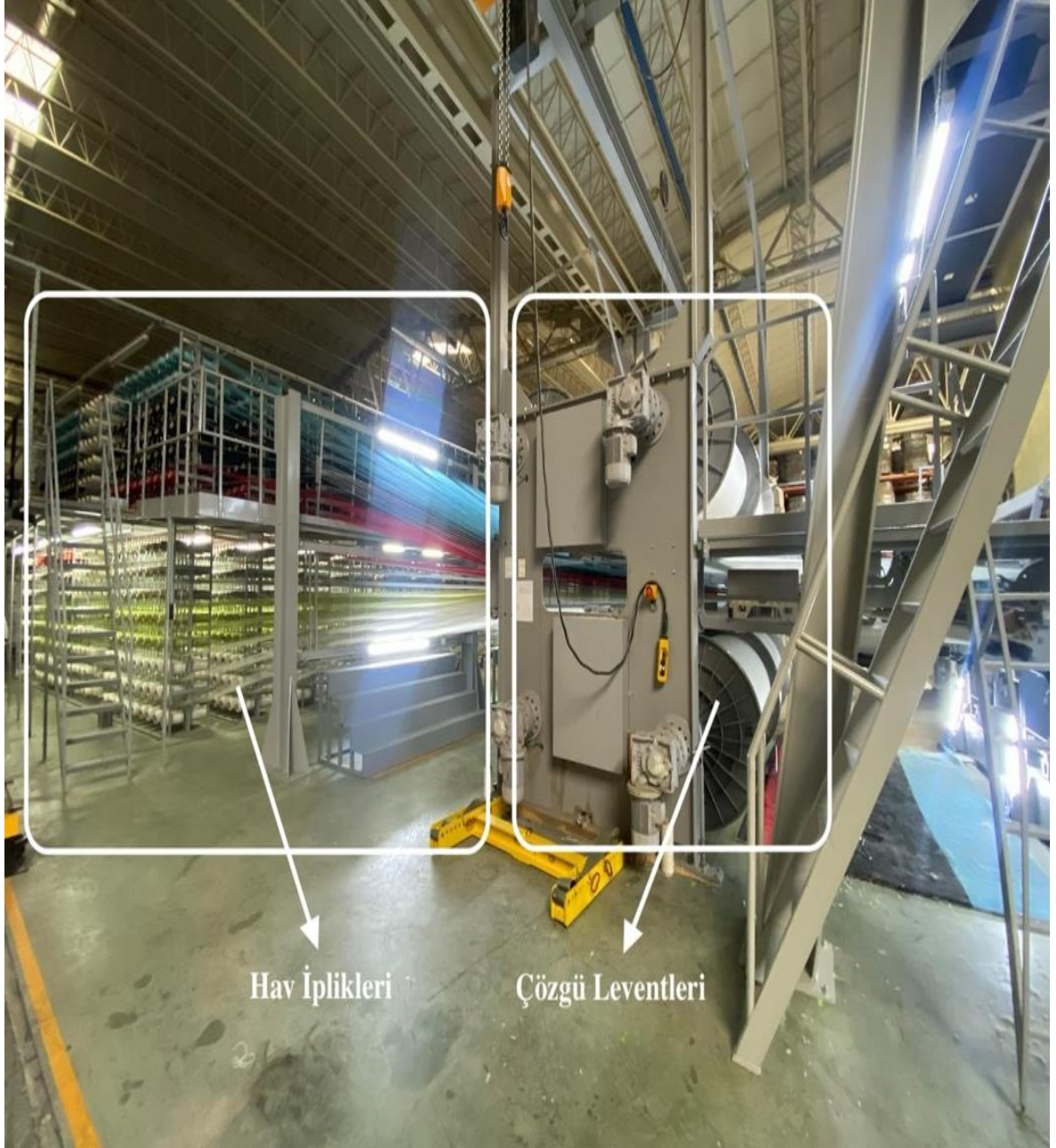
Şekil 5.14. Firesiz yerleştirme yapılmış halı şeridi 2



Şekil 5.15. Firesiz yerleştirme yapılmış halı şeridi 3

Şekil 15.5’de halı yerleştirme optimizasyonu iyi yapılmış bir şerit bulunmaktadır. 3 farklı en ve boy ebadına sahip halılar firesiz bir şekilde yerleştirilerek üretim yapılmaktadır.

Birim alana zemin ve halı dokumanın birim zamanı, sadece zemin dokumanın birim zamanından belirgin bir farklılık içermemektedir. İşlem süreleri de direk olarak işlere ait tamamlanma zamanlarını etkilemektedir. Bu nedenle iyi yerleştirilmemiş bir şerit, şerit boyunun uzamasına, işlem süresinin artmasına ve fire dokuma yaparak maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Bu durumda makinelerin etkin kullanılabilmesi için hem üretilecek şeritler içerisindeki yerleşim dikkate alınmıştır.



Şekil 5.16. Dokuma tezgahında ipliklerin konumu

Çalışmada iki aşamalı olarak matematiksel model birbiriyle uyumlu hale getirilerek tek bir model oluşturulmuştur. İki farklı model için literatürdeki matematiksel modeller verilmiştir.

5.1.Paralel Makine Çizelgeleme Problemi

Ele alınan asıl problem için sıra bağımlı hazırlık süreleri ve makinelere uygunluk kısıtlarının olduğu paralel makine çizelgeleme problemidir. Bu probleme uyarlanan paralel makine çizelgeleme problemi matematiksel model verilmiştir (Gokhale ve Mathirajan [49]).

Kümeler

j : iş indisi $\in 1,2,3, \dots, n$

k : makine indisi $\in 1,2,3, \dots, m$

Parametreler

r_j : j işine ait atöyeye geliş zamanı

w_j : j işlerinin ağırlıkları

p_j : j işinin işlem süresi

s_{ij} : i işinden sonra gelen j işi için katlanılacak hazırlık süresi

e_{jk} : k makinesi j işine uygunsa 1, değilse 0

Karar Değişkenleri

X_{ijk} : j işi k makinesinde i işinden sonra atanıyorsa 1, atanmıyorsa 0

C_j : j işinin tamamlanma zamanı

$$\text{minimize } \sum_{j=m+1}^{m+n} w_j * (C_j - r_j)$$

(1)

subject to:

$$P_{ijk} = s_{ij} + p_j + (BigM) * (1 - e_{ik}) + (BigM) * (1 - e_{jk}) \quad (2)$$

$$\forall i \in J, \forall j \in J\{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M$$

$$C_i + \sum_{k=1}^m (P_{ijk} X_{ijk}) + (BigM) * \left(\sum_{k=1}^m X_{ijk} - 1 \right) \leq C_j \quad (3)$$

$$\forall i \in J, \forall j \in J\{1, 2, \dots, m\}$$

$$r_j + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{k=1}^m (P_{ijk} X_{ijk}) \leq C_j \quad \forall j \in J\{1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{k=1}^m X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J\{1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

$$\sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^m X_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in J \quad (6)$$

$$\sum_{a=1}^{m+n} X_{ajk} + \sum_{b=m+1}^{m+n} \sum_{h \in M/\{k\}} X_{jbh} \leq 1 \quad \forall j \in J\{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M \quad (7)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in J, \forall j \in J\{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M \quad (8)$$

Amaç fonksiyonu (1) işlere ait ağırlıklı tamamlanma zamanlarını en küçükleme içindir. Kısıt (2), belirli bir makinede belirli bir işi hemen takip eden bir işin işlem süresini (kurulum süresi dahil) gösteren bağımlı değişkenin değerini türetmek için kullanılır. Kısıt (3), bir işin tamamlanma süresini hesaplamak için kullanılır ve makinelerde işlerin birbirini takip etmesini sağlar. Kısıt (4), bir işin makinede tamamlanma süresinin, işin serbest bırakılma süresi ile mevcut işin işlem süresinin (hazırlık süresi dahil) toplamından az olmamasını sağlar. Kısıt (5), atama kısıtlamasıdır ve mevcut tüm n işin yalnızca bir

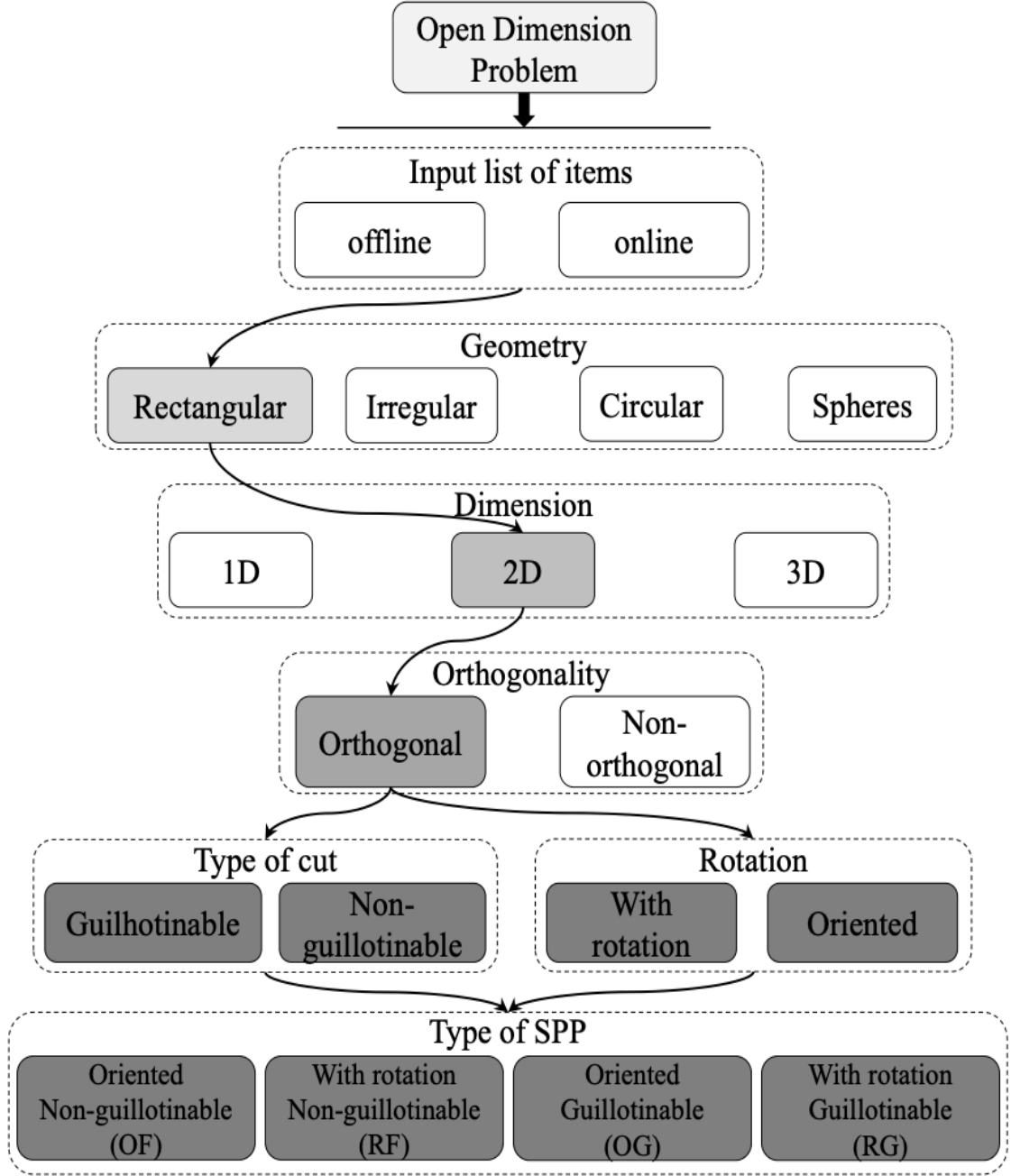
makinede işlenmesini ve hemen ardından yalnızca bir işin gelmesini sağlar. Kısıt (6), herhangi bir işin en fazla bir ardılının olabildiğini sağlar. Kısıt (7), mevcut bir işin belirli bir makinedeki bir işi başarması durumunda, bu işin geri kalan makinelerin herhangi birindeki başka bir işin hemen önüne geçemeyeceği koşulunu ele alır. Son olarak kısıt (8) karar değişkenine ikili değerler atar.

5.2. Şerit Paketleme Problemi

İki boyutlu şerit paketleme probleminde temel amaç, sabit bir genişliğe ve sonsuz boyuta sahip bir şerit içerisine, bir dizi daha küçük dikdörtgenin tümünün yerleştirilerek şeridin yüksekliğini en aza indirirken tüm öğeleri üst üste gelmeden paketlemektir. Bu amaçla beraber fire miktarlarının da en küçüklenmesi ile ilgili problem tipleri de mevcuttur. Mevcut problemimiz de bu kapsam içerisinde yer almaktadır. Birçok endüstri alanında kullanılmaya başlanan bu problem farklı sınıflara sahiptir. Şerit paketleme problemi, Wäscher vd. [50] tarafından verilen tipolojiye göre aynı zamanda açık boyut problemi olarak da sınıflandırılmaktadır.

Şerit paketleme ile ilgili ilk makaleler 1980'li yılların başında yayınlanmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarla endüstriyel üretim süreçlerinde firelerin azaltılması hedeflenmiştir. Bu hedef özellikle metal ve mekanik sektörlerinde işletme maliyetleri ve hammadde geri dönüşümleri konusunda büyük katkılar sağlandığı gözlemlenmiştir. Genel olarak bu problem kâğıt rulosu ve sac rulo kesimleri, tekstil ve ahşap üretimlerinin planlamalarında kullanılmaktadır. Bahsi geçen sektörlerde şerit şeklinde üretim olup, işletme ve hammadde maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı minimum fire ile çalışmak istenmektedir.

Şerit paketleme problemlerini çözmek için kesin yöntemler, sezgisel algoritmalar, yaklaşım algoritmaları ve hibrit yaklaşımlar gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır.



Şekil 5.17. Şerit Paketleme Problemi Sınıflandırması (Oliveira vd.[51])

Bu probleme uyarlanan iki boyutlu şerit paketleme problemi için matematiksel model verilmiştir. (Bezerra vd. [51])

j : paketlenecek eşya indisi ($j \in 1,2,3, \dots, n$)

k : paketleme seviyesi ($k \in 1,2,3, \dots, n$)

x_{jk} : eğer eşya j seviye k 'ya paketlenirse 1, diğer türlü 0

y_k : k seviyesinin yüksekliğini ifade eden sürekli karar değişkeni

w_j : eşya j 'nin genişliği

h_j : eşya j 'nin yüksekliği

H : şerit yüksekliği

W : şerit genişliği

$$\text{minimize } H \quad (9)$$

$$\sum_k^n y_k \leq H \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j x_{jk} \leq W \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{jk} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$h_j x_{jk} \leq y_k \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

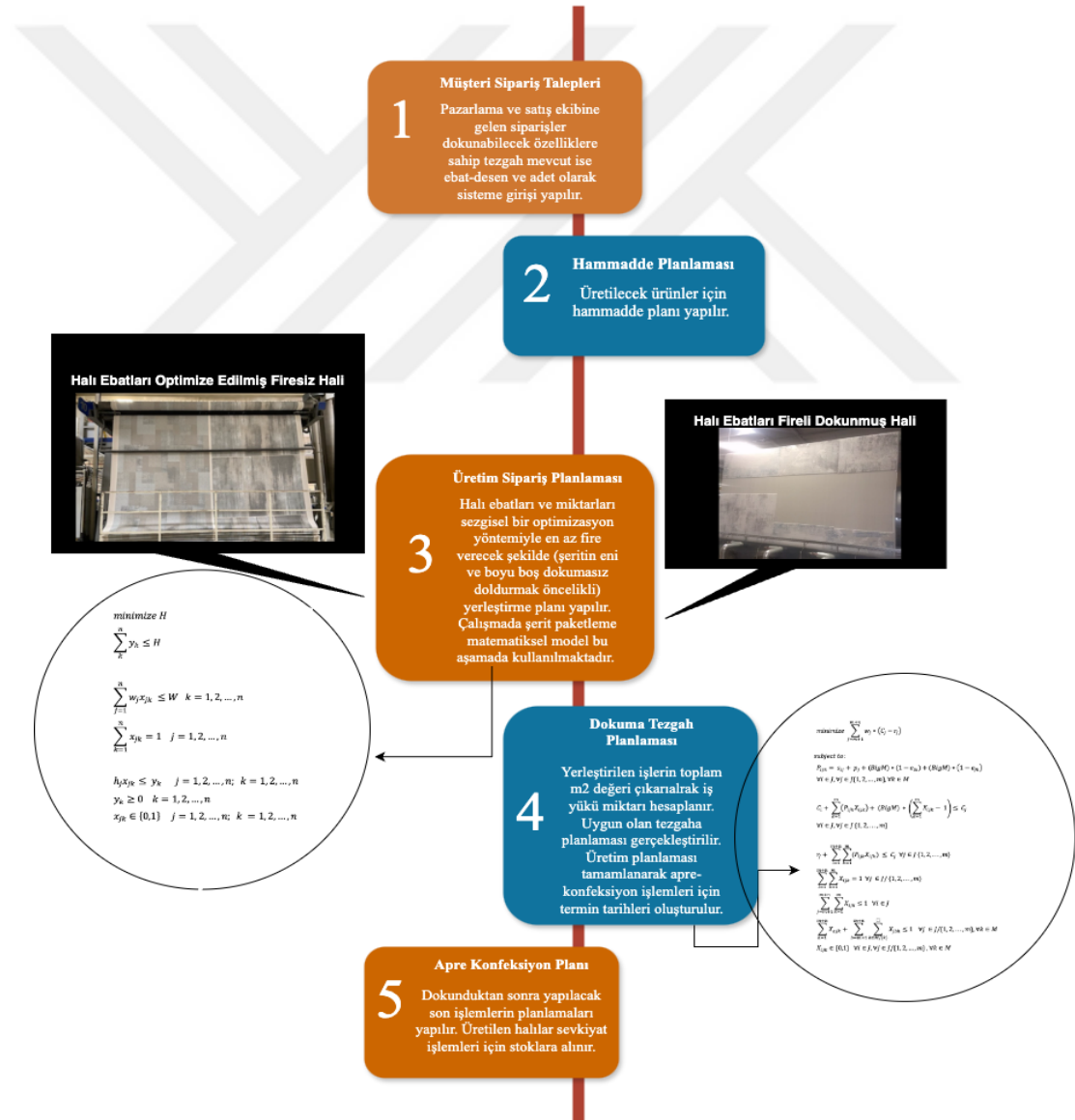
$$y_k \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$x_{jk} \in \{0,1\} \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

Amaç fonksiyonu (9), şeridin kullanılan yüksekliğini en aza indirir. Şeridin yüksekliği H , kısıt (10)'da tanımlanmıştır. Kısıt (11), seviyelerin genişliği şerit genişliğini aşamaz olduğunu garanti altına alır. Kısıt (12), her bir öğenin tam olarak bir kez paketlenmesini sağlar (bir seviye başlatılarak veya başka bir öğe tarafından başlatılan bir düzeyde). Eşitsizlik (13), k düzeyindeki y_k yüksekliğinin düzeydeki öğelerin yüksekliğinden küçük olmamasını sağlar. Kısıtlar (14) ve (15) değişkenlerin tanım kümesini tanımlar.

6. ÇÖZÜM YAKLAŞIM ÖNERİLERİ

Problem için iki farklı yöntem ile uygun çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Tek aşamalı matematiksel model, hem paralel makine çizelgeleme kısıtları hem de sipariş ve ebatları için iki boyutlu şerit paketleme kısıtları uyarlanmış ve beraber çalıştırılarak optimum bir sonuç elde etmektedir. Şekil 6.1’de gelen bir siparişin nasıl karşılandığının özeti ve çözüm önerilerin hangi adımlar için kullanıldığı ve hangi adımları iyileştirmesi beklendiği verilmiştir.



Şekil 6.1. Bir müşteri siparişinin karşılanma adımları

İki aşamalı matematiksel model de ise siparişler ve ebatlar için öncelikle şerit paketleme kısıtları çalışmakta ve oluşan en iyi şeridin makinelere atanarak paralel makine çizelgeleme kısıtlarının çalışarak optimum bir sonuç elde etmektedir.

6.1. Tek Aşamalı Çözüm Yöntemi ve Matematiksel Model

Bahsi geçen tüm girdiler tek seferde göz önüne alarak işlere ait işlem sürelerin, tamamlanma zamanlarının, iş sıralamasının tek seferde çözüldüğü hem paralel makine hem de iki boyutlu şerit paketleme kısıtlarının kullanıldığı tek bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu matematiksel model de problemin ihtiyaçlarına göre karar değişkenleri birbirleri ile uyumlu olacak şekilde birleştirilmiştir.

Kümelere

j : iş indisi $\in 1,2,3, \dots, n$

k : makine indisi $\in 1,2,3, \dots, m$

h : paketlenecek eşya indisi ($h \in 1,2,3, \dots, H$)

Parametreler

h_j : j siparişi içerisindeki halılar

l : paketleme seviyesi ($l \in 1,2,3, \dots, L$) $L = \max_j(|J_h|)$

l_j : paketleme seviyesi ($l_j \in 1,2,3, \dots, |J_h|$)

MW_k : k makinesinin genişliği

r_j : j işine ait atöyeye geliş zamanı

f_j : j işine ait amaç fonksiyonu ağırlığı

s_{ij} : i işinden sonra j işinin işlenebilmesi için işlem zamanı

e_{jk} : eğer k makinesi j işini işlemeye uygunsa 1, diğer türlü 0

u_j : j siparişinin ortalama dokuma hızı

Karar değişkenleri

p_j : j işine ait işlem zamanı

x_{ijk} : eğer j işi i işinden hemen sonra k makinesinde işlenirse 1, diğer türlü 0

C_j : j işine ait işlem zamanı

P_{ijk} : j işinin i işinden sonra k makinesindeki (hazırlık süresi dahil) işlem süresi

Q_{hlj} : eğer j siparişinin h eşyası seviye l 'ye paketlenirse 1, diğer türlü 0

y_{jl} : j siparişinin l seviyesinin yüksekliğini ifade eden sürekli karar değişkeni

$width_h$: eşya h 'nin genişliği

$height_h$: eşya h 'nin yüksekliği

H_j : j siparişinin şerit yüksekliği

W_j : j siparişinin şerit genişliği

$$\text{minimize } \sum_{j=m+1}^{m+n} f_j * (C_j - r_j) \quad (16)$$

$$P_{ijk} = s_{ij} + p_j + (BigM) * (1 - e_{ik}) + (BigM) * (1 - e_{jk}) \quad (17)$$

$$\forall i \in J, \forall j \in J/\{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M$$

$$C_i + \sum_{k=1}^m (P_{ijk} X_{ijk}) + (BigM) * \left(\sum_{k=1}^m X_{ijk} - 1 \right) \leq C_j \quad (18)$$

$$\forall i \in J, \forall j \in J/\{1, 2, \dots, m\}$$

$$r_j + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{k=1}^m (P_{ijk} X_{ijk}) \leq C_j \quad \forall j \in J \setminus \{1, 2, \dots, m\} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{k=1}^m X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J \setminus \{1, 2, \dots, m\} \quad (20)$$

$$\sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^m X_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in J \quad (21)$$

$$\sum_{a=1}^{m+n} X_{ajk} + \sum_{b=m+1}^{m+n} \sum_{h \in M \setminus \{k\}} X_{jbh} \leq 1 \quad \forall j \in J \setminus \{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M \quad (22)$$

$$W_j \leq \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{k=1}^m X_{ijk} MW_k \quad \forall j \quad (23)$$

$$p_j = H_j * W_j * u_j \quad \forall j \quad (24)$$

$$\sum_{l \in I_j} y_{jl} \leq H_j \quad \forall j \quad (25)$$

$$\sum_{h \in h_j} \text{width}_h Q_{hlj} \leq W_j \quad \forall l, \forall j \quad (26)$$

$$\sum_{l=1}^n Q_{hlj} = 1 \quad \forall h \in h_j, \forall j \quad (27)$$

$$\text{height}_h Q_{hlj} \leq y_{jl} \quad \forall h \in h_j, \quad \forall l \in I_j, \quad \forall j \quad (28)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in J, \forall j \in J \setminus \{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M \quad (29)$$

$$Q_{hlj} \in \{0,1\} \quad \forall h \quad \forall l \quad \forall j \quad (30)$$

$$y_{jl} \geq 0 \quad \forall l \in l_j, \quad \forall j \quad (31)$$

$$P_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in J, \quad \forall j, \quad \forall k \quad (32)$$

$$C_j \geq 0, \quad \forall j \quad (33)$$

$$p_j \geq 0, \quad \forall j \quad (34)$$

$$H_j \geq 0, \quad \forall j \quad (35)$$

$$W_j \geq 0, \quad \forall j \quad (36)$$

Amaç fonksiyonu (16) işlere ait ağırlıklı tamamlanma zamanlarını en küçükleme içindir. Kısıt (17), belirli bir makinede belirli bir işi hemen takip eden bir işin işlem süresini (kurulum süresi dahil) gösteren bağımlı değişkenin değerini türetmek için kullanılır. Kısıt (18), bir işin tamamlanma süresini hesaplamak için kullanılır ve makinelerde işlerin birbirini takip etmesini sağlar. Kısıt (19), bir işin makinede tamamlanma süresinin, işin serbest bırakılma süresi ile mevcut işin işlem süresinin (hazırlık süresi dahil) toplamından az olmamasını sağlar. Kısıt (20), atama kısıtlamasıdır ve mevcut tüm n işin yalnızca bir makinede işlenmesini ve hemen ardından yalnızca bir işin gelmesini sağlar. Kısıt (21), herhangi bir işin en fazla bir ardılının olabilmesini sağlar. Kısıt (22), mevcut bir işin belirli bir makinedeki bir işi başarması durumunda, bu işin geri kalan makinelerin herhangi birindeki başka bir işin hemen önüne geçemeyeceği koşulunu ele alır. Kısıt (23), siparişinin şerit genişliğinin makine genişliğine eşit veya daha küçük (genişliği aşmamayı) olmasını sağlar. Kısıt(24), siparişin karşılanması için şerit yüksekliği ve genişliğinin işlem zamanı ile çarpımı sonucu, toplam işlem zamanının hesaplanmasını sağlar. Kısıt(25) tüm j siparişine ait olan tüm halı seviyelerinin toplamının halı şeridinin uzunluğundan daha küçük veya eşit olmasını garanti eder. Kısıt(26), sipariş içerisinde yer alan eşyaların enlerinin makine eninden daha küçük veya eşit olmasını sağlar. Kısıt(27), her siparişin bir seviyeye atanabilmesini sağlar. Kısıt(28) j siparişine ait ve üretilecek olan halı şeridindeki l'nin seviyesinin yüksekliğinin içerisine atanmış olan halıların yüksekliğinden daha büyük olacağını garanti altına alır. Kısıt(29) ve kısıt(30) karar değişkenine ikili değer atanmasını sağlar. Kısıt(31), kısıt(32), kısıt(33), kısıt(34), kısıt(35) ve kısıt(36) karar değişkenlerinin pozitif değer atanmasını sağlar.

6.2. İki Aşamalı Çözüm Yöntemi ve Matematiksel Model

Tek aşamalı modelin, büyük boyutlu problemler için çok karmaşık olması ihtimaline karşılık, iki aşamalı bir çözüm yöntemi hazırlanmıştır. Bu yöntemin ilk aşamasında iki boyutlu şerit paketleme problemi kısıtları ile tüm halı siparişleri için ile tüm makinelerdeki alternatif şeritleri ve işlem süreleri belirlenmesi hedeflenmiştir. İkinci aşamada ise paralel makine çizelgeleme kısıtları ile ilk aşamada elde edilen işlem sürelerini ve şeritleri parametre olarak kullanarak çözüm bulacaktır.

Aşama 1 – Şerit Paketleme Problemi

Kümeler

j : iş indisi $\in 1,2,3, \dots, n$

k : makine indisi $\in 1,2,3, \dots, m$

h : paketlenecek eşya indisi ($h \in 1,2,3, \dots, H$)

h_j : j siparişi içerisindeki halılar

l : paketleme seviyesi ($l \in 1,2,3, \dots, L$) $L = \max_j(|J_h|)$

l_j : paketleme seviyesi ($l_j \in 1,2,3, \dots, |J_h|$)

Parametreler

MW_k : k makinesinin genişliği

$width_h$: eşya h 'nin genişliği

$height_h$: eşya h 'nin yüksekliği

Karar değişkenleri

p_j : j işine ait işlem zamanı

Q_{hlj} : eğer j siparişinin h eşyası seviye l 'ye paketlenirse 1, diğer türlü 0

y_{jl} : j siparişinin l seviyesinin yüksekliğini ifade eden sürekli karar değişkeni

H_j : j siparişinin şerit yüksekliği

W_j : j siparişinin şerit genişliği

$$\min \sum_{j=1}^n P_j \quad (37)$$

$$W_j \leq \sum_{l=1}^{m+n} \sum_{k=1}^m X_{ijk} M W_k \quad \forall j \quad (38)$$

$$p_j = H_j * W_j * u_j \quad \forall j \quad (39)$$

$$\sum_{l \in I_j}^n y_{jl} \leq H_j \quad \forall j \quad (40)$$

$$\sum_{h \in h_j}^n \text{width}_h Q_{hlj} \leq W_j \quad \forall l, \forall j \quad (41)$$

$$\sum_{l=1}^n Q_{hlj} = 1 \quad \forall h \in h_j, \forall j \quad (42)$$

$$\text{height}_h Q_{hlj} \leq y_{jl} \quad \forall h \in h_j, \quad \forall l \in l_j, \quad \forall j \quad (43)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in J, \forall j \in J/\{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M \quad (44)$$

$$Q_{hlj} \in \{0,1\} \quad \forall h, \forall l, \forall j \quad (45)$$

$$y_{jl} \geq 0 \quad \forall l \in l_j, \quad \forall j \quad (46)$$

$$H_j \geq 0, \quad \forall j \quad (47)$$

$$W_j \geq 0, \quad \forall j \quad (48)$$

$$p_j \geq 0, \quad \forall j \quad (49)$$

İki aşamadan oluşan çözüm yönteminde, ilk aşaması olan şerit paketleme kısıtlarında p_j (Kısıt 37) değerleri bulunduktan sonra, Q_{nlj} ve p_j değerleri sabitlenerek aşağıdaki ikinci aşamadaki modele dahil edilir. Yukarıdaki tek aşamalı modelde karar değişkeni olan p_j artık bir parametredir ve aşağıdaki ikinci aşama modelinde parametre olarak kullanılır. Kısıt (38), siparişinin şerit genişliğinin makine genişliğine eşit veya daha küçük (genişliği aşmamayı) olmasını sağlar. Kısıt(39), siparişin karşılanması için şerit yüksekliği ve genişliğinin işlem zamanı ile çarpımı sonucu, toplam işlem zamanının hesaplanmasını sağlar. Kısıt(40) tüm j siparişine ait olan tüm halı seviyelerinin toplamının halı şeridinin uzunluğundan daha küçük veya eşit olmasını garanti eder. Kısıt(41), sipariş içerisinde yer alan eşyaların enlerinin makine eninden daha küçük veya eşit olmasını sağlar. Kısıt(42), her siparişin bir seviyeye atanabilmesini sağlar. Kısıt(43) j siparişine ait ve üretilecek olan halı şeridindeki l'nin seviyesinin yüksekliğinin içerisine atanmış olan halıların yüksekliğinden daha büyük olacağını garanti altına alır. Kısıt(44)ve kısıt(45)karar değişkenine ikili değer atanmasını sağlar. Kısıt(46), kısıt(47), kısıt(48) ve kısıt(49) karar değişkenlerine pozitif değer atanmasını sağlar.

Aşama 2 – Paralel Makine Problemi

Kümeler

j: iş indisi $\in 1,2,3, \dots, n$

k: makine indisi $\in 1,2,3, \dots, m$

Parametreler

r_j : j işine ait atöyeye geliş zamanı

f_j : j işine ait amaç fonksiyonu ağırlığı

s_{ij} : i işinden sonra j işinin işlenebilmesi için işlem zamanı

e_{jk} : eğer k makinesi j işini işlemeye uygunsa 1, diğer türlü 0

u_j : j siparişinin ortalama dokuma hızı

Karar Değişkenleri

p_j : j işine ait işlem zamanı

x_{ijk} : eğer j işi i işinden hemen sonra k makinesinde işlenirse 1, diğer türlü 0

C_j : j işine ait işlem zamanı

P_{ijk} : j işinin i işinden sonra k makinesindeki (hazırlık süresi dahil) işlem süresi

$$\text{minimize } \sum_{j=m+1}^{m+n} f_j * (C_j - r_j) \quad (50)$$

$$P_{ijk} = s_{ij} + p_j + (BigM) * (1 - e_{ik}) + (BigM) * (1 - e_{jk}) \quad (51)$$

$$\forall i \in J, \forall j \in J \setminus \{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M$$

$$C_i + \sum_{k=1}^m (P_{ijk} X_{ijk}) + (BigM) * \left(\sum_{k=1}^m X_{ijk} - 1 \right) \leq C_j \quad (52)$$

$$\forall i \in J, \forall j \in J \setminus \{1, 2, \dots, m\}$$

$$r_j + \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{k=1}^m (P_{ijk} X_{ijk}) \leq C_j \quad \forall j \in J \setminus \{1, 2, \dots, m\} \quad (53)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{k=1}^m X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J/\{1, 2, \dots, m\} \quad (54)$$

$$\sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^m X_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in J \quad (55)$$

$$\sum_{a=1}^{m+n} X_{ajk} + \sum_{b=m+1}^{m+n} \sum_{h \in M/\{k\}} X_{jbh} \leq 1 \quad \forall j \in J/\{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M \quad (56)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in J, \forall j \in J/\{1, 2, \dots, m\}, \forall k \in M \quad (57)$$

$$P_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in J, \quad \forall j, \quad \forall k \quad (58)$$

$$C_j \geq 0, \quad \forall j \quad (59)$$

$$p_j \geq 0, \quad \forall j \quad (60)$$

Amaç fonksiyonu (50) işlere ait ağırlıklı tamamlanma zamanlarını en küçükleme içindir. Kısıt (51), belirli bir makinede belirli bir işi hemen takip eden bir işin işlem süresini (kurulum süresi dahil) gösteren bağımlı değişkenin değerini türetmek için kullanılır. Kısıt (52), bir işin tamamlanma süresini hesaplamak için kullanılır ve makinelerde işlerin birbirini takip etmesini sağlar. Kısıt (53), bir işin makinede tamamlanma süresinin, işin serbest bırakılma süresi ile mevcut işin işlem süresinin (hazırlık süresi dahil) toplamından az olmamasını sağlar. Kısıt (54), atama kısıtlamasıdır ve mevcut tüm n işin yalnızca bir makinede işlenmesini ve hemen ardından yalnızca bir işin gelmesini sağlar. Kısıt (55), herhangi bir işin en fazla bir ardılının olabilmesini sağlar. Kısıt (56), mevcut bir işin belirli bir makinedeki bir işi başarması durumunda, bu işin geri kalan makinelerin herhangi birindeki başka bir işin hemen önüne geçemeyeceği koşulunu ele alır. Kısıt(57), karar değişkenine ikili değer atanmasını sağlar. Kısıt(58), kısıt(59) ve kısıt(60) karar değişkenlerine pozitif değer atanmasını sağlar.

7. DENEY

7.1.Deney Senaryoları Oluşturma

Problem için veri kümesi, mevcutta faaliyet gösteren bir halı dokuma işletmesindeki verilerinden oluşturulmuştur. Özellikle ihracat müşterilerinin siparişleri bu çalışma için seçilmiştir. İhracat siparişleri sipariş miktarları ve terminleri net olması gereken, kalıp halinde gelen siparişlerdir. İç piyasa için üretilen siparişler genelde stok için üretilen ve ebatları tahminleme ile yapılan siparişlerdir. Bu yüzden ihracat siparişleri çalışma için daha verimli sonuç alınabilecek verilere sahiptir.

Veri kümesi işlem için bekleyen siparişler, siparişler içerisinde yer alan halı ebatları ve miktarları, işletmedeki çalışan makine sayısı, sipariş/tezgah uyumlulukları, siparişlerin tezgahlardaki üretim birim üretim süreleri, hazırlık süreleri gibi verilerden oluşmaktadır.

7.2.Deney Senaryoları Bilgileri

Oluşturulan bu veri kümesinden deney senaryoları için daha küçük problemler elde edilmiştir. Toplamda 5 adet deney senaryosu hazırlanmıştır. Bu problemler arasında siparişler, siparişler içerisinde yer alan halı ebatları, dokuma tezgâhları tipi ve adet farkları bulunmaktadır. Genel olarak sipariş sayısı ve makine sayısı arttıkça sipariş içerisinde yer alan halı sayıları da artmaktadır. Ancak bazı problemlerde halı sayısında diğerlerine oranla daha büyük bir artış bulunmaktadır. Bu da siparişlerin karmaşık olduğuna işaret etmektedir. Hazırlanan senaryo bilgileri Tablo 5'teki gibidir.

Tablo 7.1: Oluşturulan problem senaryoları

Problem	Sipariş Sayısı	Makine Sayısı	Halı Ebat Adedi	Halı Sayısı
#1	3	2	4	30
#2	3	2	4	873
#3	5	3	6	1496

#4	10	5	8	536
#5	28	12	25	2200

- **Sipariş Sayısı:** Problemden verilen sipariş sayısını belirtmektedir.
- **Makine Sayısı:** Siparişleri karşılayabilmek için kullanılan makine sayısını belirtir.
- **Halı Ebat Adedi:** Farklı halı boyutlarının sayısını belirtir.
- **Halı Sayısı:** Her problemde üretilecek toplam halı sayısını belirtir.

Problem#1 senaryosunun detayları şu şekildedir:

- 3 farklı sipariş olup, 2 adet makine sayısı bulunmaktadır.
- Toplam halı sayısı 30 adet olup, bu halılar 4 farklı ebat tipindedir. Ebatlar 160x230, 160x235, 240x300, 40x40 olarak talep edilmiştir.
- Siparişlerin uygun olup üretileceği 2 adet dokuma tezgâhı vardır. Her tezgâhta her sipariş üretilememektedir. 1 ile belirtilen hücreler siparişin o dokuma tezgâhında işleme alınabileceğini, 0 ise işleme alınamayacağını belirtmektedir.
- Problem çözümünde önemli bir noktaya sahip olan dokuma tezgâhlarının en uzunluk bilgileri de verilmiştir.
- İşleme alınacak siparişlerin her tezgâh için dakika/m² üretim bilgileri, her siparişin tezgâhlarda işleme alınabilmesi için gereken hazırlık süreleri ve tamamlanan sipariştten sonra yeni bir siparişe geçişteki katlanılacak hazırlık süreleri elde edilerek matris haline getirilmiştir.

Tablo 7.2: Problem#1 sipariş bilgileri

Siparişler	Halı Eni (cm)	Halı Boyu (cm)	Adet
Sipariş#1	160	230	6
Sipariş#2	160	235	6
	240	300	6
Sipariş#3	160	235	4

	240	300	4
	40	40	4

Tablo 7.3: Problem#1 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi

Sipariş/Tezgâh Uygunluğu	Tezgâh#1	Tezgâh#2
Sipariş#1	1	1
Sipariş#2	1	0
Sipariş#3	1	1

Tablo 7.4: Problem#1 tezgâh en uzunlukları

Tezgâh	Tezgâh En Uzunluğu (cm)
Tezgâh#1	400
Tezgâh#2	500

Problem#2 senaryosunun detayları şu şekildedir:

- 3 farklı sipariş olup, 2 adet makine sayısı bulunmaktadır.
- Toplam halı sayısı 30 adet olup, bu halılar 4 farklı ebat tipindedir. Ebatlar 160x230, 160x235, 240x300, 40x40 olarak talep edilmiştir.
- Siparişlerin uygun olup üretileceği 2 adet dokuma tezgâhı vardır. Her tezgâhta her sipariş üretilememektedir. 1 ile belirtilen hücreler siparişin o dokuma tezgâhında işleme alınabileceğini, 0 ise işleme alınamayacağını belirtmektedir.
- Problem çözümünde önemli bir noktaya sahip olan dokuma tezgâhlarının en uzunluk bilgileri de verilmiştir.

Tablo 7.5: Problem#2 sipariş bilgileri

Siparişler	Halı Eni (cm)	Halı Boyu (cm)	Adet
Sipariş#1	160	230	612
Sipariş#2	160	235	102
	240	300	69
Sipariş#3	160	235	24
	240	300	60
	40	40	6

Tablo 7.6: Problem#2 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi

Sipariş/Tezgâh Uygunluğu	Tezgâh#1	Tezgâh#2
Sipariş#1	1	1
Sipariş#2	1	0
Sipariş#3	1	1

Tablo 7.7: Problem#2 tezgâh en uzunlukları

Tezgâh	Tezgâh En Uzunluğu (cm)
Tezgâh#1	400
Tezgâh#2	500

Problem#3 senaryosunun detayları şu şekildedir:

- 3 farklı sipariş olup, 2 adet makine sayısı bulunmaktadır.
- Toplam halı sayısı 30 adet olup, bu halılar 4 farklı ebat tipindedir. Ebatlar 160x230, 160x235, 240x300, 40x40 olarak talep edilmiştir.

- Siparişlerin uygun olup üretileceği 2 adet dokuma tezgâhı vardır. Her tezgâhta her sipariş üretilememektedir. 1 ile belirtilen hücreler siparişin o dokuma tezgâhında işleme alınabileceğini, 0 ise işleme alınamayacağını belirtmektedir.
- Problem çözümünde önemli bir noktaya sahip olan dokuma tezgâhlarının en uzunluk bilgileri de verilmiştir.

Tablo 7.8: Problem#3 sipariş bilgileri

Siparişler	Halı Eni (cm)	Halı Boyu (cm)	Adet
Sipariş#1	160	230	612
Sipariş#2	160	235	102
	240	300	69
Sipariş#3	160	235	24
	240	300	6
	40	40	6
Sipariş#4	160	230	199
	240	305	150
Sipariş#5	160	235	93
	240	305	128
	320	412	53

Tablo 7.9: Problem#3 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi

Sipariş/Tezgâh Uygunluğu	Tezgâh#1	Tezgâh#2	Tezgâh#3
Sipariş#1	1	1	1
Sipariş#2	1	1	0

Sipariş#3	1	1	0
Sipariş#4	1	1	1
Sipariş#5	1	1	1

Tablo 7.10: Problem#3 tezgâh en uzunlukları

Tezgâh	Tezgâh En Uzunluğu (cm)
Tezgâh#1	500
Tezgâh#2	500
Tezgâh#3	400

Problem#4 senaryosunun detayları şu şekildedir:

- 3 farklı sipariş olup, 2 adet makine sayısı bulunmaktadır.
- Toplam halı sayısı 30 adet olup, bu halılar 4 farklı ebat tipindedir. Ebatlar 160x230, 160x235, 240x300, 40x40 olarak talep edilmiştir.
- Siparişlerin uygun olup üretileceği 2 adet dokuma tezgâhı vardır. Her tezgâhta her sipariş üretilememektedir. 1 ile belirtilen hücreler siparişin o dokuma tezgahında işleme alınabileceğini, 0 ise işleme alınamayacağını belirtmektedir.
- Problem çözümünde önemli bir noktaya sahip olan dokuma tezgahlarının en uzunluk bilgileri de verilmiştir.

Tablo 7.11: Problem#4 sipariş bilgileri

Siparişler	Halı Eni (cm)	Halı Boyu (cm)	Adet
Sipariş#1	160	235	93
	240	305	128
	240	300	69
Sipariş#2	45	45	45

	90	153	16
	160	230	30
	240	305	120
	305	396	3
Sipariş#3	400	3000	3
Sipariş#4	400	3000	2
Sipariş#5	400	3000	5
Sipariş#6	400	3000	5
Sipariş#7	400	3000	4
Sipariş#8	400	3000	13
Sipariş#9	400	3000	8
Sipariş#10	400	3000	8

Tablo 7.12: Problem#4 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi

Sipariş/Tezgâh Uygunluğu	Tezgâh#1	Tezgâh#2	Tezgâh#3	Tezgâh#4	Tezgâh#5
Sipariş#1	1	1	1	1	0
Sipariş#2	1	1	1	1	0
Sipariş#3	0	0	1	1	1
Sipariş#4	0	0	1	1	1
Sipariş#5	0	0	1	1	1
Sipariş#6	0	0	1	1	1
Sipariş#7	0	0	1	1	1

Sipariş#8	0	0	1	1	0
Sipariş#9	0	0	1	1	0
Sipariş#10	0	0	1	1	0

Tablo 7.13: Problem#4 tezgâh en uzunlukları

Tezgâh	Tezgâh En Uzunluğu (cm)
Tezgâh#1	500
Tezgâh#2	500
Tezgâh#3	400
Tezgâh#4	400
Tezgâh#5	400

Problem#5 senaryosunun detayları şu şekildedir:

- 3 farklı sipariş olup, 2 adet makine sayısı bulunmaktadır.
- Toplam halı sayısı 30 adet olup, bu halılar 4 farklı ebat tipindedir. Ebatlar 160x230, 160x235, 240x300, 40x40 olarak talep edilmiştir.
- Siparişlerin uygun olup üretileceği 2 adet dokuma tezgâhı vardır. Her tezgâhta her sipariş üretilememektedir. 1 ile belirtilen hücreler siparişin o dokuma tezgahında işleme alınabileceğini, 0 ise işleme alınamayacağını belirtmektedir.
- Problem çözümünde önemli bir noktaya sahip olan dokuma tezgahlarının en uzunluk bilgileri de verilmiştir.

Tablo 7.14: Problem#5 sipariş bilgileri

Siparişler	Halı Eni (cm)	Halı Boyu (cm)	Adet
Sipariş#1	160	235	93

	240	305	128
	320	412	53
Sipariş#2	45	45	45
	90	153	16
	160	230	30
	240	305	120
	305	396	3
Sipariş#3	400	3000	3
Sipariş#4	400	3000	2
Sipariş#5	400	3000	5
Sipariş#6	400	3000	5
Sipariş#7	400	3000	4
Sipariş#8	400	3000	13
Sipariş#9	400	3000	8
Sipariş#10	400	3000	8
Sipariş#11	200	290	100
Sipariş#12	50	80	40
	80	150	16
	100	200	12
	100	300	12
	120	170	12
	150	220	28

	200	300	32
	250	350	12
	300	400	12
Sipariş#13	50	80	40
	80	150	16
	100	200	12
	100	300	12
	120	170	12
	150	170	24
	200	300	32
	250	350	8
	300	400	8
Sipariş#14	400	2500	4
	50	60	20
	50	15	50
Sipariş#15	400	3000	7
Sipariş#16	400	3000	8
Sipariş#17	400	3000	12
Sipariş#18	400	3000	7
Sipariş#19	400	3000	1
Sipariş#20	400	3000	2
Sipariş#21	400	3000	7

Sipariş#22	400	3000	13
Sipariş#23	400	3000	2
Sipariş#24	400	3000	1
Sipariş#25	60	110	72
	80	150	75
	110	170	100
	133	190	123
	160	230	101
	200	300	10
Sipariş#26	60	110	12
	80	150	26
	110	170	22
	133	190	27
	160	230	35
	200	300	12
Sipariş#27	60	110	76
	80	150	66
	110	170	100
	133	190	107
	160	230	87
	200	300	12
	250	350	1

	133	133	3
Sipariş#28	60	110	6
	110	170	8
	160	230	9

Tablo 7.15: Problem#5 sipariş/tezgâh uygunluğu matrisi

Tezgah	T#	T#	T#	T#	T#	T#	T#	T#	T#	T#	T#	T#
Uygunluğu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sipariş#1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
Sipariş#2	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
Sipariş#3	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Sipariş#4	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Sipariş#5	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Sipariş#6	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Sipariş#7	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Sipariş#8	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sipariş#9	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sipariş#10	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sipariş#11	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Sipariş#12	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Sipariş#13	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Sipariş#14	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Sipariş#15	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Sipariş#16	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Sipariş#17	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Sipariş#18	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Sipariş#19	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0

Sipariş#20	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Sipariş#21	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Sipariş#22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sipariş#23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sipariş#24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sipariş#25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sipariş#26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sipariş#27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sipariş#28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tablo 7.16: Problem#5 tezgâh en uzunlukları

Tezgâh	Tezgâh En Uzunluğu (cm)
Tezgâh#1	500
Tezgâh#2	500
Tezgâh#3	400
Tezgâh#4	400
Tezgâh#5	400
Tezgâh#6	500
Tezgâh#7	500
Tezgâh#8	400
Tezgâh#9	400
Tezgâh#10	400
Tezgâh#11	400
Tezgâh#12	400

Deney senaryoları, optimizasyon problemleri çözümlerinde kullanılan GAMS çözücüsünde gerçekleştirilmiştir. Windows 11 Pro 64 bit işletim sistemi, 13. nesil Intel i5 2.60 Ghz işlemci, 16 GB RAM olan bir bilgisayarda, GAMS 23.5.0 sürümü kullanılmıştır. Tek aşamalı problem 36.000 saniye çalıştırılmıştır. İki aşamalı problem ikiye bölünerek ilk aşaması 18.000 saniye, ikinci aşaması 18.000 saniye olarak belirlenmiştir. İlk aşamada çözüm erken bulunduğu takdirde, çözüm sonuçları ikinci aşamaya geçerek çözümü devam ettirilmiştir. Bu süreç problemlerin hepsi için uygulanmıştır.

Problem#1 deneme problemi olmuş olup, tek aşamalı ve iki aşamalı çözüm yöntemlerinde optimum sonuç vermiştir. Problem#2 'de Problem#1'in tüm girdileri aynı olup, halı miktarlarında değişiklikler olmuştur. Çözümü gerçekleştirildiğinde iki aşamalı model tek aşamalı modele göre ortalama %5 kadar daha iyi bir çözüm kalitesine ulaşmıştır. Problem#3' de sipariş sayısı, makine sayısı, halı ebat tipleri ve sipariş miktarlarında değişiklik olmuştur. Çözümlerine bakıldığında iki aşamalı model tek aşamalı modele göre çok daha baskın bir şekilde iyi çözüm vermiştir. Çözüm kalitesi ortalama olarak %36 kadar daha iyidir. Küçük bir yüzde gibi görünse de üretim planları için büyük bir anlam ifade etmektedir. Problem#4'de sipariş sayısı, makine sayısı, halı ebat tipleri ve sipariş miktarlarında değişiklik olmuştur. İki aşamalı model, tek aşamalı modele göre daha baskın bir çözüm sonucu vermiştir. Çözüm kalitesi ortalama %33 kadar daha iyidir. Problem#5'de tüm girdi miktarları aynı artırılarak devam ettirilmiştir. Tek aşamalı model ile belirtilen süreler içerisinde kaliteli bir çözüm elde edilememiştir. İki aşamalı model ile çözümler sağlanabilmiştir.

Elde edilen çözümlere göre tüm problem senaryolarında iki aşamalı matematiksel model ile gerçekleşen çözümlerin, tek aşamalı matematiksel modele göre daha iyi bir amaç fonksiyonu sonucu vermektedir. Problemler içerisindeki sipariş sayısı, makine sayısı, halı ebadı adedi ve halı sayısı değişkenlik göstererek daha karmaşık ve büyük bir problem hale dönüşmesine rağmen iki aşamalı matematiksel model sonuçları daha üstün geldiği görülmektedir. Ayrıca problem çözüm süreleri performansına bakıldığında iki aşamalı çözüm yöntemi, tek aşamalı yöntemle göre işlem karmaşası daha az olmasından ve daha az karar değişkeni cevabı aramasından dolayı çözüme daha hızlı ulaşmaktadır. Bu detay daha büyük girdi verilerine sahip problemlerin çözümünde önemli bir parametre olmaktadır.

Oluşturulan deney senaryolarının veri kümeleri detayları, tek aşamalı ve iki aşamalı model olmak üzere sonuçlarının birbirleri ile karşılaştırmaları ve çözüm kaliteleri Tablo 21’de verilmiştir.



Tablo 7.17. Deney senaryoları çözüm karşılaştırmaları

Problem	Sipariş Sayısı	Makine Sayısı	Halı Ebat Adedi	Halı Sayısı	Tek Aşamalı Model	İki Aşamalı Model	Fark	Çözüm Kalitesi (%)
#1	3	2	4	30	Deneme problemi için optimum çözümler elde edildi.			
#2	3	2	4	873	27.794.210	26.431.870	1.362.340	5%
#3	5	3	6	1496	93.412.360	59.688.780	33.723.580	36%
#4	10	5	<u>8</u>	536	116.408.500	78.011.250	38.397.250	33%
#5	28	12	25	2200	Çözülemedi.	17.958.020	-	

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1.Sonuçların Değerlendirmesi ve Tartışma

Yapılan bu çalışmada müşteriye özel siparişlerin üretildiği bir halı dokuma fabrikasında gerçekleştirilen üretim planlama aşamalarından birisi detaylı olarak ele alınmıştır. Gelen siparişler ve bu siparişlerde yer alan halı ölçüleri sezgisel ve deneyime dayalı yöntemler kullanılarak planlanmaktadır. Ancak bu süreçte planın etkinliği ve israf kayıplarının takibi yeterince ölçülememektedir. Sistemde tespit edilen bu boşluğun daha verimli yönetilebilmesi ve verimlilik kayıplarının önlenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Araştırma sonucunda literatürde bu konuda bir boşluk olduğu tespit edilmiş ve bu boşluğun doldurularak katkıda bulunulmasına karar verilmiştir.

Çalışmaya başlamadan önce literatürdeki benzer çalışmalar gözden geçirilmiş ve sektördeki ilham verici uygulamalar dikkatle incelenmiştir. İlk aşamada problemin detaylı bir analizleri yapılmış ve hangi yöntemlerin üzerinde çalışılacağı konusunda kapsamlı bir yol haritası oluşturulmuştur. Bu bağlamda belirlenen çözüm yöntemleri için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Yöntem başlıkları belirlendikten sonra gerekli girdi verileri hazırlanmıştır. Sorunu çözmek için iki farklı çözüm yöntemi belirlenmiş ve bu yöntemler kullanılarak çözüm modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen çözüm modelleri için çeşitli verilerle deneysel senaryolar oluşturulmuş ve bu senaryoların çözümleri analiz edilerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Analiz sonucunda elde edilen verilerin sonuçlarının tutarlılığı kontrol edilmiş ve gerçek hayatta uygulanan planlara kıyasla verimlilik, performans ve işgücü açısından önemli katkılarda bulunduğu görülmüştür.

Bu çalışmada paralel makine ve iki boyutlu şerit paketleme problemi kısıtlamaları harmanlanarak birlikte kullanılmıştır. Böylece hem literatüre hem de tekstil endüstrisine yeni bir bakış açısı kazandırılmıştır. Bu çalışma, özellikle tekstil endüstrisinde şerit tipi üretim yapan birçok üretim sürecinde uygulanabilir.

Makine çizelgeleme kısıtlamalarındaki amaç fonksiyonları değiştirilerek (maksimum tamamlanma süresi (maksimum tamamlanma süresi (C_{max}), toplam tamamlanma süresi ($\sum C_j$) maksimum geç kalma (L_{max}), vb.,) planlama ve üretim stratejilerine hizmet edebilecek bir model yaratılabilir. Bu model yapısı, benzer girdileri kullanabilen ve uyarlanabilen diğer üretim süreçleri için kısa, orta ve uzun vadeli planlar yapmak için bir yol haritası olarak kullanılabilir. Bu planlar sadece üretim planı için değil, üretim ile bağlantılı birçok birim için de fayda sağlayabilir.

Gelecekte ek gelişmelerle birlikte daha dinamik ve daha performanslı bir model oluşturarak hem sektöre hem de literatüre katkı sağlayacak çözümler tanıtılması planlanmaktadır. Bu çalışmalar sayesinde halı dokuma, kumaş dokuma fabrikalarında üretim planlama süreçlerinin daha etkin ve verimli hale getirilmesi, israf oranlarının düşürülmesi, maliyetlerin azaltılması ve müşteri memnuniyetinin artırılması hedeflenmektedir. Bu sayede işletmeler sektöründe rekabet avantajı elde edebilecek ve pazardaki konumlarını koruyarak güçlendireceklerdir.

Bu kapsamlı çalışma halı üretimi, kumaş üretimi gibi sektörler ile sınırlı olmayıp benzer üretim süreçlerine sahip diğer sektörlerde de uygulanabilir. Bu tür sektörlerde benzer verimlilik artışları ve maliyet indirimleri elde ederek genel iş performansını iyileştirmek mümkündür. Daha fazla araştırma ve model geliştirme çalışmaları ile bu yöntemlerin daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilirliği artırılabilecek ve üretim planlaması alanında önemli katkılar sağlanması planlanacaktır.

REFERANSLAR

- [1] I. Mourtos, S. Vatikiotis, and G. Zois, “Scheduling Jobs on Unrelated Machines with Job Splitting and Setup Resource Constraints for Weaving in Textile Manufacturing,” , *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 630, 2021, pp. 424–434. doi: 10.1007/978-3-030-85874-2_45.
- [2] M. Tucci and R. Rinaldi, “From theory to application: Tabu search in textile production scheduling,” *Production Planning & Control*, vol. 10, no. 4, pp. 365–374, Jan. 1999, doi: 10.1080/095372899233118.
- [3] D. Yilmaz Eroglu and H. C. Ozmutlu, “Solution method for a large-scale loom scheduling problem with machine eligibility and splitting property,” *The Journal of The Textile Institute*, vol. 108, no. 12, pp. 2154–2165, Dec. 2017, doi: 10.1080/00405000.2017.1316177.
- [4] R. UZSOY, “Scheduling a single batch processing machine with non-identical job sizes,” *Int J Prod Res*, vol. 32, no. 7, pp. 1615–1635, Jul. 1994, doi: 10.1080/00207549408957026.
- [5] F. Jolai Ghazvini and L. Dupont, “Minimizing mean flow times criteria on a single batch processing machine with non-identical jobs sizes,” *Int J Prod Econ*, vol. 55, no. 3, pp. 273–280, Aug. 1998, doi: 10.1016/S0925-5273(98)00067-X.
- [6] R. S. Trindade, O. C. B. de Araújo, and M. Fampa, “Arc-flow approach for single batch-processing machine scheduling,” *Comput Oper Res*, vol. 134, p. 105394, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.cor.2021.105394.
- [7] Y. H. Lee and Y. H. Lee, “Minimising makespan heuristics for scheduling a single batch machine processing machine with non-identical job sizes,” *Int J Prod Res*, vol. 51, no. 12, pp. 3488–3500, Jun. 2013, doi: 10.1080/00207543.2012.748226.
- [8] P. Y. Chang, P. Damodaran, and S. Melouk, “Minimizing makespan on parallel batch processing machines,” *Int J Prod Res*, vol. 42, no. 19, pp. 4211–4220, Oct. 2004, doi: 10.1080/00207540410001711863.

- [9] S. H. Chung, Y. T. Tai, and W. L. Pearn, "Minimising makespan on parallel batch processing machines with non-identical ready time and arbitrary job sizes," *Int J Prod Res*, vol. 47, no. 18, pp. 5109–5128, Sep. 2009, doi: 10.1080/00207540802010807.
- [10] B. Cheng, S. Yang, X. Hu, and B. Chen, "Minimizing makespan and total completion time for parallel batch processing machines with non-identical job sizes," *Appl Math Model*, vol. 36, no. 7, pp. 3161–3167, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.apm.2011.09.061.
- [11] L. Mönch, H. Balasubramanian, J. W. Fowler, and M. E. Pfund, "Heuristic scheduling of jobs on parallel batch machines with incompatible job families and unequal ready times," *Comput Oper Res*, vol. 32, no. 11, pp. 2731–2750, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.cor.2004.04.001.
- [12] İ. Muter, "Exact algorithms to minimize makespan on single and parallel batch processing machines," *Eur J Oper Res*, vol. 285, no. 2, pp. 470–483, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ejor.2020.01.065.
- [13] C.-Y. Lee, "Minimizing makespan on a single batch processing machine with dynamic job arrivals," *Int J Prod Res*, vol. 37, no. 1, pp. 219–236, Jan. 1999, doi: 10.1080/002075499192020.
- [14] L. Dupont and C. Dhaenens-Flipo, "Minimizing the makespan on a batch machine with non-identical job sizes: an exact procedure," *Comput Oper Res*, vol. 29, no. 7, pp. 807–819, Jun. 2002, doi: 10.1016/S0305-0548(00)00078-2.
- [15] J. E. C. Arroyo and J. Y.-T. Leung, "Scheduling unrelated parallel batch processing machines with non-identical job sizes and unequal ready times," *Comput Oper Res*, vol. 78, pp. 117–128, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.cor.2016.08.015.
- [16] Z. Jia, C. Wang, and J. Y.-T. Leung, "An ACO algorithm for makespan minimization in parallel batch machines with non-identical job sizes and incompatible job families," *Appl Soft Comput*, vol. 38, pp. 395–404, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.asoc.2015.09.056.

- [17] X. Li and K. Zhang, "Single batch processing machine scheduling with two-dimensional bin packing constraints," *Int J Prod Econ*, vol. 196, pp. 113–121, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2017.11.015.
- [18] J. A. Bennell, L. Soon Lee, and C. N. Potts, "A genetic algorithm for two-dimensional bin packing with due dates," *Int J Prod Econ*, vol. 145, no. 2, pp. 547–560, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.ijpe.2013.04.040.
- [19] S. Polyakovskiy and R. M'Hallah, "A hybrid feasibility constraints-guided search to the two-dimensional bin packing problem with due dates," *Eur J Oper Res*, vol. 266, no. 3, pp. 819–839, May 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.046.
- [20] F. Tercinet, E. Néron, and C. Lenté, "Energetic reasoning and bin-packing problem, for bounding a parallel machine scheduling problem," *4OR*, vol. 4, no. 4, pp. 297–317, Nov. 2006, doi: 10.1007/s10288-006-0017-1.
- [21] N. Xie, S. Zheng, and Q. Wu, "Two-dimensional packing algorithm for autoclave molding scheduling of aeronautical composite materials production," *Comput Ind Eng*, vol. 146, p. 106599, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106599.
- [22] A. Lodi, S. Martello, and M. Monaci, "Two-dimensional packing problems: A survey," *Eur J Oper Res*, vol. 141, no. 2, pp. 241–252, Sep. 2002, doi: 10.1016/S0377-2217(02)00123-6.
- [23] S. Zhou, Z. Jia, M. Jin, and N. Du, "Minimizing makespan on parallel batch processing machines with two-dimensional rectangular jobs," *Comput Ind Eng*, vol. 169, p. 108167, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108167.
- [24] X. Zhang, M. Shan, and J. Zeng, "Parallel Batch Processing Machine Scheduling Under Two-Dimensional Bin-Packing Constraints," *IEEE Trans Reliab*, 2022, doi: 10.1109/TR.2022.3201333.
- [25] S. Zhou, M. Jin, C. Liu, X. Zheng, and H. Chen, "Scheduling a single batch processing machine with non-identical two-dimensional job sizes," *Expert Syst Appl*, vol. 201, p. 116907, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.116907.

- [26] K. Hu, Y. Che, T. S. Ng, and J. Deng, “Unrelated parallel batch processing machine scheduling with time requirements and two-dimensional packing constraints,” *Comput Oper Res*, vol. 162, p. 106474, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.cor.2023.106474.
- [27] J. O. Berkey and P. Y. Wang, “Two-Dimensional Finite Bin-Packing Algorithms,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 38, no. 5, pp. 423–429, May 1987, doi: 10.1057/jors.1987.70.
- [28] S. V. MEHTA and R. UZSOY, “Minimizing total tardiness on a batch processing machine with incompatible job families,” *IIE Transactions*, vol. 30, no. 2, pp. 165–178, Feb. 1998, doi: 10.1080/07408179808966448.
- [29] K. Hadj Salem, E. Silva, J. F. Oliveira, and M. A. Carravilla, “Mathematical models for the two-dimensional variable-sized cutting stock problem in the home textile industry,” *Eur J Oper Res*, vol. 306, no. 2, pp. 549–566, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ejor.2022.08.018.
- [30] M. Hifi, “Exact algorithms for the guillotine strip cutting/packing problem,” *Comput Oper Res*, vol. 25, no. 11, pp. 925–940, Nov. 1998, doi: 10.1016/S0305-0548(98)00008-2.
- [31] A. Bortfeldt, “A genetic algorithm for the two-dimensional strip packing problem with rectangular pieces,” *Eur J Oper Res*, vol. 172, no. 3, pp. 814–837, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.ejor.2004.11.016.
- [32] S. C. H. Leung, D. Zhang, and K. M. Sim, “A two-stage intelligent search algorithm for the two-dimensional strip packing problem,” *Eur J Oper Res*, vol. 215, no. 1, pp. 57–69, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.ejor.2011.06.002.
- [33] M. Kenmochi, T. Imamichi, K. Nonobe, M. Yagiura, and H. Nagamochi, “Exact algorithms for the two-dimensional strip packing problem with and without rotations,” *Eur J Oper Res*, vol. 198, no. 1, pp. 73–83, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2008.08.020.
- [34] A. Bekrar, I. Kacem, C. Chu, and C. Sadfi, “An improved heuristic and an exact algorithm for the 2D strip and bin packing problem,” 2010.

- [35] K. He, Y. Jin, and W. Huang, "Heuristics for two-dimensional strip packing problem with 90 rotations," *Expert Syst Appl*, vol. 40, no. 14, pp. 5542–5550, 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2013.04.005.
- [36] P. M. Castro and I. E. Grossmann, "From time representation in scheduling to the solution of strip packing problems," *Comput Chem Eng*, vol. 44, pp. 45–57, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.05.002.
- [37] Arik, O.A, 2017, Bulanık Ortamda Bozulma Ve Öğrenme Etkileri Altında Çok Amaçlı Paralel Makine Çizelgeleme Problemleri, T.C. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 171 s.
- [38] H. Dyckhoff, "A typology of cutting and packing problems," *Eur J Oper Res*, vol. 44, no. 2, pp. 145–159, Jan. 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90350-K.
- [39] A. Fréville, "The multidimensional 0-1 knapsack problem: An overview," *European Journal of Operational Research*, vol. 155, no. 1. pp. 1–21, May 16, 2004. doi: 10.1016/S0377-2217(03)00274-1.
- [40] D. Zhang, Y. Kang, and A. Deng, "A new heuristic recursive algorithm for the strip rectangular packing problem," *Comput Oper Res*, vol. 33, no. 8, pp. 2209–2217, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.cor.2005.01.009.
- [41] "Hans Kellerer, Ulrich Pferschy, David Pisinger - Knapsack Problems-Springer (2004)".
- [42] C. Liu, K. Smith-Miles, T. Wauters, and A. M. Costa, "Instance space analysis for 2D bin packing mathematical models," *Eur J Oper Res*, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ejor.2023.12.008.
- [43] P. C. Gilmore and R. E. Gomory, "A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem," *Oper Res*, vol. 9, no. 6, pp. 849–859, Dec. 1961, doi: 10.1287/opre.9.6.849.
- [44] R. W. Haessler and P. E. Sweeney, "Cutting stock problems and solution procedures," 1991.

- [45] A. Lodi and M. Monaci, “Integer linear programming models for 2-staged two-dimensional Knapsack problems,” *Math Program*, vol. 94, no. 2–3, pp. 257–278, Jan. 2003, doi: 10.1007/s10107-002-0319-9.
- [46] F. Chauny, R. Loulou, S. Sadones, and F. Soumis, “A two-phase heuristic for strip packing: Algorithm and probabilistic analysis,” *Operations Research Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 25–33, Mar. 1987, doi: 10.1016/0167-6377(87)90006-X.
- [47] M. Iori, V. L. de Lima, S. Martello, F. K. Miyazawa, and M. Monaci, “Exact solution techniques for two-dimensional cutting and packing,” *European Journal of Operational Research*, vol. 289, no. 2. Elsevier B.V., pp. 399–415, Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.ejor.2020.06.050.
- [48] A. Neuenfeldt Júnior, E. Silva, A. Miguel Gomes, and J. F. Oliveira, “The Two-Dimensional Strip Packing Problem: What Matters?,” 2018, pp. 151–164. doi: 10.1007/978-3-319-71583-4_11.
- [49] R. Gokhale and M. Mathirajan, “Scheduling identical parallel machines with machine eligibility restrictions to minimize total weighted flowtime in automobile gear manufacturing,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 9–12, pp. 1099–1110, Jun. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3653-3.
- [50] G. Wäscher, H. Haußner, and H. Schumann, “An improved typology of cutting and packing problems,” *Eur J Oper Res*, vol. 183, no. 3, pp. 1109–1130, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2005.12.047.
- [51] J. F. Oliveira, A. Neuenfeldt, E. Silva, and M. A. Carravilla, “A survey on heuristics for the two-dimensional rectangular strip packing problem,” *Pesquisa Operacional*, vol. 36, no. 2, pp. 197–226, May 2016, doi: 10.1590/0101-7438.2016.036.02.0197.