

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**RULO KESME PROBLEMLERİ VE KAĞIT ÜRETİM**  
**ENDÜSTRİSİNDE BİR UYGULAMA**

**RAMAZAN YANIÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Prof. Dr. İbrahim KÜÇÜKKOÇ (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Ramazan YAMAN  
Dr. Öğr. Üyesi Kadriye ERGÜN

**BALIKESİR, OCAK - 2025**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Rulo Kesme Problemleri ve Kağıt Üretim Endüstrisinde Bir Uygulama**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Ramazan YANIÇ**

## ÖZET

**RULO KESME PROBLEMLERİ VE KAĞIT ÜRETİM ENDÜSTRİSİNDE BİR  
UYGULAMA  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
RAMAZAN YANIÇ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. İBRAHİM KÜÇÜKKOÇ)**

**BALIKESİR, OCAK - 2025**

Bu çalışma kağıt üretim endüstrisinde rulo kesme problemini ele alarak fire kaybı ve toplam ana malzeme kullanımını en aza indirirken, müşteri taleplerini karşılamaya yönelik bir matematiksel model geliştirmeyi amaçlamaktadır. Rulo kesme problemleri, stok kesme problemlerinin tek boyutlu bir alt kategorisi olup büyük kağıt rulolarının müşteri ihtiyaçlarına uygun boyutlara kesilmesi sürecini optimize etmeyi hedefler. Çalışmada üretim planlama sürecinin önemli bir parçası olan kesim planlamasının optimize edilmesi için karışık tamsayı doğrusal programlama (MILP) yaklaşımı kullanılmış olup, geliştirilen matematiksel model Python dilinde kodlanarak Gurobi Solver yardımıyla çözülmüştür.

Çalışma, sipariş yoğun dönemlerde farklı genişliklerdeki müşteri taleplerini karşılamak için optimum kesim desenleri oluşturmayı amaçlarken aynı zamanda kesim işleminden kalan fire kaybını en aza indirmeyi hedeflemektedir. Parametre yönetimi, amaç fonksiyonu değişkenliği ve yardımcı (joker) bobin kullanımı gibi esnek çözümler sunmaktadır. Deneysel testler ve gerçek hayat vaka çalışmaları ile modelin küçük, orta, büyük ve çok büyük ölçekli problemler karşısındaki etkinliği incelenmiş olup ana malzeme kullanımı, fire minimizasyonu ve üretim verimliliği açısından başarılı sonuçlar elde edilerek kağıt endüstrisindeki kesim planlaması için değerli bir karar destek sistemi sunmaktadır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Rulo kesme problemleri, kesim deseni minimizasyonu, fire minimizasyonu, karışık tamsayı doğrusal programlama, kağıt endüstrisi

## **ABSTRACT**

### **ROLL CUTTING PROBLEMS AND AN APPLICATION IN PAPER PRODUCTION INDUSTRY**

**MSC THESIS**

**RAMAZAN YANIÇ**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
INDUSTRIAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. İBRAHİM KÜÇÜKKOÇ)**

**BALIKESİR, JANUARY - 2025**

This study addresses the roll cutting problem in the paper production industry, aiming to develop a mathematical model that minimizes trim loss and total raw material consumption while meeting customer demands. Roll cutting problems are a one-dimensional subclass of cutting stock problems, focusing on optimizing the process of cutting large paper rolls into smaller rolls tailored to customer requirements. In this study, a mixed-integer linear programming (MILP) approach was employed to optimize cutting planning, which is a critical part of production planning. The developed mathematical model was coded in Python and executed using Gurobi Solver.

The study aims to generate optimal cutting patterns to fulfill customer demands of varying widths, particularly during periods of high order intensity, while minimizing trim waste generated from the cutting process. It offers flexible solutions such as parameter management, variability in the objective function, and the use of auxiliary (joker) rolls. Experimental tests and real-life case studies were conducted to evaluate the model's effectiveness across small, medium, large and very large-scale problems. The results demonstrate successful outcomes in terms of raw material utilization, trim loss minimization, and production efficiency, providing a valuable decision support system for cutting planning in the paper production industry.

**KEYWORDS:** Roll cutting problems, cutting pattern minimization, trim loss minimization, mixed-Integer linear programming (MILP), paper industry

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMA-SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. RULO KESME PROBLEMLERİ</b> .....	<b>3</b>
2.1 Stok Kesme Problemlerinin Tanımı.....	3
2.2 Rulo Kesme Problemlerinin Stok Kesme Problemleri İçerisindeki Yeri .....	4
2.3 Çeşitli Endüstrilerde Stok Kesme Problemleri .....	6
2.4 Stok Kesme Problemlerinde Amaçlar.....	8
2.5 Stok Kesme Problemlerinin Bileşenleri.....	10
2.6 Stok Kesme Problemlerinin Fenomenolojisi .....	12
2.7 Stok Kesme Problemlerinin Sınıflandırılması .....	13
2.8 Stok Kesme Problemlerinin Karakteristikleri .....	17
2.8.1 Boyut .....	17
2.8.2 Atama Türü .....	19
2.8.3 Girdi ve Çıktılara İlişkin Karakteristikler .....	21
2.8.4 Kesim Planlarına İlişkin Kısıtlar .....	23
<b>3. TEK BOYUTLU STOK KESME PROBLEMİ</b> .....	<b>26</b>
3.1 Tek Boyutlu Stok Kesme Problemine Bakış .....	26
3.1.1 Tek Boyutlu Stok Kesme Problemi Kısıtları .....	27
3.1.2 Tek Boyutlu Stok Kesme Probleminin Kombinatoriyal Optimizasyon İçerisindeki Yeri ve Önemi .....	28
3.1.3 Problemin Zorluk Sınıflandırması .....	28
3.1.4 Tek Boyutlu Stok Kesme Problemi Çözüm Yöntemleri.....	30
3.2 Rulo Kesme Problemleri ve Kağıt Endüstrisinde Yapılan Çalışmalar .....	33
3.3 Kesme Problemleri Yayınlarına Genel Bakış .....	38
<b>4. PROBLEMİN TANIMI VE GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL</b> .....	<b>43</b>
4.1 Kağıt Endüstrisine Ait Genel Bilgiler .....	43
4.2 Kağıt Üretim Süreci .....	45
4.3 Problemin Tanımlanması .....	53
4.4 Geliştirilen Matematiksel Model .....	60
4.4.1 Amaç Fonksiyonu .....	61
4.4.2 Kısıtlar .....	61
<b>5. DENEYSEL TESTLER VE VAKA ÇALIŞMASI</b> .....	<b>65</b>
5.1 Sayısal Örnek .....	65

5.2 Deneysel Testler.....	72
5.3 Gerçek Hayat Vaka Çalışması .....	77
<b>6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....</b>	<b>88</b>
<b>7. KAYNAKLAR .....</b>	<b>90</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>96</b>
EK A: Deneysel Test Verileri.....	96
EK B: Gerçek Hayat Vaka Çalışması Verileri .....	120
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>125</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Stok kesme ve rulo kesme problemleri yayın sayıları (Scopus veri tabanı).....	6
Şekil 2.2: Kesim bıçağı örneği.....	11
Şekil 2.3: Kesme problemleri bileşenleri.....	11
Şekil 2.4: Temel problem tipleri.....	15
Şekil 2.5: Tek boyutlu kesme problemi örneği.....	18
Şekil 2.6: İki boyutlu kesme problemi örneği.....	18
Şekil 2.7: Üç boyutlu kesme problemi örneği.....	19
Şekil 2.8: Tek boyutlu giyotinli kesim örneği.....	25
Şekil 3.1: Stok kesme problemleri üzerine yapılan yayınların sayısındaki eğilim (Scopus veri tabanı).....	38
Şekil 3.2: Stok kesme problemleri üzerine yazarların bilimsel makale sayısı (Scopus veri tabanı).....	39
Şekil 3.3: Stok kesme problemleri makalelerinin ülke bazında sayıları (Scopus veri tabanı).....	39
Şekil 3.4: Tek boyutlu stok kesme problemleri makale sayıları (Scopus veri tabanı).....	40
Şekil 3.5: Fire kaybı konusu makale sayıları (Scopus veri tabanı).....	40
Şekil 3.6: Stok kesme problemleri üzerine yapılan Türkiye kaynaklı yayınların sayısındaki eğilim (Scopus veri tabanı).....	41
Şekil 3.7: Stok kesme problemleri üzerine Türk yazarların bilimsel makale sayısı (Scopus veri tabanı).....	41
Şekil 4.1: Hurda kâğıdın istiflenmesi.....	46
Şekil 4.2: Kağıt üretim süreci aşamaları.....	46
Şekil 4.3: Atık (hurda) kağıdın temizlenme aşaması (CSB-kağıt üretimi).....	47
Şekil 4.4: Hurda kâğıdın suyla ilk buluştuğu temizleme-pulper kazanı.....	48
Şekil 4.5: Bir kağıt makinasının şematik görüntüsü (CSB-kağıt üretimi).....	48
Şekil 4.6: Kağıt hamurunun elek üstüne serilmesi.....	49
Şekil 4.7: Kağıt makinası presleme.....	50
Şekil 4.8: Kağıt makinası kurutma.....	51
Şekil 4.9: Kağıt makinası kalenderleme.....	51
Şekil 4.10: Jumbo tampon sarımı ve bobin kesme.....	52
Şekil 4.11: Tamponlardan kesilmiş bobinler.....	53
Şekil 4.12: Kağıt üretim süreci genel adımları.....	54
Şekil 4.13: Kağıt üretim sürecindeki müşteri siparişi, pazarlama ve üretim arasındaki bilgi ve iş akışı.....	54
Şekil 4.14: Kağıt üretiminde jumbo tamponları kesim desenine göre bobinlere dönüştürülme süreci.....	55
Şekil 4.15: Bobin kesme ünitesi.....	56
Şekil 4.16: Bobin kesme ünitesi şematik gösterim.....	56
Şekil 4.17: Problemin şematik gösterimi I.....	57
Şekil 4.18: Problemin şematik gösterimi II.....	59
Şekil 5.1: Sayısal örnek çözümünün görselleştirilmesi.....	71
Şekil 5.2: GHVÇ problemlerinin sonuçlarının toplam set sayısı açısından karşılaştırılması.....	85
Şekil 5.3: GHVÇ problemlerinin sonuçlarının toplam fire miktarı açısından karşılaştırılması.....	85

<b>Şekil 5.4:</b> GHVÇ problemlerinin amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırması. ....	86
<b>Şekil 5.5:</b> GHVÇ problemlerinin joker bobin miktar (cm) karşılaştırması.....	87
<b>Şekil 5.6:</b> GHVÇ problemlerinin joker bobin miktar (kg) karşılaştırması.....	87

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> C&P sınıflandırılmasının karşılaştırması Dyckhoff (1990) ve Waescher (2007). .....	14
<b>Tablo 2.2:</b> Malzemelerin çeşitliliği ve atama türü açısından C&P problemleri. ....	16
<b>Tablo 2.3:</b> Sık kullanılan C&P problemleri ve kodları.....	16
<b>Tablo 3.1:</b> 1DCSP problem karmaşıklık tablosu. ....	32
<b>Tablo 5.1:</b> Sayısal örnek verisi – sipariş bilgileri. ....	65
<b>Tablo 5.2:</b> Sayısal örnek verisi – joker (yardımcı) bobin bilgileri. ....	66
<b>Tablo 5.3:</b> Diğer parametre bilgileri. ....	67
<b>Tablo 5.4:</b> Sayısal örnek sonuç çıktıları. ....	68
<b>Tablo 5.5:</b> Sayısal örnek çözüm sonuçları. ....	69
<b>Tablo 5.6:</b> Sayısal örneğe ait atama sonuçları. ....	70
<b>Tablo 5.7:</b> Talebin karşılanması. ....	70
<b>Tablo 5.8:</b> Deneysel test verilerine ilişkin özet bilgi. ....	72
<b>Tablo 5.9:</b> Deneysel testlerin çözüm sonuçları – 3600 sn. ....	74
<b>Tablo 5.10:</b> Deneysel testlerin çözüm sonuçları – 14400 sn. ....	76
<b>Tablo 5.11:</b> Gerçek hayat vaka çalışması verilerine ilişkin özet bilgi.....	77
<b>Tablo 5.12:</b> Gerçek hayat vaka çalışması Cs1 problem verisi.....	78
<b>Tablo 5.13:</b> Gerçek hayat vaka çalışması Cs2 problem verisi.....	78
<b>Tablo 5.14:</b> Gerçek hayat vaka çalışması Cs1 planlama sorumlusu çözümü. ....	79
<b>Tablo 5.15:</b> Gerçek hayat vaka çalışması Cs2 planlama sorumlusu çözümü. ....	79
<b>Tablo 5.16:</b> Gerçek hayat vaka çalışması program çözümleri - 3600 sn.....	80
<b>Tablo 5.17:</b> GHVÇ Cs1 ve Cs3 program çözümleri - 14400 sn.....	81
<b>Tablo 5.18:</b> Gerçek hayat vaka çalışması Cs1 model çözümü. ....	82
<b>Tablo 5.19:</b> Gerçek hayat vaka çalışması Cs2 model çözümü. ....	83
<b>Tablo 5.20:</b> GHVÇ problemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması. ....	84

## KISALTMA-SEMBOL LİSTESİ

<b>1D</b>	: 1 Boyutlu (Tek Boyutlu)
<b>2D</b>	: 2 Boyutlu
<b>3D</b>	: 3 Boyutlu
<b>1DCSP</b>	: Tek Boyutlu Stok Kesme Problemi
<b>C&amp;P</b>	: Kesme ve Paketleme Problemleri
<b>Cs</b>	: Vaka Çalışması (Case Study)
<b>CSB</b>	: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
<b>CSP</b>	: Stok Kesme Problemleri
<b>DP</b>	: Doğrusal Programlama
<b>Ex</b>	: Örnek (Example)
<b>GHVÇ</b>	: Gerçek Hayat Vaka Çalışması
<b>LP</b>	: Lineer Programlama
<b>MILP</b>	: Karışık Tamsayılı Lineer Programlama
<b>NP</b>	: Belirleyici Olmayan Polinom (Non-deterministic Polynomial)

## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam, akademik yaşamımın zorlu fakat en öğretici süreçlerinden biri olmuştur. Bu süreçte karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde ve bilimsel bilgi birikimimi geliştirmemde bana rehberlik eden, titizlikle yaptığı değerlendirmeler, sağladığı geri bildirimler ve sürekli teşvik edici yaklaşımıyla, bilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli danışman hocam Prof. Dr. İbrahim KÜÇÜKKOÇ'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez süreci boyunca bana her zaman destek olan ve motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayarak zorlu çalışma günlerinde bana gösterdiği anlayış ve sabır için sevgili eşim Serap YANIÇ'a, gülümsemesi ve varlığıyla en zor zamanlarımı aydınlatan ve bana ilham kaynağı olan hayatımın en değerli varlığı kızım Afra Ela YANIÇ'a sevgilerimi sunarım.

**Bahkesir, 2025**

**Ramazan YANIÇ**

## 1. GİRİŞ

Stok kesme problemleri mermer, tekstil, cam, metal-çelik, ahşap ve kağıt gibi birçok farklı endüstride ortaya çıkmakta olup kombinatoriyal optimizasyon problemlerinden biridir. Kağıt endüstrisindeki rulo kesme problemleri, fireyi (israfı) ve maliyetleri en aza indirirken müşteri taleplerini karşılamak için büyük kağıt rulolarının daha küçük rulolara kesilmesini optimize etmeyi içerir.

İlgili çalışma kağıt üretim planlaması için bir karar destek sistemi oluşturmaktadır ve müşteri siparişine göre üretim yapan bir kağıt fabrikasında ortaya çıkan rulo kesme problemiyle ilgilidir. Şirketler işletme maliyetlerini düşürmek amacıyla stok malzemesinin müşteri siparişlerine göre kesilmesi sırasında fireyi ve ana malzeme kullanımını en aza indirmeye çalışarak üretim verimliliğini maksimize eden çözümler oluşturmak isterler.

Kağıt fabrikalarında farklı genişliklerde ve çaplarda ana rulolar (tampon) üretilirken, müşterilerden gelen siparişler ise kalite, genişlik ve kağıt türüne göre gruplandırılmış daha küçük rulolar (bobin) olarak kabul edilir. Ana ruloların müşteri siparişlerine göre küçük rulolara (bobin) kesilmesi işlemi "kesme" olarak adlandırılır. Tamponlar farklı bobin genişliklerinin kombinasyonlarından oluşan desenlere (set) göre kesilir. Kesmek için seçilen desenlerin sıralı koleksiyonuna o seriye ait "kesim deseni" denir.

Bu çalışmada incelenen problem, bir dizi müşteri siparişini karşılamak için gereken anlamlı genişlik kombinasyonlarının ve üretilmesi gereken yardımcı bobinlerin sayısının belirlenmesiyle ilgilidir. Çeşitli endüstriyel kısıtlamalar dahil edilmiş olup planlama ve işletme süreçlerinde incelenmiştir. Bobin kesme makinesindeki sınırlı sayıdaki bıçak, tamponları müşteri siparişlerine ya da herhangi bir siparişe karşılık gelmeyen ancak gelecekte satılabilir genişliklerdeki yardımcı (joker) bobinlere dönüştürür. Problemin optimal çözümü, sipariş edilen miktarları karşılamak için ana bobinlere, fazla üretilmiş bobinlere ve kullanılabilir joker bobinlere bağlı uygulanabilir bir desenin kaç kez kesileceğini ve fire minimizasyonunu dikkate alarak belirler. Ana ruloların kesilmesi sırasında oluşan joker bobinler, fabrikanın geçmiş talebine dayalı olarak belirlenir ve gelecekte satış için stoklanır, israf edilmez.

Problemin çözümü karışık tamsayılı doğrusal programlama yöntemiyle Python programlama dilinde Gurobi Solver çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde rulo kesme problemleri ve stok kesme problemleri farklı açılardan detaylı bir şekilde incelenmiş olup çeşitli sektörlerdeki kesme problemleri anlatılıp problemlerin bileşenleri, karakteristikleri ve sınıflandırılması başta olmak üzere problemlerdeki amaçlara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde tek boyutlu stok kesme problemi detaylı şekilde ele alınmıştır. Problemin kısıtları, kombinatorial optimizasyon içindeki yeri ve önemi, zorluk sınıflandırması, çözüm yöntemleri ve literatür taramasıyla zenginleştirilip stok kesme problemleri yayınlarına genel bakış yapılmıştır.

Dördüncü bölümde problemin tanımı ve geliştirilen matematiksel modele ait bilgiler verilmiştir. Kağıt endüstrisi ve kağıt üretim süreci anlatılarak problemin tanımlanması yapıp geliştirilen matematiksel modele ait kümeler, parametreler, amaç fonksiyonu ve kısıtlar anlatılmıştır.

Beşinci bölümde sayısal örnek üzerinden problem detaylı olarak anlatılarak 41 adet test problemi üzerinden geliştirilen model test edilmiş, sonuçları raporlanmış ve gerçek hayat vaka çalışması olarak da kağıt üretim sektöründeki bir fabrikada gerçek veriler üzerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Son bölüm olan Sonuç ve Tartışmalar bölümünde ise çalışma sonucu elde edilen kazanımlar tartışılmış olup gelecekte yapılabilecek çalışmalara yer verilmiştir.

Tez çalışmasındaki gerçek hayat vaka çalışması, ülkemizdeki kağıt sektöründe önemli olup uygulama yapılan kağıt fabrikasının kesim planlama ve dolaylı olarak üretim planlama süreçlerine katkı sağlamıştır. Sektörün zaman içinde yaşadığı dalgalanmalara karşı, ana malzeme kullanımının minimizasyonu veya firenin minimizasyonu gibi farklı amaç fonksiyonu seçimi sunularak esnek bir kesim planlaması yapılmasına olanak sağlayabilir. Yönetilebilir parametreler sayesinde de hali hazırda manuel ve standart parametrelerle yapılan kesim planlamasının, hataları en aza indirerek ve esnek bir şekilde uygulanması hedeflenmiştir.

## 2. RULO KESME PROBLEMLERİ

### 2.1 Stok Kesme Problemlerinin Tanımı

Stok kesme problemleri (Cutting Stock Problems - CSP), çeşitli endüstrilerde atıkları azaltmak, maliyetleri minimize etmek ve üretim verimliliğini artırmak için kullanılan bir optimizasyon problemidir. Kağıt, çelik, cam, tekstil, ahşap gibi pek çok sektörde, büyük boyutlu stokların farklı boyutlarda parçalara kesilerek müşteri taleplerine veya üretim gereksinimlerine uygun hale getirilmesi sürecinde ortaya çıkar. Bu problemler, endüstriyel üretimlerde maliyetleri azaltmak ve malzemelerin kullanımını optimize etmek amacıyla çözülür. İlk olarak Gilmore ve Gomory'nin 1960'larda yaptığı "A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem" ve "Multistage Cutting Stock Problems of Two and More Dimensions" adlı çalışmalarla dikkat çeken stok kesme problemleri, özellikle kaynakların verimli kullanımı ve üretim süreçlerinin optimizasyonu açısından önem taşır (Gilmore ve Gomory, 1961,1963,1964).

Problemin yapısı genellikle şu unsurları içerir:

- Ana stok malzemesi: Kesilecek olan başlangıç malzemesi, örneğin geniş bir kağıt rulosu veya uzun bir metal çubuk.
- Kesilecek parçalar: Bu ana malzemedен elde edilmesi gereken daha küçük parçalar, yani müşteri veya üretim tarafından talep edilen ölçüler.
- Kesim deseni: Ana malzemeyi farklı kombinasyonlarla kesme yolları, yani talebi karşılamak için oluşturulan kesim desenleri.

Stok kesme problemlerinde stok malzemelerinin kesilerek müşteri taleplerini karşılayacak parçalar üretilmesi hedeflenir. Bu süreçte en önemli noktalardan biri stok malzemesine atılacak parçaların geometrik kombinasyonunu belirlemektir (Dyckhoff, 1990). Geometrik kombinasyon, ana stok malzemesi üzerinde farklı boyutlardaki parçaların nasıl yerleştirileceğini ve kesileceğini tanımlayan bir düzenlemedir. Geometrik kombinasyon kesim işlemlerinde kullanılacak olan desenlerin verimli bir şekilde oluşturulmasını sağlar. Farklı boyut ve şekillerdeki parçaların yerleşimini belirlemek, stok kesme problemlerinin çözümünde etkili bir optimizasyon sağlar. Örneğin tek boyutlu stok kesme probleminde, ana rulo veya çubuğun boyuna göre parçaların yan yana dizilimi belirlenirken; iki boyutlu stok kesme problemlerinde, dikdörtgen veya başka şekillerdeki parçaların bir yüzey üzerinde nasıl yerleştirileceği düşünülür.

## 2.2 Rulo Kesme Problemlerinin Stok Kesme Problemleri İçerisindeki Yeri

Rulo kesme problemleri, stok kesme problemlerinin özel bir alt kategorisi olarak değerlendirilir. Genel olarak stok kesme problemleri farklı boyutlardaki malzemelerin belirli ölçülerde parçalanmasını içeren geniş bir problem alanını kapsar. Bu alan malzemenin türüne, kesim yönüne, boyutsal yapıya ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak farklı alt problemlere ayrılır. Rulo kesme problemleri, bu geniş alanın daha dar ve spesifik bir bölümüdür (Ferreira, Neves ve Castro, 1990).

Rulo kesme problemleri, stok kesme problemlerinin tek boyutlu (1D) kesim kategorisine girer. Yani boyutsal olarak bir boyutta kesim işlemleri yapıldığı için stok kesme problemlerinin özel bir durumudur (Gradisar, Jesenko ve Resinovic, 1997). Rulo kesme problemleri sürekli ve uzun rulo biçimindeki malzemelerle ilgilenir. Stok kesme problemlerinin geniş yapısı içinde rulo kesme problemleri, belirli özellikleriyle öne çıkar:

- ❖ **Malzeme Formu:** Stok kesme problemleri genel olarak farklı formlarda (levha, çubuk, blok) malzemeleri içerirken, rulo kesme problemleri büyük ve sürekli formdaki rulo biçimindeki malzemelerle (kağıt, çelik veya kumaş rulo vb.) ilgilenir. Bu durum rulo kesme problemlerinin daha spesifik bir yaklaşım gerektirmesine neden olur.
- ❖ **Kesim Yönü ve Deseni:** Stok kesme problemleri, 2D veya 3D boyutlarda daha karmaşık kesim desenleri oluşturabilirken rulo kesme problemleri sadece 1D (tek boyutlu) kesim işlemleri içerir. Bu da rulo kesme problemlerini daha belirgin ve sınırlı bir problem haline getirir.
- ❖ **Atık Yönetimi ve Optimizasyon:** Her iki problem de atık yönetimi açısından benzer hedefler taşısa da rulo kesme problemleri daha dar bir çerçevede çözümler sunar. Rulo kesme problemleri genellikle uzun ve sürekli malzemelerle çalıştığı için fire yönetimi farklıdır. Stok kesme problemlerinde ise atık yönetimi, daha kompleks şekillerde ortaya çıkabilir.

Rulo Kesme Problemlerinin Stok Kesme Problemlerinden Farkları;

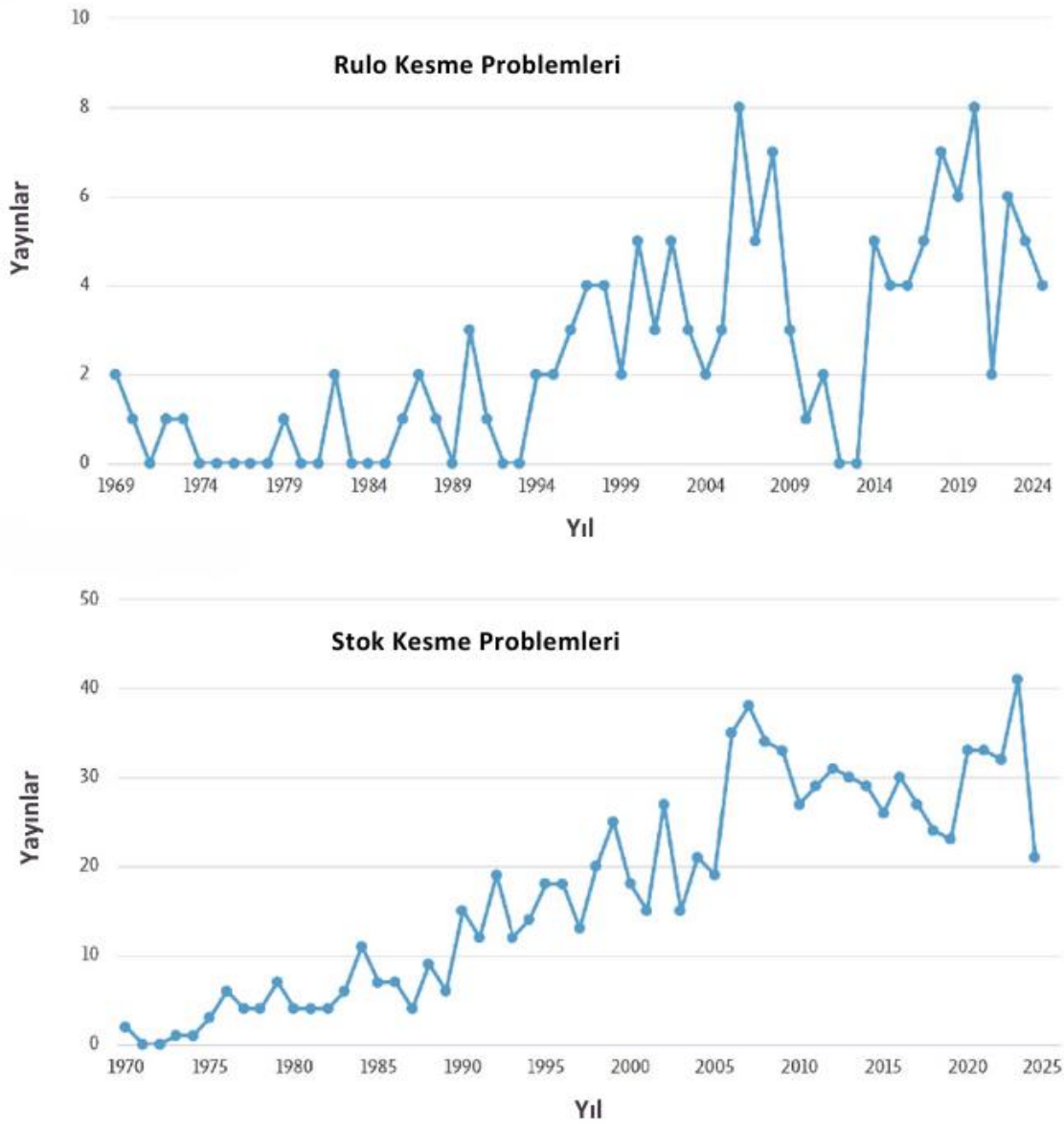
- ❖ **Kesim Yöntemi:** Rulo kesme problemleri genellikle tek bir boyut üzerinde (uzunluk boyunca) kesim yapılmasını gerektirirken, stok kesme problemleri iki veya üç boyutlu kesimler içerebilir. Rulo kesme problemlerinde, boyutsal kısıtlamalar ve rulo

genişliği kesim planını belirler. En uygun çözümlü bulmak için genellikle uzunlamasına ve dairesel kesim yöntemleri kullanılır.

- ❖ Endüstriyel Odak: Rulo kesme problemleri kağıt üretimi, tekstil, metal üretimi ve plastik gibi endüstrilerde yaygındır. Stok kesme problemleri ise inşaat, mobilya, cam üretimi, metal işleme ve ambalaj sanayi gibi geniş bir yelpazede uygulanabilir.
- ❖ Çözüm Teknikleri: Her iki problem de optimizasyon problemleri olarak modellenir ve çözümlür. Genellikle doğrusal programlama, dinamik programlama, sezgisel veya meta-sezgisel algoritmalar kullanılır. Rulo kesme problemleri için daha özel algoritmalar ve optimizasyon yöntemleri (genellikle 1D optimizasyon) kullanılırken, stok kesme problemleri özellikle çok boyutlu kesme problemleri (2D veya 3D) için daha genel ve karmaşık algoritmalar gerektirebilir.

Özetle rulo kesme problemleri genellikle daha özel ve belirli bir formatta kesme gereksinimlerine odaklanırken, stok kesme problemleri daha geniş ve çeşitlilik içeren malzeme kesme ihtiyaçlarını kapsar. Stok kesme problemleri genel olarak malzeme verimliliğini artırmayı amaçlarken, rulo kesme problemleri bunu rulo şeklindeki uzun malzemelerle yapar. Bu ayrım uygulama alanlarına, matematiksel modellere ve optimizasyon hedeflerine göre belirginleşir. Her iki problem tipi de üretim ve kaynak yönetimi açısından son derece önemlidir ve farklı optimizasyon stratejileri gerektirir.

Şekil 2.1’de Scopus veri tabanındaki Rulo Kesme Problemleri ile Stok Kesme Problemleri yayın sayıları karşılaştırılmıştır. Yayın sayıları incelendiğinde rulo kesme problemlerinin, stok kesme problemlerinin özel bir alt kategorisi olduğu sonucu daha iyi görölmektedir.



**Şekil 2.1:** Stok kesme ve rulo kesme problemleri yayın sayıları (Scopus veri tabanı).

### 2.3 Çeşitli Endüstrilerde Stok Kesme Problemleri

Stok kesme problemi çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. En yaygın kullanım alanları şunlardır:

- ❖ Kağıt Endüstrisi

Kağıt endüstrisinde stok kesme problemi, büyük kağıt rulolarının (ana stok) daha küçük boyutlardaki kağıt levhalara veya rulolara kesilmesi sürecinde ortaya çıkar. Bu süreçte amaç, müşteri taleplerini karşılamak için gerekli olan küçük ruloları elde etmek ve kesim sırasında

oluşan atığı-fireyi en aza indirmektir. Örneğin bir kağıt fabrikası, genişliği 650 cm olan ana kağıt rulolarını 250, 240, 150 cm genişliğindeki rulolara kesmek isteyebilir. Ancak istenilen ruloların toplam genişliği, ana rulonun genişliğini tam olarak karşılamazsa, kalan kağıt atık-fire olarak kaybolur. Bu durumda, farklı kesim desenleri kullanarak kesim kaybını en aza indirmek amaçlanır.

#### ❖ Çelik Endüstrisi

Çelik endüstrisinde özellikle çelik levhaların veya çubukların üretiminde stok kesme problemleri yaygındır. Örneğin genişliği belirli bir standartta olan çelik levhalar, farklı uzunluklarda veya genişliklerde parçalara kesilmek zorundadır. Bu kesim işlemi sırasında müşteri taleplerine göre farklı boyutlarda çelik parçalar üretilir ve her kesim deseni, minimum miktarda çelik israfıyla sonuçlanmalıdır. Örneğin bir inşaat şirketi 2 metre uzunluğunda çelik çubuklara ihtiyaç duyarken, çelik üreticisinin elinde 6 metre uzunluğunda çubuklar varsa, bu çubukların uygun şekilde bölünmesi gerekecektir. Bu işlemde amaç, çubukları keserek mümkün olan en az miktarda atık bırakmaktır.

#### ❖ Cam Endüstrisi

Cam endüstrisinde özellikle pencere camları ve cam levha üretiminde stok kesme problemi çok sık karşılaşılan bir durumdur. Genellikle büyük cam levhalar, belirli ölçülerdeki daha küçük cam parçalarına kesilir. Örneğin bir cam fabrikası, genişliği 3 metre ve yüksekliği 2 metre olan cam levhalar üretir. Ancak müşteri talepleri bu levhaların daha küçük boyutlarda (örneğin 1 metreye 1,5 metre) kesilmesini gerektirebilir. Kesim işlemi sırasında, her bir cam parçası elde edildikten sonra kalan parçalar atık olarak kalabilir. Bu durumda kesim desenlerini optimize etmek ve mümkün olduğunca az atık bırakmak için çeşitli yöntemler kullanılır.

#### ❖ Tekstil Endüstrisi

Tekstil endüstrisinde kumaşların kesilmesi sırasında stok kesme problemleri ortaya çıkar. Özellikle hazır giyim ve mobilya döşeme sektörlerinde büyük kumaş rulolarının farklı boyutlardaki parçalara kesilmesi gerekir. Örneğin bir kumaş üreticisi, 5 metre genişliğindeki bir kumaş rulosunu farklı kıyafetler için gerekli olan boyutlara kesmek zorundadır. Ancak her bir kesim işleminde kumaşın bazı kısımları atık olarak kalabilir. Bu durumda, kesim

planları yapılırken hem kesim kaybını minimize etmek hem de istenilen ölçülerdeki parçaları elde etmek için çeşitli yöntemler geliştirilir.

#### ❖ Ahşap Endüstrisi

Ahşap endüstrisinde özellikle mobilya ve inşaat sektörlerinde büyük ahşap levhaların veya kütüklerin daha küçük parçalar halinde kesilmesi sıkça karşılaşılan bir durumdur. Örneğin geniş bir ahşap levhadan çeşitli boyutlarda masalar, sandalyeler veya raflar gibi parçalar kesilmek zorundadır. Ancak bu kesim işlemi sırasında ahşap levhanın tamamı kullanılmaz ve bazı parçalar atık olarak kalabilir. Kesim planları yaparken amaç, minimum miktarda ahşap israfı yaratmak ve mümkün olan en fazla sayıda kullanışlı parça üretmektir.

#### ❖ Plastik Endüstrisi

Plastik endüstrisinde plastik levhalar veya filmler farklı boyutlardaki parçalara kesilir. Örneğin plastik ambalaj üreten bir fabrikada, geniş plastik rulolar müşteri taleplerine göre daha küçük parçalara kesilmek zorundadır. Ancak her kesim işleminde bazı küçük plastik parçalar atık olarak kalabilir. Bu durumda plastik levhayı mümkün olduğunca verimli kullanmak ve minimum atık yaratmak amacıyla farklı kesim desenleri kullanılır.

#### ❖ Gemi Yapım Endüstrisi

Gemi yapım endüstrisinde stok kesme problemleri, özellikle metal ve ahşap gibi büyük levha ve parçaların kesiminde görülür. Gemi gövdeleri veya diğer büyük yapısal parçalar inşa edilirken, geniş metal levhaların veya ahşap blokların belirli boyutlara kesilmesi gerekir. Bu kesim işlemleri sırasında kullanılabilir parçalardan maksimum verimi elde etmek ve kesim kaybını en aza indirmek önemlidir. Gemi yapımı gibi büyük ölçekli projelerde kesim kayıpları ciddi maliyet artışlarına yol açabileceği için kesim işlemi optimizasyonu büyük önem taşır.

## **2.4 Stok Kesme Problemlerinde Amaçlar**

Stok kesme problemlerinde amaç veya hedefler, üretim sürecinde malzeme verimliliğini artırmak ve israfı en aza indirerek maliyetleri düşürmek üzerine kuruludur. Genel itibarıyla bu problemler üzerindeki temel hedefler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ❖ **Malzeme İsrafını Minimize Etmek:** Stok kesme problemlerinde birincil hedef ana malzemeyi kesme işlemi sonucunda ortaya çıkan atığı en aza indirmektir. Bu, kesme sürecinde gereksiz malzeme kaybını azaltarak daha fazla kullanılabilir parça elde edilmesini sağlar. Malzeme israfının minimize edilmesi, özellikle yüksek maliyetli ham maddelerin kullanıldığı sektörlerde önemli bir avantaj sunar (Gilmore ve Gomory, 1961; Dyckhoff, 1990).
- ❖ **Maliyetleri Azaltmak:** Malzeme israfını azaltmak doğrudan maliyetlerin düşmesini sağlar. Kesim desenlerinin optimize edilmesiyle, minimum sayıda stok malzeme kullanılarak belirli talepler karşılanabilir, bu da hammadde maliyetlerinin azalmasını sağlar. Bu amaç özellikle büyük ölçekli üretim süreçlerinde büyük tasarruflar sağlar (Wäscher ve Gau, 1996).
- ❖ **Müşteri Taleplerini Karşılama:** Kesim planları yapılırken müşteri taleplerine uygun ölçülerde ve miktarlarda parça üretilmesi gerekir. Müşteri siparişlerinin doğru ve zamanında karşılanması kesme stok probleminin temel hedeflerinden biridir. Bu hedefin sağlanması müşteri memnuniyetini artırırken, siparişlerin zamanında teslimi de sağlanır (Scheithauer, 1991).
- ❖ **Kesim İşlem Süresini Kısaltmak:** Optimal bir kesim deseni, sadece malzeme verimliliğini değil aynı zamanda üretim hızını da artırır. Daha az sayıda kurulum ve kesim işlemi ile üretim sürecini hızlandırmak, özellikle yüksek hacimli üretim yapan sektörlerde önemli bir verimlilik avantajı sağlar (Wagner, 1999).
- ❖ **Atık Malzemenin Yönetimini Kolaylaştırmak:** Kesim işlemlerinde ortaya çıkan atık miktarını minimuma indirmenin yanı sıra atık yönetimini kolaylaştırmak da önemli bir hedefdir. Daha az atık malzeme ortaya çıkması, depolama ve bertaraf maliyetlerini düşürür. Bu hedef özellikle çevresel sürdürülebilirlik açısından giderek önem kazanmaktadır (Hoffman ve Padberg, 1993).
- ❖ **Üretim Esnekliğini Sağlamak:** Stok kesme problemlerinde farklı talepleri karşılamak için kesim desenlerinin esnek olması üretim esnekliği sağlar. Farklı boyutlarda parçaların üretiminde esneklik sağlanması, değişen müşteri taleplerine hızlıca adapte olunmasını mümkün kılar (Lodi, Martello ve Monaci, 2002).

Bu hedefler, stok kesme problemlerinde optimal kesim desenleri elde edilmesi ve endüstriyel süreçlerin maliyet-etkin bir şekilde yönetilmesi açısından önemlidir. Kesim desenlerinin optimizasyonu, üretim verimliliğini artırmanın yanı sıra çevresel ve ekonomik faydalar da sağlar (Dagli ve Tatoglu, 1986).

## 2.5 Stok Kesme Problemlerinin Bileşenleri

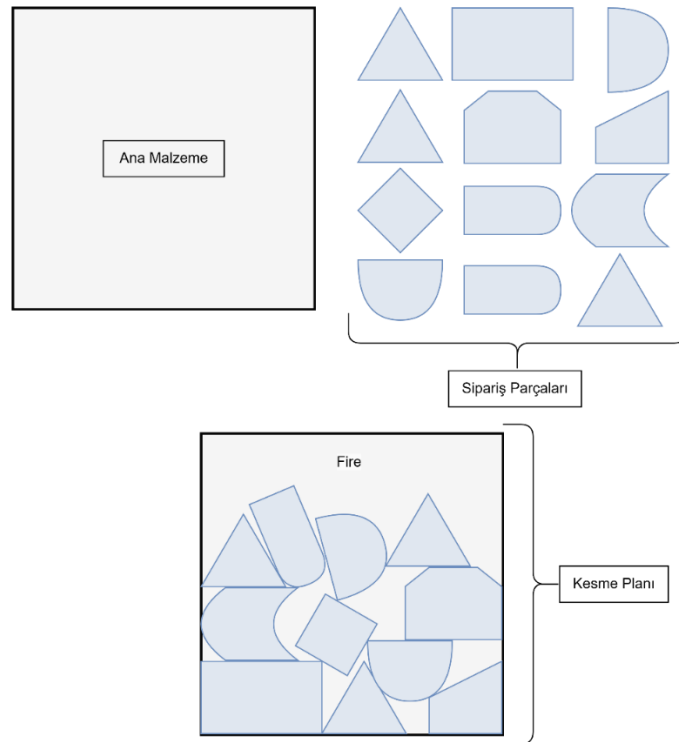
Stok kesme problemlerinin temel bileşenleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- ❖ Ana Stok Malzeme (Master Stock): Stok kesme problemlerinde kullanılan ana malzeme genellikle büyük boyutlarda bir rulo, levha veya çubuk olarak bulunur. Bu ana stok malzeme, müşteri taleplerini karşılayacak ölçülere sahip daha küçük parçalara bölünmek üzere kesilir. Ana stok malzeme, kesim planlamasının başlangıç noktasını ve temel bileşenini oluşturur (Dyckhoff, 1990).
- ❖ Talep Edilen Parçalar (Required Pieces): Müşterilerin belirli ölçülerde talep ettiği parçalar, stok kesme problemlerinin çözümünde elde edilmesi gereken nihai ürünlerdir. Bu parçalar ana stok malzemenin kesilmesiyle üretilir ve her bir parçanın boyutu, müşteri taleplerine göre değişiklik gösterir. Talep edilen parçalar problemin amacını ve kesim planının temel hedefini oluşturur (Wäscher ve Gau, 1996).
- ❖ Kesim Deseni/Planı (Cutting Pattern): Kesim deseni, ana stok malzeme üzerinde yapılacak kesimlerin nasıl bir kombinasyonla gerçekleştirileceğini belirleyen bir düzenlemedir. Farklı boyutlardaki parçaların ana stok malzeme üzerinde yerleştirilmesiyle oluşan kesim deseni, israfı en aza indirmek ve talep edilen parçaları karşılamak amacıyla optimize edilir (Gilmore ve Gomory, 1961).
- ❖ Fire Kaybı (Trim Waste): Kesim işlemi sonrasında, ana stok malzemedan kullanılmayan ve geri kazanılamayan küçük parçalar oluşur. Bu parçalara “trim kaybı” denir ve israf edilen malzeme miktarını ifade eder. Fire kaybının minimize edilmesi, stok kesme problemlerinde temel bir hedeftir ve etkin bir kesim deseni ile bu kayıplar en aza indirilebilir (Scheithauer, 1991).
- ❖ Kesim Makinesi ve Bıçakları (Cutting Machine and Blades): Stok kesme problemlerinde, ana stok malzemenin kesimini sağlayan makineler ve bıçaklar önemli bir rol oynar. Kesim makinelerinin kapasitesi ve bıçak sayısı, oluşturulacak kesim desenlerini doğrudan etkiler ve kesim sürecindeki kısıtlamalardan biridir. Bu nedenle kesim makinelerinin ve bıçakların kapasiteleri dikkate alınarak kesim planlaması yapılır (Hoffman ve Padberg, 1993). Şekil 2.2’de örnek bir kesim bıçağı verilmiştir.



**Şekil 2.2:** Kesim bıçağı örneği.

- ❖ Kısıtlamalar (Constraints): Stok kesme problemlerinde hem malzeme hem de üretim süreci ile ilgili çeşitli kısıtlar bulunur. Örneğin müşteri taleplerine uygun ölçüde parça üretilmesi zorunluluğu veya stok malzemenin maksimum genişlik ve uzunluk sınırları gibi kısıtlamalar bu probleme özğüdür. Ayrıca kesim makinelerinin kapasiteleri ve kurulum maliyetleri de kısıtlamalar arasında yer alır (Lodi, Martello ve Monaci, 2002).



**Şekil 2.3:** Kesme problemleri bileşenleri.

Bu bileşenler, stok kesme problemlerinin tanımlanmasında ve çözümünde temel unsurları oluşturur. Her bir bileşen, kesim işleminin planlanması ve optimize edilmesinde önemli rol oynar ve üretim sürecindeki verimliliği artırmaya katkıda bulunur.

## 2.6 Stok Kesme Problemlerinin Fenomenolojisi

"Stok kesme problemlerinin fenomenolojisi" ifadesi, stok kesme problemlerinin yüzeyledeki görüngülerini (fenomenlerini) inceleyen ve bu problemlerin altında yatan özleri veya mekanizmaları anlamaya çalışan bir yaklaşımı ifade eder. Bu sorunların nasıl ortaya çıktığını, ne tür durumlarda belirdiğini ve bu olguların özsel özelliklerini derinlemesine analiz etmeyi amaçlar.

Fenomenoloji burada, stok kesme problemlerinin sadece yüzeysel gözlemleriyle yetinmeyip bu problemlerin ardındaki anlamları ve yapısal ilişkileri keşfetmeyi vurgular.

Stok kesme problemlerinin fenomenolojisini özetlemek gerekirse;

- ❖ Kesme İşleminin Ekonomik Etkisi: Stok kesme problemlerinin fenomenolojisinde ekonomik etkiler ön plandadır. Kesim işlemleri sırasında ortaya çıkan trim kaybı, doğrudan malzeme israfına ve dolayısıyla maliyet artışına yol açar. Bu ekonomik etki birçok sektörde kesme stok problemlerinin optimizasyonunu kritik hale getirir (Gilmore ve Gomory, 1961).
- ❖ Verimlilik ve Optimizasyon Arayışı: Stok kesme problemleri üretim süreçlerinin verimliliğini artırma gereksinimiyle doğrudan ilişkilidir. Fenomenolojik olarak bu problemler, ana stok malzemenin en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak için çözümler sunar. Malzeme verimliliğini artırma çabası, endüstriyel üretim süreçlerinde kesme stok problemlerinin optimizasyon arayışını sürekli kılar (Dyckhoff, 1990).
- ❖ Matematiksel ve Hesaplamalı Yaklaşımların Gerekliliği: Stok Kesme problemlerinin çözümü, kombinatoryal doğası gereği karmaşıktır ve çoğunlukla matematiksel ve hesaplamalı yaklaşımlar gerektirir. Kesme işleminin fenomenolojik bir özelliği olarak bu problemler için kullanılan doğrusal programlama, sezgisel algoritmalar ve meta-sezgisel yöntemler, optimal veya yaklaşık çözümler sunarak üretim süreçlerine katkı sağlar (Wäscher ve Gau, 1996).
- ❖ Atık Yönetimi ve Çevresel Etkiler: Fenomenolojik olarak stok kesme problemleri çevresel etkilerle de ilişkilidir. Kesim işlemi sırasında oluşan trim kaybının

azaltılması, sadece maliyetleri değil, aynı zamanda çevresel etkileri de minimize eder. Atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik, günümüzde kesme stok problemlerinin çözümünde önemli bir yere sahiptir (Hoffman ve Padberg, 1993).

- ❖ Esneklik ve Adaptasyon İhtiyacı: Stok kesme problemleri, müşteri taleplerine ve pazar gereksinimlerine göre esneklik ve adaptasyon gerektirir. Fenomenolojik olarak kesme işlemlerinde esnek kesim desenleri kullanarak değişen taleplere hızlıca yanıt verebilme yeteneği, üretim süreçlerinde stok kesme problemlerini çözmenin bir başka boyutudur (Lodi, Martello ve Monaci, 2002).
- ❖ Endüstriyel Uygulama ve Çözüm Zorlukları: Stok kesme problemlerinin fenomenolojisi, endüstriyel uygulamalarda yaşanan pratik zorlukları da içerir. Büyük ölçekli üretimlerde kesme işlemlerinin yönetilmesi ve optimal çözümlere ulaşılması zordur. Bu problemlerin çözümü, endüstrideki pratik zorlukların üstesinden gelmek için özel olarak geliştirilmiş yöntemler gerektirir (Scheithauer, 1991).

Bu fenomenolojik bakış açısı, stok kesme problemlerinin sadece üretim verimliliğini artırmaya yönelik bir çözüm aracı olmadığını, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve adaptif yönleriyle de endüstriyel süreçlerde derin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Stok kesme problemlerinin bu çok yönlü doğası, onları modern üretim ve endüstriyel optimizasyon süreçlerinde vazgeçilmez kılar.

## **2.7 Stok Kesme Problemlerinin Sınıflandırılması**

Dyckhoff (1990), stok kesme ve yerleştirme problemlerinin ortak özelliklerini analiz ederek çeşitli problem türlerini ve kavramlarını sistematik bir şekilde birleştirerek kapsamlı bir tipoloji geliştirmiştir. Dyckhoff ve Finke (1992), C&P problemlerinin genel türlerini, problemin boyutu, atmanın türü ve ana/küçük parçaların çeşitliliği çerçevesinde tanımlamışlardır. Waescher, Haußner ve Schumann (2007), Dyckhoff'un tipolojisini temel alarak daha detaylı bir sınıflandırma geliştirmiş ve kesme ile yerleştirme problemlerini daha spesifik kategorilere ayırmışlardır. Bu sınıflandırma, problemin yapı özelliklerine, uygulanabilir kesim desenlerine ve kısıtlamalara dayanır. Tablo 2.1'de literatürdeki Dyckhoff (1990) ve Waescher (2007)'e ait tipolojiler gösterilmektedir (Oguranti ve Oluleye, 2016).

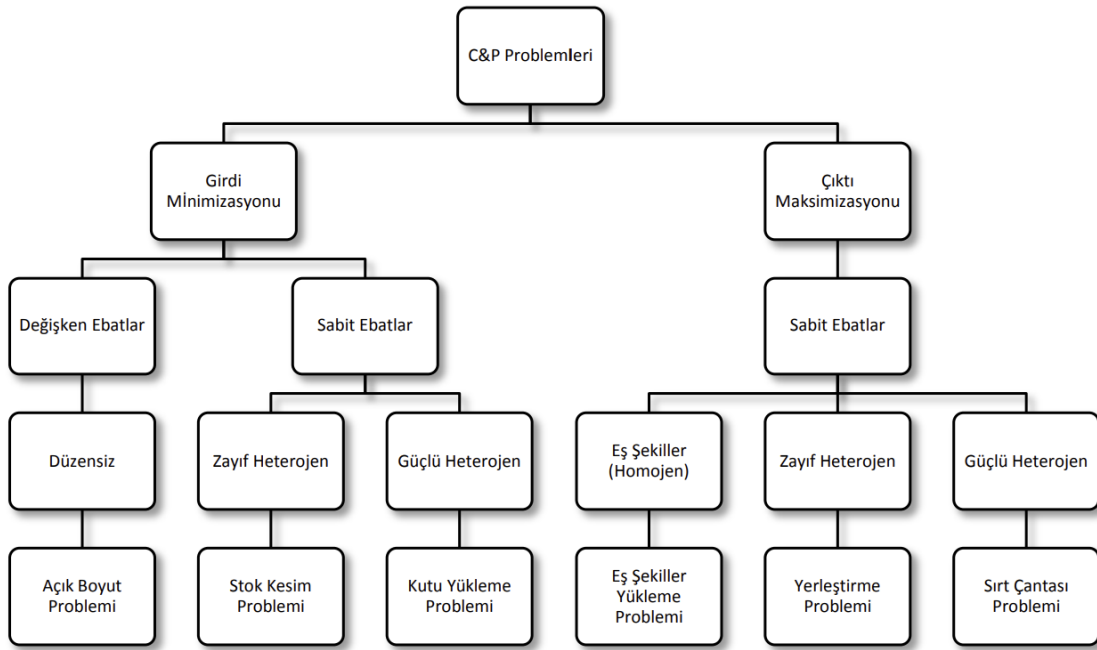
**Tablo 2.1:** C&P sınıflandırılmasının karşılaştırması Dyckhoff (1990) ve Waescher (2007).

<i>Karakteristik</i>	<b>Dyckhoff C&amp;P tipolojisi</b>		<b>Waescher geliştirilmiş C&amp;P tipolojisi</b>	
	<i>Sembol</i>	<i>Tanım</i>	<i>Sembol</i>	<i>Tanım</i>
Boyut	1	Bir Boyutlu	1	Bir Boyutlu
	2	İki Boyutlu	2	İki Boyutlu
	3	Üç Boyutlu	3	Üç Boyutlu
	N	N Boyutlu, N>3	N	N Boyutlu, N>3
Atama Türü	B	Tüm büyük nesnelere ve Bazı küçük nesnelere	OM	Çıktı değeri maks.
	V	Bazı büyük nesnelere ve Tüm küçük nesnelere	IM	Girdi değeri min.
Büyük nesnelere çeşitliliği	O	Tek büyük nesne	O	Tek büyük nesne OA tüm boyutlar sabit OO bir değişken boyut OM daha fazla değişken boyut
	I	Birçok aynı büyük nesne	SO	Birçok büyük nesne SI aynı büyük nesnelere SW zayıf heterojen çeşitlendirme SS güçlü heterojen çeşitlendirme
	D	Farklı büyük nesnelere		
Küçük nesnelere çeşitliliği	F	Farklı şekillerde az sayıda küçük nesne	IS	Aynı küçük nesnelere
	M	Birçok farklı şekilde çok sayıda küçük nesne	W	Zayıf heterojen çeşitlendirme
	R	Görece az sayıda farklı şekillerde çok sayıda küçük nesne	S	Güçlü heterojen çeşitlendirme
	C	Birbirinin aynı çok sayıda küçük nesne		

Dyckhoff (1990), tek boyutlu stok kesme probleminin çözümünü ikiye ayırır: öge odaklı ve desen odaklı yaklaşımlar. Öge odaklı yaklaşım, kesilecek her bir ögenin bireysel olarak ele alınmasıyla karakterize edilir. Desen odaklı yaklaşımda ise ilk olarak sipariş uzunlukları kesim desenleri halinde birleştirilir ve bu desenlerin kesim sıklıkları talebi karşılayacak şekilde belirlenir. Desen odaklı yaklaşımdaki kısıtlamalar, Gilmore ve Gomory (1961, 1963) algoritmasına dayanır. Ancak desen odaklı yaklaşım, yalnızca stokların aynı uzunlukta veya birkaç standart uzunlukta olduğu durumlarda mümkündür. Tüm stok uzunlukları farklı olduğunda ve sıklıklar belirlenemediğinde öge odaklı yaklaşım kullanılır. Waescher ve ekibinin sınıflandırması, stok kesme problemlerini daha spesifik hale getirerek belirli endüstrilerde kullanılan kesim desenlerini, hedefleri ve kısıtlamaları daha detaylı ele alır. Bu

sınıflandırma çözüm geliştirme sürecinde daha fazla bilgi sağlamakta ve özellikle endüstriyel uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır.

Kesme ve paketleme problemlerinin (C&P) temel tipleri “atama türü” ve “küçük parçaların çeşitliliği” kriterlerinin kombinasyonlarından oluşmaktadır. G. Wascher (2007) tarafından temel problem tipleri Şekil 2.4’deki şekilde çeşitlendirilmiştir (Bayır, 2012).



Şekil 2.4: Temel problem tipleri.

Atama türü ve parçaların çeşitliliği açısından C&P probleminin dört genel türü aşağıdaki temsili isimler ile tanımlanmaktadır:

- ❖ Kutu yükleme problemi (BP-bin packing)
- ❖ Stok kesme problemi (CS-cutting stock)
- ❖ Sırt çantası problemi (KS-knapsack)
- ❖ Palet yükleme problemi (PL-pallet loading)

Tablo 2.2’de atama türü ve parçaların çeşitliliği çerçevesinde bu türlere ait genel özellikler gösterilmektedir (Bayır, 2012).

**Tablo 2.2:** Malzemelerin çeşitliliği ve atama türü açısından C&P problemleri.

			Atama Türü	
			2.Tür Atama	3.veya 4. Tür Atama
Malzemelerin Çeşitliliği	Homojen		PL	
	Heterojen	Çeşit başına az sayıda malzeme	KS	BP
		Çeşit başına çok sayıda malzeme	KS	CS

Tablo 2.3’te uygulamada sık kullanılan kesme ve paketleme problemleri ile kodları görülmektedir (Gümüş, 2012; Köksal, 2024).

**Tablo 2.3:** Sık kullanılan C&P problemleri ve kodları.

<i>Problem Türü</i>	<i>Kodu</i>
Palet Yükleme	2/B/O/C
Klasik Sırt Çantası Problemi	1/B/O
Konteyner Yükleme	3/V/I
Klasik Stok Kesme Problemi	1/V/I/R
Levhalarda Kesme Kaybı	2/ / /
İki Boyutlu Malzeme Kesme	2/V/I/R
Montaj Hattı Dengeleme	1/V/I/M
Bellek Tahsisi	1/V/I/M
Para Bozdurma	1/B/O/R
Çok Dönemli Sermaye Bütçeleme	N/B/O

Tabloya göre klasik sırt çantası problemi, bir büyük nesnenin küçük öğeler kümesinden seçilerek paketlenmesi gereken 1-boyutlu bir türü temsil eder. Tipik palet yükleme problemi benzer boyutlara ve şekillere sahip olan öğelerin yerleştirilmesini gerektiren 2-boyutlu bir problem olup özel birçok boyutlu sırt çantası problemi olarak düşünülebilir. Çift kutu paketleme problemleri ise 1-boyutlu çoklu sırt çantası problemlerinin özel durumlarıdır (Köksal, 2024).

## 2.8 Stok Kesme Problemlerinin Karakteristikleri

Stok kesme problemlerinde karakteristikler bu problemlerin çözümünü belirleyen önemli özelliklerdir. Her bir karakteristik stok kesme probleminin türüne göre özel çözümler gerektirir ve optimizasyon sürecinde etkin rol oynar.

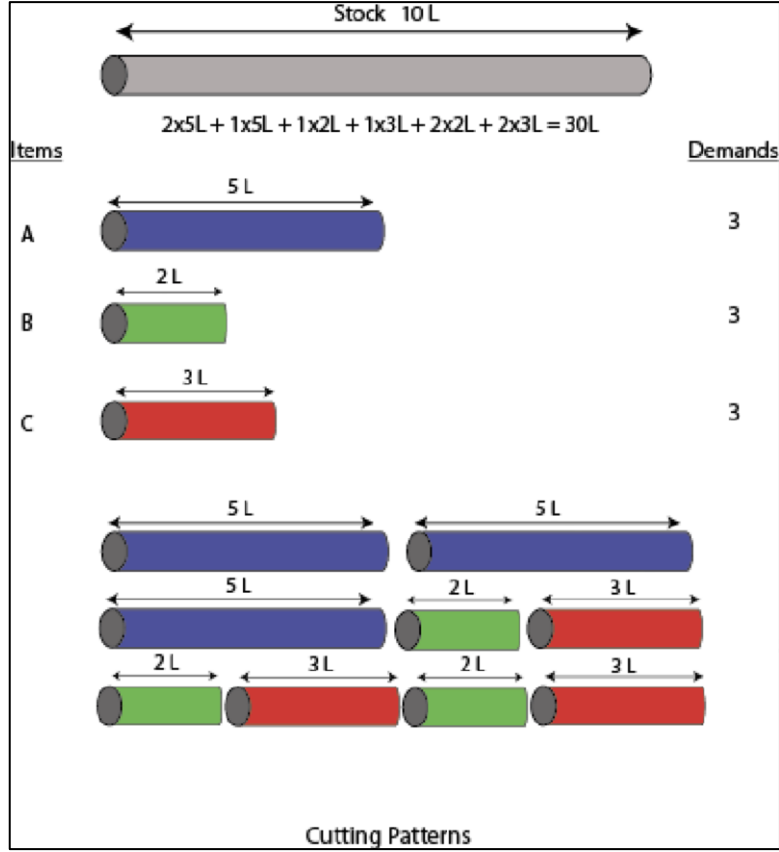
Bu karakteristikler stok kesme problemlerini çözme sürecinde belirleyici unsurlardır. Doğru çözümler, bu karakteristiklerin dikkatlice analiz edilmesiyle sağlanır. Her bir karakteristik maliyetleri azaltma, verimliliği artırma, israfı en aza indirme ve çevresel etkileri minimize etme gibi hedeflerde kritik rol oynar. Özellikle endüstriyel uygulamalarda stok kesme problemlerinin karakteristiklerini anlamak, gerçek dünyada uygulanabilir çözümler üretmek için temel teşkil eder. Stok kesme problemlerindeki başlıca karakteristikler:

### 2.8.1 Boyut

Stok kesme problemleri genellikle tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) olarak sınıflandırılır ve bu boyutlar, problemde kullanılacak kesim stratejilerini belirler. Problemin boyut sayısı kullanılacak algoritmalar ve çözüm stratejilerini doğrudan etkiler. Boyut kavramı ana malzemenin kesim sürecindeki geometrik özelliklerini ifade eder ve çözüm sürecinde önemli bir rol oynar (Ergün, 2004). Örneğin tek boyutlu problemler için doğrusal programlama tercih edilirken iki ve üç boyutlu problemlerde daha karmaşık algoritmalar ve sezgisel yöntemler gerekebilir. Bu karakteristik atık minimizasyonu ve maliyet optimizasyonu gibi hedeflerde etkili çözümler sunar (Dyckhoff, 1990).

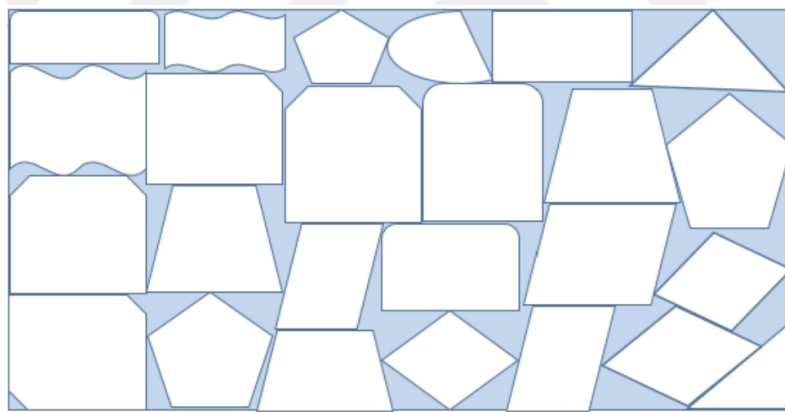
- ❖ **Tek Boyutlu Stok Kesme Problemleri (1D-CSP):** Bu türde yalnızca malzemenin uzunluğu veya genişliği dikkate alınır. Örneğin uzun çubuklar veya rulolar belirli ölçülerdeki parçalara kesilir. Bu problemler özellikle metal çubuk, boru veya kağıt rulolar gibi malzemelerde yaygındır ve çözüm süreçlerinde doğrusal programlama ve sezgisel algoritmalar sıklıkla kullanılır (Dyckhoff, 1990; Wäscher ve Gau, 1996).

Şekil 2.5' te tek boyutlu kesme problemi örneği verilmiştir (Tanır, Uğurlu, Güler ve Nuriyev, 2019).



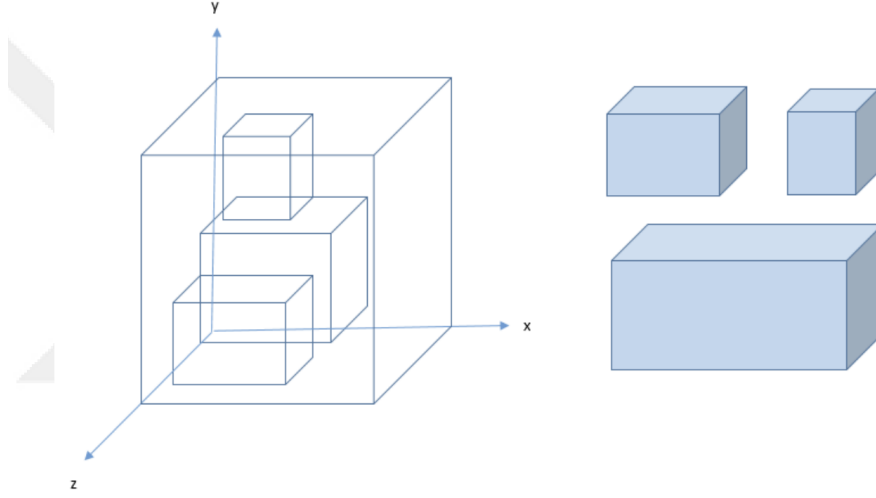
Şekil 2.5: Tek boyutlu kesme problemi örneği.

- ❖ **İki Boyutlu Stok Kesme Problemleri (2D-CSP):** İki boyutlu problemler levha veya geniş yüzey gibi malzemelerin belirli boyutlarda parçalara kesilmesini içerir. Bu tür problemler cam, deri, mobilya, tekstil ve metal levhaların kesilmesinde yaygın olarak kullanılır. İki boyutlu stok kesme problemleri atık miktarını en aza indirmek için genellikle dikdörtgen yerleştirme algoritmaları veya yonga kesim desenleri gibi özel algoritmalar gerektirir (Gilmore ve Gomory, 1965; Dagli ve Tatoglu, 1986). Şekil 2.6'da iki boyutlu stok kesme örneği verilmiştir (Altürk, 2019).



Şekil 2.6: İki boyutlu kesme problemi örneği.

- ❖ **Üç Boyutlu Stok Kesme Problemleri (3D-CSP):** Bu tür problemler, blok veya kütük gibi üç boyutlu malzemelerin küçük parçalara ayrılmasını içerir. Üç boyutlu stok kesme daha karmaşık bir yapı gerektirir ve endüstriyel uygulamalarda özellikle mermer, mobilya, ambalajlama ve kargo sektörlerinde yaygındır. Burada kesilecek parçaların hacimleri göz önünde bulundurulur ve bu nedenle çözüm süreci daha karmaşık algoritmalara ihtiyaç duyar (Scheithauer, 1991). Şekil 2.7’de üç boyutlu bir stok kesme örneği verilmiştir (Altürk, 2019).



**Şekil 2.7:** Üç boyutlu kesme problemi örneği.

**Boyut Kavramının Problemin Çözümüne Etkisi:** Boyut stok kesme problemlerinin çözümünde önemli bir rol oynar çünkü her boyut farklı çözüm yaklaşımlarını gerektirir. Örneğin tek boyutlu problemlerde doğrusal programlama yöntemleri etkili olurken, iki boyutlu ve üç boyutlu problemlerde meta-sezgisel algoritmalar (genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu vb.) tercih edilir (Hoffman ve Padberg, 1993; Lodi, Martello ve Monaci, 2002).

### 2.8.2 Atama Türü

Stok kesme probleminin karmaşıklığını etkileyen diğer önemli karakteristiği atama biçimidir. Stok kesme problemleri alanında, yerleşim ve yükleme (packing and loading) süreçlerini ifade eden çeşitli kavramlar bulunmaktadır. Bu kavramlar malzemelerin stoktan alınarak kesim veya paketleme süreçlerine hazırlanmasında kullanılan teknikleri ve amaçları temsil eder.

Dört tip atama biçimi kabul edilmiştir.

**1.Tür Atama (Temel Yerleşim Problemi):** Tüm stok malzemeleri tüketilirken tüm siparişlerin karşılanması zorunlu değildir. Temel yerleşim problemi belirli bir alana veya konteynere mümkün olan en fazla sayıda veya en uygun yerleşimle nesnelerin yerleştirilmesini hedefler. Bu problem genellikle stok kesme problemlerinde, kesilecek nesnelerin ana stok malzemeye nasıl yerleştirileceğini belirlemek için kullanılır. Bu yerleşim türü daha karmaşık yükleme veya paketleme problemlerinin temelini oluşturur.

Örnek: Tekstil Endüstrisi – Tekstil fabrikalarında geniş kumaş rulolarının belirli ölçülerdeki parçalara kesilmesi için yerleşim desenleri optimize edilir. Kumaşın en az atıkla kesilmesi hedeflenir ve bu optimizasyon için sezgisel algoritmalar kullanılır (Gilmore ve Gomory, 1961; Dyckhoff, 1990; Wäescher ve Gau, 1996).

**2.Tür Atama (Belade Probleme):** Almanca kökenli olan Belade Probleme, yükleme problemlerini ifade eder ve genellikle belirli bir konteynere (örneğin bir kamyon veya kutuya) malzemelerin yerleştirilmesi sürecini kapsar. Ana malzemenin tümü parçalar kümesinden seçilmiş bazı elemanlara atanmakta olup her bir ana malzemeye en az bir parçanın atanması söz konusudur. Bu durumda oluşturulan kesim planlarında bazı parçalar yer almayabilir. Bu problemde amaç, mevcut alanı maksimum düzeyde kullanarak tüm nesneleri en verimli şekilde yerleştirmektir. Belade Probleme genellikle lojistik ve taşımacılık sektörlerinde karşılaşılan bir problemdir ve yükleme sırasında malzemelerin güvenli ve dengeli bir şekilde yerleştirilmesine odaklanır.

Örnek: Lojistik ve Taşımacılık Sektörü – Bir lojistik firmasında farklı boyutlardaki kutular bir kamyonun içine yerleştirilirken, mevcut alanın en verimli şekilde kullanılması hedeflenir. Kutular kamyonun kapasitesini tam kullanacak şekilde düzenlenir (Wäescher ve Gau, 1996; Hinterding ve Khan, 1996; Scheithauer, 1991).

**3.Tür Atama (Verlade Probleme):** Parçaların tümü stok malzemelerinin yer aldığı kümeden seçilmiş bazı elemanlara atanmakta olup 2. tür atamanın tersi bir durumdur. Seçilmeyen malzemeler için kesim planları oluşturulmaz. Yükleme ve taşıma işlemiyle ilgili daha geniş kapsamlı bir problemdir. Bu problem, nesnelerin yalnızca bir alana sığdırılması değil, aynı zamanda taşınma sırasında güvenli ve dengeli bir dağılım sağlanmasını da içerir. Verlade Probleme özellikle lojistik operasyonlarda önemlidir ve nesnelerin taşıma sırasında

devrilme, hareket etme veya hasar görme riskini minimize etmeye yönelik düzenlemeler yapılmasını gerektirir. Yükleme sırasında nesnelere ağırlık merkezlerinin dengelenmesi bu tür problemlerde önemli bir kriterdir.

Örnek: Havacılık ve Uçak Yükleme – Hava kargo taşımacılığında yüklerin uçakta güvenli ve dengeli bir şekilde yerleştirilmesi çok önemlidir. Yüklerin uçakta ağırlık merkezine göre düzenlenmesi uçuş güvenliği için kritik olduğundan, bu tür bir yerleşim problemi sıklıkla göz önünde bulundurulur. Bu yaklaşım uçuş sırasında dengenin korunmasına yardımcı olur (Hoffman ve Padberg, 1993 ; Gilmore ve Gomory, 1961 ; Dyckhoff, 1990).

**4. Tür Atama (Lade Probleme):** Lade Probleme terimi, yükleme işlemiyle doğrudan ilişkili olup bir taşıma aracının veya depolama alanının belirli kapasite ve düzenlemelere göre doldurulması sürecini ifade eder. Bu problemde amaç, tüm mevcut nesnelere belirli kısıtlamalar doğrultusunda (örneğin ağırlık veya hacim kısıtlamaları) yerleştirilmesidir. Lade Probleme hem konteyner içindeki alanın en verimli şekilde kullanılmasını hem de yükleme işleminin hızlı ve pratik olmasını sağlamaya odaklanır. Mevcut parçalar kümesinden seçilmiş elemanlar, stok malzemeleri kümesinden seçilen elemanlara atanmaktadır. Elde edilen kesim planlarında bu elemanlar yer almaktadır.

Örnek: Depolama ve Stok Yönetimi – Depolarda farklı boyutlardaki ürünler belirli kapasite ve ağırlık sınırlarına sahip raflara yerleştirilir.

### **2.8.3 Girdi ve Çıktılara İlişkin Karakteristikler**

Stok kesme problemlerinde kesime giren ana malzeme ve kesimden çıkan parçaların türleri çeşitlilik gösterir. Bu problemler kesilecek ana malzemenin ve elde edilen parçaların türüne göre homojen ve heterojen olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma stok kesme problemlerinin çözüm sürecini doğrudan etkiler; homojen ve heterojen malzemeler için kullanılan yöntemler farklıdır ve optimizasyon stratejileri bu çeşitliliğe göre şekillenir.

Homojen stok kesme problemleri, kesime giren ana malzeme ve kesimden çıkan parçaların aynı veya benzer özelliklere sahip olduğu durumlardır. Çelik fabrikalarında belirli bir standart boyutta çelik çubuklar kesilir. Bu çubuklar belirli uzunluklarda sabit boyutlara bölünerek kullanıma sunulur. Çelik çubukların kesimi tek bir boyutta ve türde stok kullanılarak yapılır; bu, homojen bir stok kesme problemine örnektir (Wäescher ve Gau,

1996). Homojen problemlerde kesim desenleri daha az çeşitlilik gösterir ve çözüm algoritmaları daha hızlı sonuç verir, bu da üretim sürecinde maliyet ve zaman avantajı sağlar.

Heterojen stok kesme problemleri, ana malzemenin veya kesimden elde edilen parçaların farklı özelliklere sahip olduğu durumlardır. Bu tür problemlerde kesim işlemi sırasında farklı boyut ve türde malzemeler bulunur. Heterojen stok kesme problemleri optimizasyon sürecinde daha fazla çeşitliliğe ihtiyaç duyar ve genellikle daha karmaşıktır. Mobilya endüstrisinde ahşap levhaların kesimi heterojen bir kesme problemine örnektir. Ahşap levhalar farklı ölçülerde mobilya parçalarına kesilerek üretilir ve her mobilya parçası için farklı boyutlarda kesim yapılması gerekebilir. Bu durumda kesim desenleri oldukça çeşitli olabilir ve farklı boyutlarda parçalar elde edilmesi gerektiği için optimizasyon süreci karmaşık hale gelir (Scheithauer, 1991; Lodi, Martello ve Monaci, 2002).

Homojen ve heterojen stok kesme problemleri, endüstriyel kesim süreçlerinde farklı çözüm yaklaşımları gerektirir. Homojen kesme problemleri çözüm sürecinde daha basit algoritmalar ve düzenli kesim desenleri ile çözülürken, heterojen kesme problemleri daha fazla veri ve karmaşık optimizasyon algoritmaları gerektirir. Heterojen problemler, endüstriyel süreçlerde kaynak verimliliğini artırmak ve atığı minimize etmek amacıyla geniş bir çözüm yelpazesi sunar (Hinterding ve Khan, 1996; Hinterding ve Khan, 1996).

Bu sınıflandırma stok kesme problemlerinde doğru çözüm yöntemini seçmek ve endüstriyel verimliliği artırmak için kritik öneme sahiptir. Homojen problemlerde daha hızlı ve düşük maliyetli çözümler sağlanırken, heterojen problemler malzeme çeşitliliğini en iyi şekilde değerlendirerek endüstriyel taleplere daha geniş bir çözüm sunar.

**Ana Malzeme Seçimi:** Stok kesme problemlerinde önemli bir aşama da kesilecek ana malzemelerin seçimidir ve üç şekilde incelenir.

- ❖ Tek çeşit ana malzemenin olması durumu,
- ❖ Aynı boyutta birden fazla ana malzemenin olması durumu,
- ❖ Farklı boyutlarda ve miktarlarda ana malzemenin olması durumudur. (Bu durumda hangi ana malzeme çeşidinin seçileceği de ayrı bir problem konusu olmuş olur.)

#### **2.8.4 Kesim Planlarına İlişkin Kısıtlar**

Stok kesme problemlerinde kesim planlarının oluşturulmasında çeşitli kısıtlar bulunur. Bu kısıtlar kesim işlemi sırasında malzeme verimliliğini artırmak, atığı azaltmak ve üretim sürecini optimize etmek amacıyla dikkate alınır (Albayrak, 2013). Aşağıda stok kesme problemlerindeki önemli kesim planı kısıtları açıklanmıştır.

##### **❖ Mesafe veya Aralık Kısıtı:**

Mesafe veya aralık kısıtı, kesim işlemi sırasında belirli parçalar arasında bırakılması gereken minimum veya maksimum mesafeyi ifade eder. Bu kısıt özellikle kesim sırasında istenmeyen hareketleri önlemek veya malzeme kaybını en aza indirmek için kullanılır. Parçalar arasında bırakılan boşluk, kesim desenlerinin etkinliğini ve stok malzemenin daha verimli kullanımını sağlar (Gilmore ve Gomory, 1961; Dyckhoff, 1990).

Örnek: Mobilya üretiminde belirli bir ahşap levha üzerinde kesilecek parçalar arasında belli bir mesafe bırakmak, daha stabil kesim yapılmasını sağlar ve israfı önler.

##### **❖ Pozisyon veya Çevirme Kısıtı:**

Pozisyon veya çevirme kısıtı, kesilecek parçaların belirli bir yönde veya açıda yerleştirilmesini gerektirir. Bazı malzemeler veya parçalar, desen veya malzeme özellikleri nedeniyle yalnızca belirli bir pozisyonda kesilebilir. Bu kısıt özellikle desenli malzemelerde veya yapısal olarak belirli bir yönde kesilmesi gereken materyallerde önemlidir (Scheithauer, 1991; Wäescher ve Gau, 1996).

Örnek: Tekstil endüstrisinde desenli kumaşların kesilmesi sırasında, desenin belirli bir yönde olması gerektiği için kumaş parçaları çevrilmeden kesilir.

##### **❖ Parça Çeşidi Kısıtı:**

Parça çeşidi kısıtı, kesim planında yalnızca belirli sayıda veya türde parçanın yer alabileceğini ifade eder. Bu kısıt özellikle belirli bir siparişin karşılanması için gereken parça sayısına veya çeşitliliğine göre kesim planının optimize edilmesi gerektiğinde kullanılır. Parça çeşidi kısıtı çeşitli boyutlardaki parçaların tek bir kesim planında yer almasını sağlayarak verimliliği artırır (Hoffman ve Padberg, 1993; Lodi, Martello ve Monaci, 2002). Şekil 2.8’de tek boyutlu giyotinli kesim örneği verilmiştir (Adakcı, 2010).

Örnek: Çelik fabrikalarında belirli bir sipariş için aynı kesim planında yalnızca iki farklı boyuttaki parçaların kesilmesine izin verilebilir.

❖ **Kesim Planı Çeşidine İlişkin Kısıtlar:**

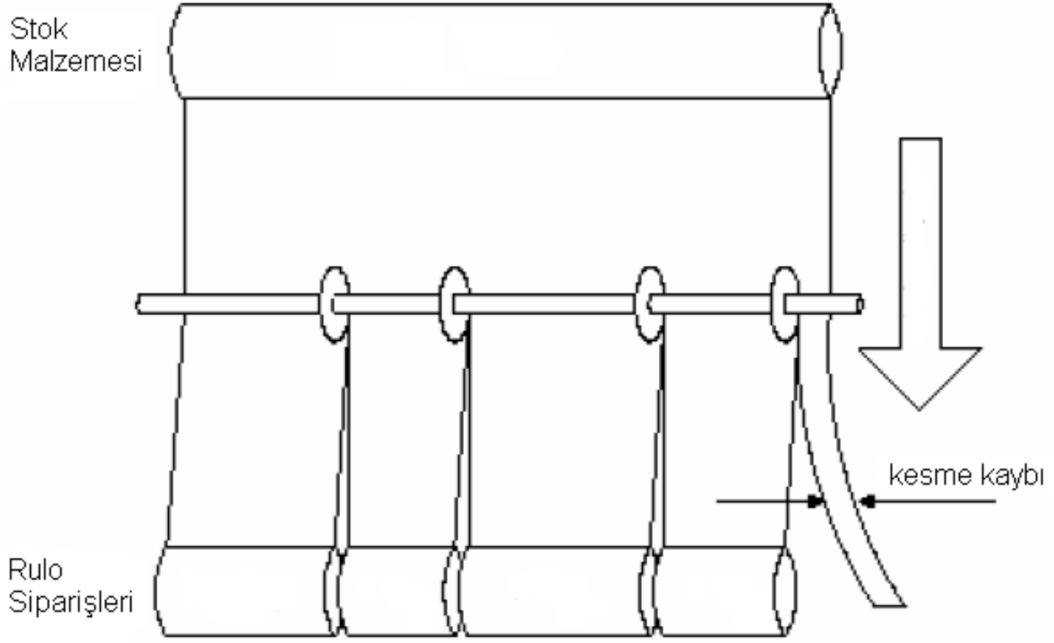
Kesim planı çeşidine ilişkin kısıtlar, belirli bir kesim deseninin sadece belirli bir planla yapılabileceğini ifade eder. Bu kısıt genellikle üretim sürecinin özelliklerine göre belirli kesim türlerinin kullanılmasını gerektirir. Örneğin tek yönlü veya çapraz kesim gibi özel kesim desenleri bu kategoriye girer (Wäescher ve Gau, 1996; Gilmore ve Gomory, 1965).

Örnek: Cam endüstrisinde belirli kalınlıktaki cam panellerin çapraz kesimle yapılması gerekliliği, bu tür kısıtların bir örneğidir.

❖ **Kesim Tipleri veya Türleri:**

Kesim tipleri veya türleri kısıtı, kesim sürecinde kullanılan kesme yöntemlerini veya tiplerini sınırlar. Bu kısıt kesim yönteminin belirli bir uygulama için uygunluğunu sağlamak amacıyla kullanılır. Örneğin giyotin kesim, lazer kesim veya mekanik kesim gibi farklı yöntemler belirli malzemelere göre uygulanır. Her bir kesim türü kesilecek malzeme türüne ve uygulama gerekliliklerine bağlı olarak seçilir (Dyckhoff, 1990 ; Hinterding ve Khan, 1996). Şekil 2.8’de giyotinli kesim örneği verilmiştir.

Örnek: Metal kesiminde ince metal plakalar lazer kesimle yapılırken, kalın metal plakalar mekanik kesim yöntemiyle kesilir.



**Şekil 2.8:** Tek boyutlu giyotinli kesim örneği.

#### ❖ Kesim Süreci:

Kesim süreci kısıtı, kesim işleminin belirli bir sırayla veya adımlarla yapılmasını gerektirir. Bu kısıt belirli bir düzenin veya aşamaların takip edilmesi gerektiğinde uygulanır. Özellikle çok aşamalı kesim işlemlerinde her aşamanın önceden belirlenen sırayla yapılması gereklidir. Bu, kesim işleminin verimli, güvenli ve düzgün bir şekilde yapılmasını sağlar (Lodi, Martello ve Monaci, 2002).

Örnek: Ahşap mobilya üretiminde her parçanın belirli bir sırayla kesilmesi ve ardından taşınması gereklidir. Bu süreç üretim hattında düzenli ve verimli bir iş akışı sağlar.

Bu kısıtlar stok kesme problemlerinin çözüm sürecinde hem verimliliği hem de malzeme israfını azaltmayı sağlamak açısından büyük önem taşır. Her bir kısıt kesim planlamasında dikkat edilmesi gereken unsurlar olup endüstriyel uygulamalarda optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesine rehberlik eder.

### 3. TEK BOYUTLU STOK KESME PROBLEMİ

#### 3.1 Tek Boyutlu Stok Kesme Problemine Bakış

Tek boyutlu stok kesme problemi (1DCSP), sınırlı uzunluktaki hammaddelerin (örneğin metal çubuklar, kağıt rulolar, borular) çeşitli uzunluklardaki talep edilen parçalara minimum israfla kesilmesini amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Genellikle belirli ölçülerde parçalar üretmek için sınırlı uzunluklarda hammaddelerin en verimli şekilde kullanılmasını sağlar.

Bu problem genellikle birim başına en az fire yaratacak kesim kalıplarını bulmayı gerektirir ve üretim, lojistik ve tedarik zincirlerinde yaygın olarak uygulanır. Tek boyutlu kesme problemleri metal, ahşap, tekstil, plastik gibi endüstrilerde yaygındır. Örneğin metal boruların veya kumaş rulolarının, inşaat malzemelerinin (boru veya profil) ve kağıt rulolarının kesim işlemlerinde bu problem çözümlerine ihtiyaç duyulur. Birçok endüstride maliyetleri düşürme ve verimliliği artırma potansiyeli nedeniyle önem taşır. Özellikle büyük ölçekli üretim süreçlerinde malzeme israfını azaltmak hem çevresel etkileri düşürür hem de ekonomik avantaj sağlar.

Tek boyutlu stok kesme problemlerinin matematiksel modellerinde genellikle aşağıdaki kümeler tanımlanır:

- ❖ **Stok Kümeleri (S):** Bu küme belirli uzunluktaki stok malzemelerinin listesini içerir. Her bir eleman stok uzunluğunu temsil eder ve bu uzunluklar belirli bir talebi karşılayacak şekilde parçalara bölünür.
- ❖ **Talep Kümeleri (D):** Bu küme her bir ürün veya talep edilen parçanın uzunluklarını ve miktarlarını temsil eder. Örneğin belirli bir ürün için kaç adet ve hangi uzunlukta parçalar gerektiği bu kümeye dahil edilir. Talep kümeleri çözüm sürecinde karşılanması gereken bir dizi kısıtı da beraberinde getirir.
- ❖ **Kombinasyon (Kesim) Kümeleri (C):** Her bir kesim kalıbı, stok uzunluklarını talep edilen uzunluklara bölme yöntemlerini temsil eden bir kombinasyon olarak tanımlanır. Kesim kümeleri stok uzunluğunun farklı kombinasyonlarda parçalara ayrılmasıyla ortaya çıkar. Bu küme mümkün olan tüm kesim desenlerini içerebilir ancak pratikte en az fire verecek olan desenler seçilir.

### 3.1.1 Tek Boyutlu Stok Kesme Problemi Kısıtları

Tek boyutlu stok kesme problemlerinde, çözüm aşamasını sınırlayan birden fazla kısıt vardır. Bu kısıtlar problemin endüstriyel uygulamalarda en verimli şekilde çözülmesi için gereklidir ve malzeme kullanımını optimize etme çabalarında karşılaşılan zorlukları ifade eder.

Çözüm Aşamasındaki Kısıtlar:

- ❖ **Talep Karşılama Kısıtı:** Talep edilen her ürün uzunluğunun karşılanması zorunludur. Bu, her bir talebin elde edilen parçalar ile karşılanmasını gerektirir ve doğrusal programlama modelinde toplam ürün uzunluklarının talep miktarlarına eşit veya daha fazla olmasını sağlayacak şekilde formüle edilir. Bu kısıt çözüme yönelik ilk gerekliliktir.
- ❖ **Stok Uzunluğu Kısıtı:** Kesim işlemleri belirli bir stok uzunluğu üzerinden yapılır. Bu kısıt stok uzunluğunun talep edilen parçalara ayrılırken aşılmamasını sağlar. Örneğin 10 metre uzunluğunda bir stok malzemesinin 4 metre ve 7 metre gibi talepleri karşılaması mümkün değildir. Bu durum stok kullanımında verimliliği sağlamak amacıyla kısıtlayıcı bir etkiye sahiptir.
- ❖ **Kesim Kalıpları ve Kombinasyonlar:** Kesim kalıplarının sayısı ve sıklığı, problemde kullanılan kalıpların sayısının sınırlandırılmasını gerektirir. Belirli bir kalıbın fazla kullanımı hem israfı artırabilir hem de üretim sürecini karmaşıklaştırabilir. Bu kısıt özellikle kombinasyon sayısının fazla olduğu büyük ölçekli problemler için önemlidir.
- ❖ **Talep ve Stok Uyumu:** Stok uzunlukları ile talep edilen boyutlar arasında uyumsuzluk olduğunda optimal çözüm bulmak zorlaşır. Özellikle stok boyutlarının veya malzeme çeşitliliğinin sınırlı olduğu durumlarda, taleplerin karşılanması sırasında daha fazla fire oluşur. Bu kısıt stok ve talep miktarlarının dengelenmesini zorunlu kılar.
- ❖ **Fire Miktarı Kısıtı:** Kesim işlemlerinden kaynaklanan fire miktarının minimize edilmesi, 1DCSP'nin temel amaçlarından biridir. Ancak talep edilen boyutların stok uzunluğuna tam olarak sığmaması durumunda kaçınılmaz bir israf oluşur. Bu kısıt fire miktarının minimize edilmesine yönelik matematiksel modellerin gerekliliğini ortaya koyar ve genellikle doğrusal programlama modellerinde hedef fonksiyon olarak kullanılır.

- ❖ **Üretim Süreci ve Maliyet Kısıtları:** Endüstriyel uygulamalarda kesim işlemlerinin sıklığı ve türü de maliyet kısıtları arasında yer alır. Her kesim işlemi belirli bir maliyetle ilişkilidir ve bu nedenle, olası minimum maliyetle talebin karşılanması amaçlanır. Özellikle büyük miktarda kesim gerektiren üretim süreçlerinde kesim başına maliyetin toplam maliyete etkisi oldukça büyük olabilir.
- ❖ **Zaman ve Hesaplama Gücü Kısıtı:** Özellikle büyük ölçekli problemler için optimal çözüme ulaşmak yüksek hesaplama maliyeti gerektirir. NP-zor yapısından dolayı optimal çözüme hızlı bir şekilde ulaşmak çoğu durumda pratik değildir. Bu kısıt daha hızlı sonuç almak için sezgisel veya yaklaşık çözüm yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirir ve mevcut teknolojilerde hesaplama gücünün bir sınırı olduğu için önemlidir.

Belirtilen kısıtlar stok kesme probleminin karmaşıklığını artırır ve optimal çözüm için farklı kombinasyonel yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılar.

### **3.1.2 Tek Boyutlu Stok Kesme Probleminin Kombinatorial Optimizasyon**

#### **İçerisindeki Yeri ve Önemi**

Tek boyutlu stok kesme problemleri, sınırlı bir hammadde uzunluğunu farklı ölçülerde parçalara ayırarak minimum fire ile kesim yapmayı hedefleyen kombinatorial optimizasyon sınıfına girer. Bu sınıf belirli kısıtlar altında en iyi kombinasyonu bulmayı amaçlayan problemleri kapsar.

Tek boyutlu stok kesme problemi NP-zor olarak sınıflandırılır, bu da problemin optimal bir çözümünü polinomsal bir zamanda bulmanın mümkün olmadığı anlamına gelir. Problemin karmaşıklığı genellikle çözüm uzayının büyüklüğünden kaynaklanır; çözüm uzayı, her bir kesme kombinasyonunun farklı kalıplarda uygulanmasıyla büyür. Bu yüzden problemin büyüklüğü arttıkça çözüm süresi de üstel olarak artar. Özellikle büyük ölçekteki problemlerde optimal bir çözüm elde etmek zor olabilir ve genellikle sezgisel veya yaklaşım algoritmaları kullanılır.

### **3.1.3 Problemin Zorluk Sınıflandırması**

1DCSP, NP-zor bir kombinatorial optimizasyon problemidir ve bu nedenle büyük ölçekli problemlerde optimal çözüm bulmak oldukça karmaşıktır.

Tek boyutlu stok kesme probleminin çözümündeki zorluklar, artan problem boyutu ile doğrusal olarak artan hesaplama maliyetleri ve optimal çözüm bulmanın zorluğundan kaynaklanır. Özellikle stok malzemesi ile talep uyumsuz olduğunda ve optimal çözüme ulaşmak için çok sayıda kombinasyon gerektiğinde çözüm süreçleri karmaşık hale gelir. Ayrıca stok kalıplarının doğru yönetilmemesi durumunda fire oranı yükselebilir. Çoğu algoritma, çözüme ulaşırken sıralı kalıp değişiklikleri ve kesme düzenlemeleri gibi parametreleri optimize etmeyi amaçlar.

Bu problemdeki temel amaç, israfı azaltmak ve malzeme kullanımını maksimize etmektir. Çoğu çözüm algoritması, üretim maliyetini düşürmek, ham madde israfını en aza indirmek ve üretim süreçlerini daha verimli hale getirmek üzerine odaklanır.

Bu problem NP-zor olarak kabul edilir, çünkü:

- ❖ Parçaların ve stokların uzunluklarına göre tüm olası kesme kombinasyonlarını bulmak gerekir, ki bu da hızlıca büyük bir çözüm uzayına yol açar.
- ❖ Her bir parçanın en uygun stok kullanımına göre dağıtılması için tüm olasılıkları incelemek gerekmektedir ve bu, zaman karmaşıklığını ciddi şekilde artırır.
- ❖ Çözüm uzayı genişledikçe olası çözümlerin sayısı üstel olarak artar ve belirli bir çözüm bulmanın hesaplama yükü çok fazla olur.

Bu sebeplerle, tek boyutlu stok kesme problemi NP-zor olarak sınıflandırılır, çünkü büyük boyutlu problemler için kesin çözüm (optimal çözüm) arayışları çok fazla zaman ve işlem gücü gerektirir (Garey ve Johnson, 1979).

### **NP-Zorluk Sınıflandırmasının Temel Nedenleri:**

**i. Kombinasyon Sayısının Üssel Artışı:** 1DCSP'nin çözümü, genellikle verilen uzunluklar arasından en uygun kesim desenlerini belirlemek için tüm olası kombinasyonların taranmasını gerektirir. Ancak bu desenlerin sayısı problem boyutu arttıkça üssel olarak büyür, yani stok uzunluğu ve taleplerin sayısı arttıkça tüm olasılıkların tek tek değerlendirilmesi imkansız hale gelir.

**ii. Kapsamlı Arama Gereksinimi:** Tek boyutlu stok kesme problemlerinde, minimum fire yaratacak en iyi kesim desenini bulmak için genellikle tüm olası desenlerin gözden geçirilmesi gerekir. Bu süreç doğrusal programlama veya sezgisel algoritmalarla

hızlandırılmaya çalışılsa da optimal çözüme ulaşmak için gereken süre büyük ölçüde problem boyutuna bağlıdır. Çoğu durumda, bu desenlerin hepsini değerlendirmek pratik olmaz ve bu yüzden problem, NP-zor olarak nitelendirilir.

**iii. Sezgisel ve Yaklaşım Yöntemlerinin Sınırlı Başarısı:** NP-zor sınıftaki problemler için genellikle sezgisel veya yaklaşım temelli çözümler kullanılır çünkü bunlar optimal çözümü tam olarak bulmak yerine yaklaşık bir çözüm üretir. Ancak bu yöntemler her zaman optimal çözümü garanti edemez ve 1DCSP’de optimal çözüme yaklaşmak bile büyük ölçüde hesaplama gücü ve süre gerektirir. Bu sınırlamalar problemi NP-zor sınıfında tutar.

**iv. Benzer Problemlerle Bağlantısı:** Stok kesme probleminin doğası, diğer NP-zor problemler olan "sırt çantası problemi" (knapsack problem) ve "bin-packing" gibi kombinatorik optimizasyon problemlerine benzerlik gösterir. Bu bağlantı stok kesme probleminin zorluk seviyesini daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Tıpkı bu problemler gibi stok kesme probleminde de belirli kısıtlar altında en iyi çözüme ulaşmak için sınırsız sayıda kombinasyon değerlendirilmelidir.

### 3.1.4 Tek Boyutlu Stok Kesme Problemi Çözüm Yöntemleri

Tek boyutlu stok kesme probleminin çözümünde kullanılan çözüm yöntemleri (analitik yöntemler ve algoritmik metotlar), problemin çeşitli özelliklerine göre farklı yaklaşım stratejileri geliştirmiştir. Bu yöntemlerden bazıları kesin çözümler sunarken bazıları ise büyük veri kümeleri ve karmaşık durumlar için yaklaşık çözümler üretir.

Aşağıda bu yöntemlerden öne çıkanları açıklamaları ve literatürdeki kullanımları ile birlikte verilmiştir:

- ❖ Kesin Çözüm (Analitik) Yöntemleri: Lineer (Doğrusal) Programlama (LP), tek boyutlu stok kesme probleminde ilk kez Gilmore ve Gomory tarafından kullanılan ve problemi optimal bir şekilde çözmeye çalışan bir yöntemdir. Bu yöntem kesim kombinasyonlarını belirlemek için bir hedef fonksiyonu oluşturarak ve kısıtları göz önünde bulundurarak problemi çözmeye çalışır. Ancak stok kesme probleminde her bir kesim kombinasyonunu oluşturmak büyük bir çözüm uzayına yol açabilir, bu nedenle sadece sınırlı boyutlarda kesin çözümler elde edilebilir (Gilmore ve Gomory, 1961).

Dinamik Programlama özellikle büyük boyutlu problemler için kullanılır ve problemi alt parçalara ayırarak her bir alt problem için optimal çözümler bulmayı amaçlayan bir tekniktir. Stok kesme probleminde farklı uzunluktaki stokların küçük

parçalara nasıl en az fire ile kesileceği problemi alt problemlere ayırılır. Bu yöntem küçük ve orta boyutlu problemler için etkili bir çözüm sağlar ancak çözüm uzayının büyüklüğü arttığında karmaşıklık nedeniyle uygulanabilirliği sınırlıdır (Bellman, 1957).

- ❖ Yaklaşık Çözüm Yöntemleri: Sezgisel algoritmalar en iyi sonucu bulacaklarını garanti etmezler fakat makul bir süre içerisinde bir çözüm elde edeceklerini garanti ederler. Genellikle en iyiye yakın olan çözüm yoluna hızlı ve kolay bir şekilde ulaşırlar. Bu yöntem stok kesme problemi gibi optimal alt yapı özelliklerine sahip olmayan problemlerde genellikle kesin çözüm sağlamaz ancak çözüm süresi açısından oldukça hızlıdır ve büyük boyutlu problemler için kabul edilebilir bir çözüm sunar. Açgözlü (Greedy) algoritmalar, En iyi öncelikli arama gibi örnekler sezgisel arama algoritmalarına örnektir (Cormen, Leiserson, Rivest ve Stein, 2009). Meta-sezgisel algoritmalar stok kesme probleminin çözümünde geniş çözüm uzayında optimal çözüme yakın çözümler elde etmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, benzetimli tavlama ve karınca kolonisi optimizasyonu gibi teknikler bulunur. Meta-sezgisel yöntemler kesin çözüm sağlamaz ancak büyük boyutlu problemlerde etkili ve pratik sonuçlar sunar. Glover ve Kochenberger'in çalışmaları meta-sezgisel yöntemlerin optimizasyon problemlerine uygulanabilirliğini detaylandırmaktadır (Glover ve Kochenberger, 2003).
- ❖ Hibrit Yöntemler: Kesin ve yaklaşık yöntemlerin birleştirilmesiyle oluşturulan yaklaşımlardır. Daha iyi sonuçlar almak için farklı algoritmaların güçlü yönlerini bir araya getirir. Çözüm kalitesini ve hızını artıran yöntemlerdir.

Stok kesme problemi için çözüm yöntemleri, problemin boyutuna ve gereksinimlere göre değişiklik gösterir. Lineer programlama, dal-sınır ve dinamik programlama gibi yöntemler kesin çözümler sunarken, açgözlü algoritmalar, meta-sezgisel yöntemler ve biyolojik ilham kaynaklı algoritmalar büyük boyutlu problemlerde daha hızlı ve kabul edilebilir sonuçlar sunmak için kullanılır.

Tablo 3.1’de tek boyutlu stok kesme probleminin çözüm zorluğu çeşitli özelliklere göre özetlenmiştir (Gilmore ve Gomory, 1961 ; Garey ve Johnson, 1979 ; Wäscher ve Gau 1996).

**Tablo 3.1:** 1DCSP problem karmaşıklık tablosu.

<i>Faktörler</i>	<i>Özellikler</i>	<i>Zorluk Derecesi</i>	<i>Açıklama</i>
Kapasite Kullanımı	Yüksek	Yüksek	Kapasite doluluğu arttıkça, çözümde fireyi azaltmak daha zor hale gelir, çözüm karmaşıklaşır.
	Düşük	Orta	Düşük kapasite kullanımı ile daha fazla stok alanı kalır ve çözüm kolaylaşır.
Ana Stokların Çeşitliliği	Farklı Boyutlarda Stoklar	Yüksek	Farklı boyutlardaki ana stokları yönetmek ve uyum sağlamak daha zordur.
	Sabit Boyutta Stoklar	Orta	Tek tip ana stok ile çalışmak daha kolaydır, çünkü çözüm uzayı küçülür.
Küçük Parçaların Çeşitliliği	Fazla Sayıda Farklı Parça Boyutu	Yüksek	Küçük parçaların çok çeşitli olması, kombinasyon sayısını artırır ve çözümü zorlaştırır.
	Az Sayıda Farklı Parça Boyutu	Orta	Parça çeşitliliği azaldığında çözüm uzayı küçülür ve daha hızlı çözümler üretilebilir.
En Büyük ve En Küçük Öğe Farkı	Büyük Fark	Yüksek	Büyük fark, stok kullanımı ve kesme optimizasyonunu zorlaştırır.
	Küçük Fark	Orta	Parça boyutları benzer olduğunda uyumlu kesim yapmak daha kolaydır, fire oranı azalır.

Açıklama ve Örnekler:

- ❖ **Kapasite Kullanımı (Örnek):** Bir fabrikada her bir 10 metre uzunluğundaki çubuğun tamamının kullanılması gerekiyorsa, kapasite kullanımı yüksektir ve atık oranı en aza indirilmeye çalışılır. Bu durumda algoritma, her bir çubuğun tamamen doldurulmasına yönelik karmaşık hesaplamalar yapar. Düşük kapasite kullanımı durumunda ise örneğin yalnızca %60’lık bir kapasite kullanımı yeterliyse problem daha basit hale gelir.
- ❖ **Ana Stokların Çeşitliliği (Örnek):** Çeşitli uzunluklarda metal boru stokları ile çalışılan bir fabrika düşünelim. Bu durumda farklı boyuttaki stoklar ile optimal kesim yapmak, tek tip stokla çalışmaya kıyasla daha zor olacaktır. Eğer tüm stoklar aynı uzunlukta olsaydı problem daha az zorlu olurdu.

- ❖ **Küçük Parçaların Çeşitliliği (Örnek):** 10 farklı küçük parça boyutuna kesim yapmak, yalnızca 2 boyutta kesim yapmaktan daha zordur. Örneğin 1, 2, 3, 4 ve 5 metre uzunluklarında küçük parçalar üretilmesi gereken bir durumda, çok sayıda kombinasyonu dikkate almak gerekir, ki bu da problemi zorlaştırır.
- ❖ **En Büyük ve En Küçük Öğe Farkı (Örnek):** Kesilmesi gereken en büyük parça 9 metre ve en küçük parça 0.5 metre ise bu durumda büyük fark nedeniyle tüm parçaları sığdırmak zordur. Ancak en büyük parça 3 metre ve en küçük parça 2.5 metre ise bu fark daha azdır ve çözümü daha kolay hale getirir.

### 3.2 Rulo Kesme Problemleri ve Kağıt Endüstrisinde Yapılan Çalışmalar

Stok kesme problemleri, ilk olarak Kantorovich'in 1939'da kaynak optimizasyonu üzerine yaptığı çalışmalarla akademik alanda yer edinmiştir. Bu çalışmada minimum atık üretimi sağlayan bir çözüm sunulmuş ve benzer sorunlar için koşullar değiştirilerek benzer çözümler elde edilebileceği gösterilmiştir. Kantorovich'in bu çalışması kaynak yönetimi ve optimizasyon alanında temel bir yapıtaşısı olarak kabul edilmiştir (Kantorovich, 1939). Ancak stok kesme problemleriyle ilgili kapsamlı matematiksel modeller, 1960'larda Gilmore ve Gomory'nin doğrusal programlama ve tamsayı programlama yöntemlerine dayanan çalışmalarıyla batı literatürüne girmiştir. Gilmore ve Gomory'nin doğrusal programlama ve tamsayı programlama yöntemlerini kullanarak geliştirdiği çözümler, günümüz stok kesme optimizasyon algoritmalarının temelini oluşturur (Gilmore ve Gomory, 1961,1963,1964). Dyckhoff ve Finke (1992), stok kesme ve yerleştirme problemlerinin ayrıntılı bir sınıflandırmasını sunarak literatüre önemli bir katkıda bulunmuşlardır. Çalışmaları, stok kesme problemlerini boyut sayısı, malzeme türü ve problem çözüm türlerine göre gruplandırarak araştırmacılara kapsamlı bir çerçeve sunmuştur. Bu sınıflandırma, daha sonra yapılan birçok çalışmanın temelini oluşturmuştur.

Paternoster (1992), stok kesme ve yerleştirme problemleri üzerine yapılmış 400'den fazla çalışmayı analiz ederek bu çalışmaların %80'inin tek boyutlu veya iki boyutlu, %20'sinin ise üç boyutlu problemlerle ilgilendiğini tespit etmiştir. Bu analiz tek boyutlu stok kesme problemlerinin literatürdeki baskınlığını ve bu problemlerin pratik uygulamalardaki yaygınlığını göstermektedir.

Haessler (1979), doğrusal programlama (DP) ve sezgisel yöntemleri birleştirerek sıralı hedefleme ve kullanım düzeyi hesaplamaları ile stok kesme problemine özgün bir çözüm sunmuştur.

Tanır ve Ugurlu (2019), özellikle çelik endüstrisinde kullanılan bölünebilir stok kesme problemini ele alarak dinamik programlama tabanlı bir algoritma ile hem fire miktarını hem de kaynak kullanımını optimize eden bir model geliştirdiler.

Kağıt Endüstrisindeki stok kesme problemlerinin literatür taramasına bakıldığında; John F. Pierce (1964), kağıt endüstrisinde büyük ölçekli üretim planlama sorunlarına ve bu sorunların çözümünde stok kesme tekniklerine odaklanmıştır. Çalışma kağıt endüstrisinin o dönem karşılaştığı büyük boyutlu üretim planlama zorluklarına pratik çözümler sunmayı amaçlamış ve bu bağlamda birçok endüstriyel uygulamada referans olarak kullanılmıştır. Çalışmanın en önemli özelliklerinden biri, rulolarda oluşabilecek trim loss (atık) miktarını en aza indirmeye yönelik matematiksel modeller geliştirmesidir.

Goulimis (1990), kağıt endüstrisinde stok kesme problemlerine yönelik optimum çözümler geliştirmeye odaklanmıştır. Goulimis, doğrusal programlama tabanlı yöntemleri kullanarak bu problemleri çözmeyi amaçlamıştır.

Sweeney ve Haessler (1990), kağıt endüstrisinde farklı kalite sınıflarına sahip rulolar için tek boyutlu stok kesme problemini ele alır. Çalışmada çeşitli kalite gruplarına sahip ruloların müşteri siparişlerine göre nasıl kesileceği ve atık miktarının nasıl en aza indirileceği üzerinde durulmuştur. Bu amaçla iki aşamalı bir ardışık sezgisel prosedür (sequential heuristic procedure) geliştirmişlerdir.

Scheithauer (1991), kağıt endüstrisinde kullanılan tek boyutlu stok kesme probleminde atık miktarını azaltmaya ve üretim sürecini optimize etmeye yönelik çeşitli matematiksel modeller ve algoritmalar sunar. Kağıt endüstrisinde geniş kağıt ruloların daha küçük rulolara kesilmesi sırasında oluşan atık miktarını minimumda tutmak için sezgisel ve doğrusal programlama yöntemlerini kullanarak verimli çözümler sunmuştur. Scheithauer'in amaç fonksiyonu istenilen miktarda küçük ruloları en az atıkla elde etmektir. Scheithauer'in çalışması, kağıt endüstrisinde tek boyutlu stok kesme problemlerinde optimizasyon ve

verimlilik konularına önemli katkılar sunarak literatüre değerli bir çözüm modeli kazandırmıştır.

Johnson, Rennick ve Zak (1997), kağıt endüstrisinde stok kesme problemini çözmek için yenilikçi bir yaklaşım olan “skiving” (kazıma) işlemini kesim süreçlerine ekleyerek materyal israfını azaltmayı amaçlamaktadır. Çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu, hem kesim hem de kazıma işlemlerini optimize ederek materyal kullanımını en verimli şekilde sağlamaktır. Johnson ve ekibi bu problemi çözmek için doğrusal programlama ve sezgisel yöntemleri kullanmıştır. Johnson, Rennick ve Zak’ın bu çalışması kesim ve kazıma süreçlerini entegre ederek kağıt endüstrisinde maliyet ve kaynak verimliliğini artırmak isteyen araştırmacılar ve endüstri profesyonelleri için yenilikçi bir çerçeve sunmaktadır.

Westerlund (1998), kağıt endüstrisinde kesim işlemlerinde trim kaybı azaltmaya odaklanan ve doğrusal olmayan optimizasyon (non-convex optimization) yöntemlerini kullanan bir model geliştirmiştir. Çalışmanın ana amacı, geniş kağıt rulolarından müşteri taleplerine uygun küçük rulolar üretirken maliyetleri minimize etmek ve üretim sürecindeki atıkları en aza indirmektir. Çalışma MINLP (Mixed Integer Non-Linear Programming) yaklaşımı kullanılarak optimal kesim desenlerinin belirlenmesi amacıyla çözüm yöntemleri önerir.

Menon ve Schrage (2002), kağıt endüstrisindeki kesim problemlerinde sipariş tahsisini en verimli şekilde yapmayı hedefleyen matematiksel modelleri içerir. Çözüm yöntemi olarak doğrusal programlama ile tamsayılı programlamayı birleştirerek sipariş tahsisini optimize etmiştir. Geliştirilen model kağıt endüstrisinde üretim verimliliğini artırırken müşteri siparişlerine hızlı yanıt verme sürecini de iyileştirmektedir. Bu, özellikle çok sayıda siparişin farklı kesim boyutlarında ve acil zaman gereksinimleri ile işlenmesi gereken endüstriyel senaryolar için önemlidir. Modelin çözümünde doğrusal programlama ve yuvarlama gibi sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Doğrusal programlama optimal kesim desenlerinin seçilmesi ve sipariş tahsisinin hızlıca yapılması için uygulanmıştır. Bu yaklaşım çözüm sürecinde hız ve doğruluk sağlamaktadır. Menon ve Schrage'nin çalışması, kağıt endüstrisinde daha az atık ve düşük maliyetle yüksek verim sağlayan entegre bir model sunarak literatürde önemli bir yer edinmiştir.

Keskinocak ve arkadaşları (2002), kağıt endüstrisinde çok aşamalı üretim ve dağıtım süreçleri için kapsamlı bir üretim planlama ve zamanlama destek sistemi geliştirmiştir. Bu

çalışma ilk kez kağıt üretiminde üretim aşamalarının ve dağıtım süreçlerinin entegrasyonunu ele alarak bu alan için bütüncül bir çözüm sunmuştur. Çözüm sürecinde kullanılan A-Team çerçevesi, üretim ve dağıtım süreçlerinde çok sayıda değerlendirme kriterini yönetmek için birden fazla algoritmayı barındırır. Bu çerçeve farklı algoritmalar arasında uyum sağlarken üretim zamanlamasını en etkin hale getirir. Modelin Kuzey Amerika'daki bazı kağıt fabrikalarında başarılı uygulamaları gerçekleştirilmiş olup bu uygulamalar sonucunda üretim maliyetlerinin düştüğü ve müşteri memnuniyetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Correia, Oliveira ve Ferreira'nın çalışması (2004), kağıt endüstrisindeki kesim ve parti büyüklüğü (lot sizing) problemlerini entegre eden bir model geliştirmeye odaklanmıştır. Bu çalışma özellikle farklı türde kağıt ruloların üretim sürecinde kesim atıklarını minimize etmeyi ve maliyetleri azaltmayı hedeflemiştir. Çalışma yalnızca kesim işlemi değil aynı zamanda üretim maliyetleri, kurulum maliyetleri ve envanter maliyetleri gibi faktörleri de dikkate alan bir model geliştirmiş olup matematiksel olarak modelleme ve çözüm için bir sütun oluşturma (column generation) ve yuvarlama (rounding) gibi sezgisel yöntemleri birleştirir. Modelin çözümünde CPLEX gibi optimizasyon araçları kullanılarak maliyet azaltımı sağlanmıştır. Bu yöntemle hem optimal kesim desenlerinin seçimi hem de belirli kağıt türleri arasında atık miktarını azaltan çözümler elde edilmiştir.

Chauhan ve Martel (2005), kağıt endüstrisinde rulo çeşit optimizasyonu (Roll Assortment Opt.) üzerine odaklanarak kağıt üretim sürecinde maliyetleri düşürmeyi ve israfı en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kağıt ürünleri için gerekli olan farklı rulo boyutlarının nasıl en iyi şekilde yönetileceğine dair matematiksel bir model geliştirmiştir. İkili doğrusal olmayan programlama modeli kullanılarak iki temel çözüm yöntemi sunulmuştur: bir sütun oluşturma tabanlı dallandırma ve fiyatlandırma algoritması ve bir marjinal maliyet sezgisel yöntemi. Bu çalışma özellikle risk paylaşımı ve israfı azaltmaya yönelik optimizasyon teknikleri ile kağıt endüstrisinde maliyet yönetimi konusunda önemli katkılar sağlamaktadır.

Yanasse ve Pinto Lamosa (2007), stok kesme ve kesim sıralaması (sequencing) problemlerini entegre ederek özellikle endüstriyel ortamlarda stok kullanımını optimize etmeye odaklanmıştır. Araştırmada tamsayı doğrusal programlama kullanılarak model formüle edilmiştir. Çözüm yöntemi olarak Lagrange gevşetmesi ve bir değiştirilmiş altgradyan yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşımla modelin zorlu yapısına uygun şekilde optimal çözüme ulaşılır. Çalışma kesim sıralamasının stok kesme problemlerindeki etkisini

ele alan yenilikçi bir yaklaşımdır ve özellikle yüksek hacimli üretim yapan endüstriler için maliyet avantajları sağlamaktadır.

Trkman ve Gradisar (2017), kağıt endüstrisinde stok kesme problemlerini ardışık zaman dilimlerinde ve talep belirsizlikleri altında çözmeye odaklanır. Çalışma talep tahminine dayalı iki aşamalı stokastik bir model geliştirerek talebin değişken olduğu senaryolarda optimal kesim desenleri belirlemeyi hedefler.

Poltroniere ve ekibinin 2008 ve 2016 yıllarında yaptığı çalışmalar, kağıt endüstrisinde kesim (cutting stock) ve parti büyüklüğü (lot sizing) problemlerini bütünleştirerek verimli üretim planlaması üzerine yoğunlaşır. Amaç jumboların (büyük kağıt rulolar) üretiminde envanter ve üretim maliyetlerini minimize ederken kesim sırasında oluşan atığı azaltmaktır. Çok amaçlı optimizasyon kullanılan matematiksel modelde, sütun oluşturma (column generation) ve Lagrange gevşetmesi teknikleri (sezgisel yaklaşımlar) kullanılarak en uygun kesim desenleri elde edilir.

Campello, Oliveira, Ayres ve Ghidini (2017), kağıt endüstrisinde lot sizing (parti büyüklüğü) ve cutting stock (stok kesme) problemlerini bütünleştirerek çok amaçlı bir optimizasyon modeline odaklanmaktadır. Model çözümünde sütun oluşturma (column generation) tekniği ve "relax-and-fix" gibi sezgisel yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu yöntemler, çözümün hesaplama maliyetini azaltmak ve büyük ölçekli problem örneklerinde hızlı çözüm elde etmek için uygundur.

Fairee (2020), kağıt üretiminde trim kaybını azaltmak için güçlendirilmiş bir Yapay Arı Kolonisi algoritması (Reinforcement Artificial Bee Colony) kullanarak stok kesme problemini optimize etmeyi hedefler. Bu algoritma, kesim sırasında ortaya çıkan malzeme israfını en aza indirmeyi amaçlayan bir model oluşturur ve Tamsayılı Doğrusal Programlama (Integer Linear Programming) yöntemiyle desteklenir. Çalışma 1.055 sipariş ve 127 farklı kağıt boyutu kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar, bu yaklaşımın geleneksel yöntemlere kıyasla %3.51 trim kaybı ile daha yüksek performans sunduğunu göstermiştir.

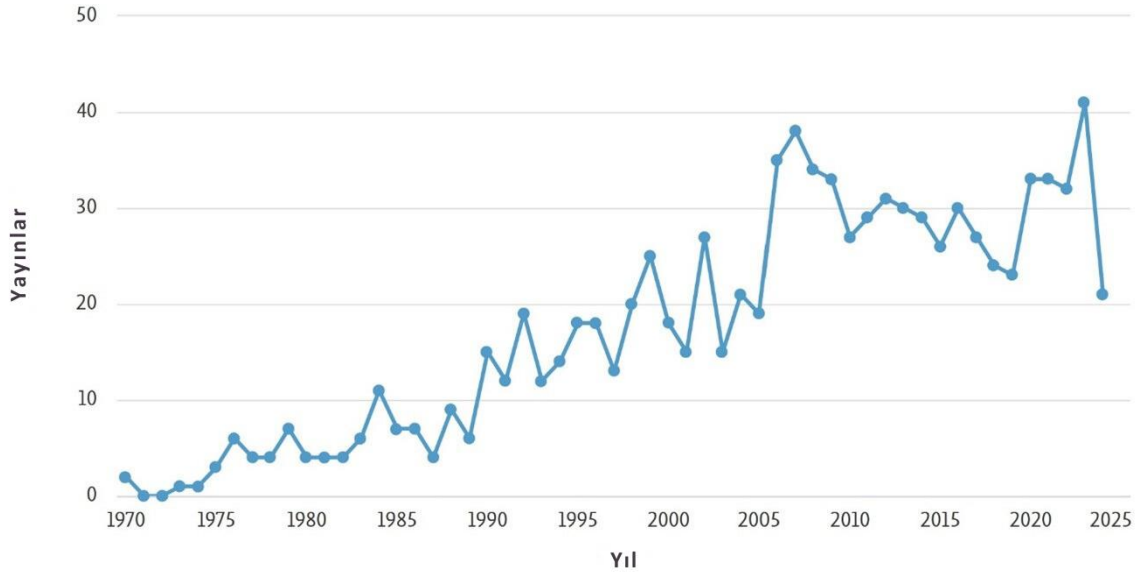
Razaullah (2020), kağıt fabrikalarında rulo kesme işlemi sırasında oluşan trim kayıplarını en aza indirme stratejileri üzerine odaklanmıştır. Çalışmada doğrusal programlama kullanılarak rulo kesim işlemlerinde oluşan atıkları minimuma indiren bir matematiksel model

geliştirilmiştir. İki aşamalı bir çözüm yöntemi kullanılmıştır: İlk aşamada basit bir doğrusal model ile çözüm elde edilmiş, ardından bu çözüm üzerinde optimize edici yuvarlama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

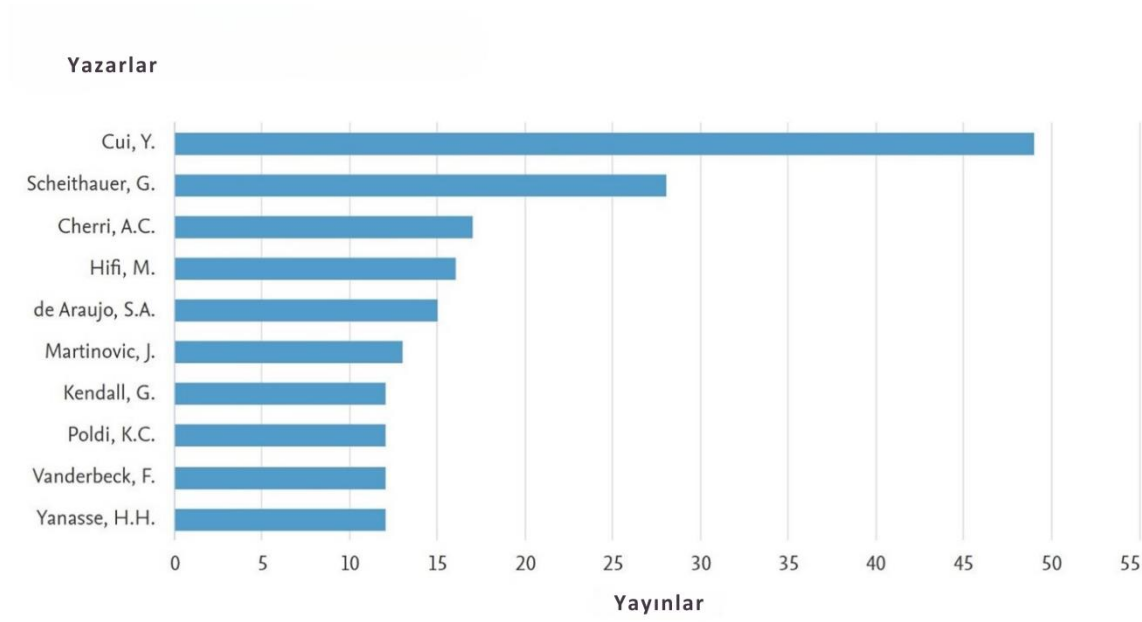
### 3.3 Kesme Problemleri Yayınlarına Genel Bakış

Stok Kesme Problemlerinin Scopus veri tabanındaki yayınların analizine bakıldığında, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, konunun ilk incelendiği 1960 lı yıllardan bu yana, bu problemlerle ilgili yayın sayısı düzenli olarak artmıştır ve bu artış, alanın akademik ve endüstriyel uygulamalar açısından taşıdığı değeri vurgulamaktadır. Bu artış, stok kesme problemleri gibi optimizasyon ve kombinatoriyal problemler alanında akademik ilginin arttığını ve daha geniş bir literatür oluştuğunu göstermektedir. Bu tür problemlere yönelik araştırmalar, endüstriyel uygulamalardan lojistik ve depolamaya kadar geniş bir yelpazede sürdürülebilir çözümler sunmak amacıyla giderek daha fazla araştırılmaktadır.

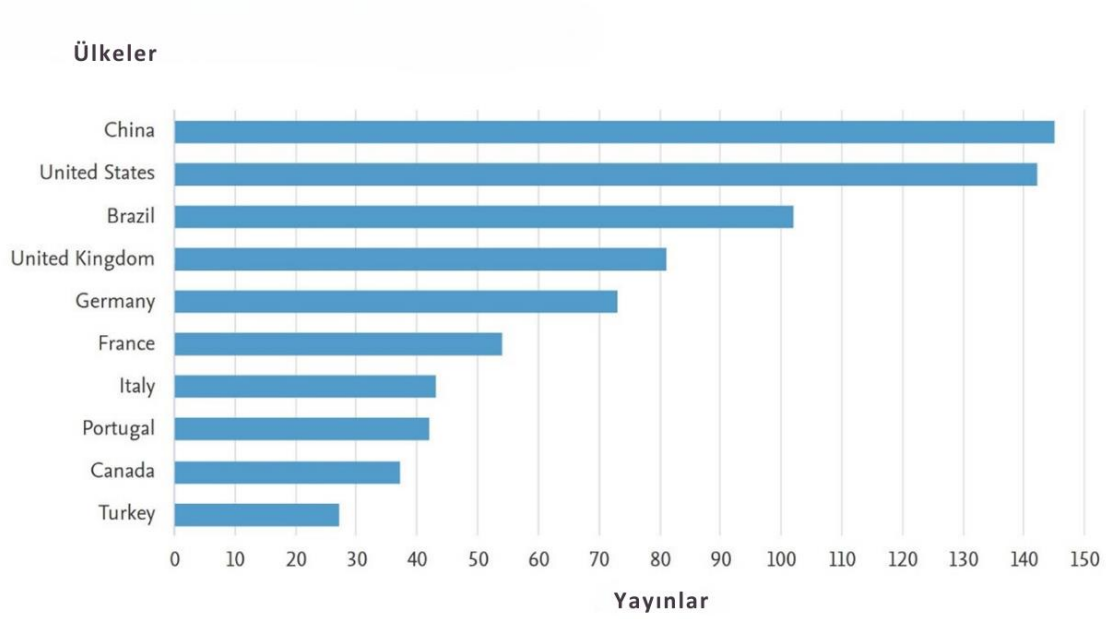
Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de kesme problemleriyle ilgili olarak Scopus veri tabanından elde edilen bazı raporlar verilmiştir.



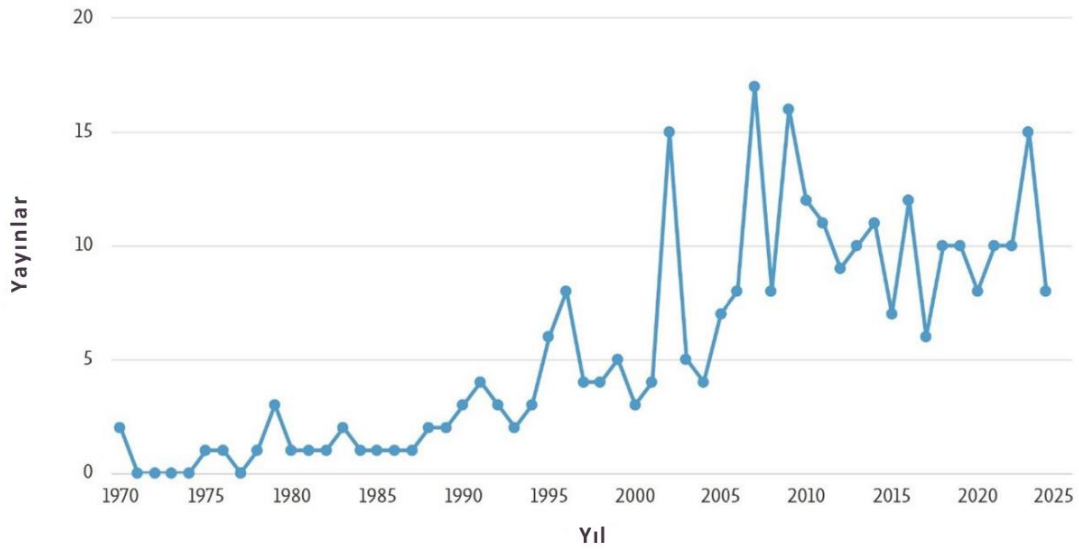
**Şekil 3.1:** Stok kesme problemleri üzerine yapılan yayınların sayısındaki eğilim (Scopus veri tabanı).



**Şekil 3.2:** Stok kesme problemleri üzerine yazarların bilimsel makale sayısı (Scopus veri tabanı).

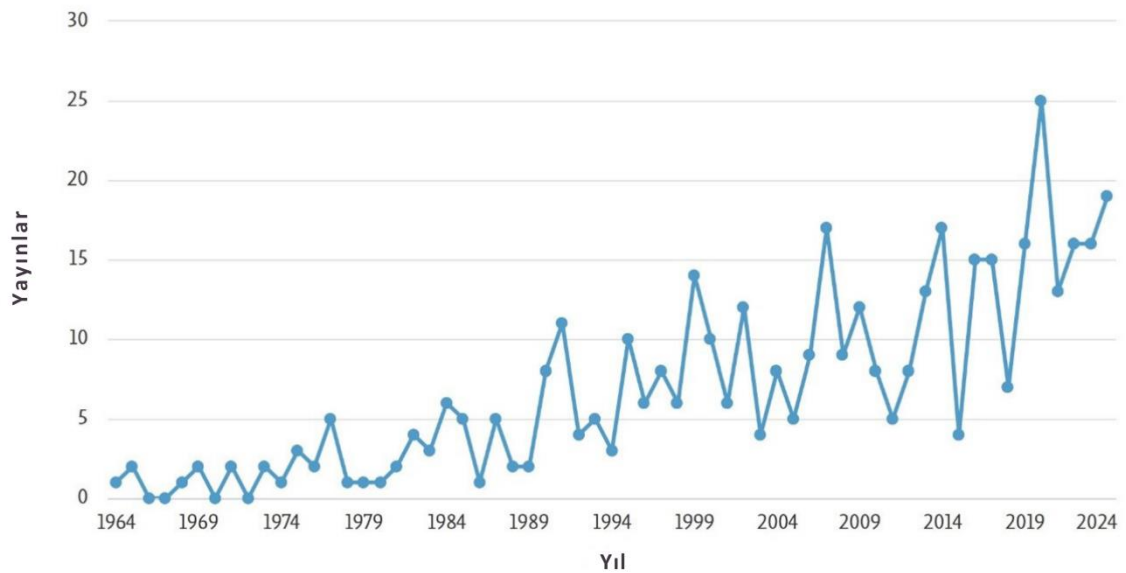


**Şekil 3.3:** Stok kesme problemleri makalelerinin ülke bazında sayıları (Scopus veri tabanı).



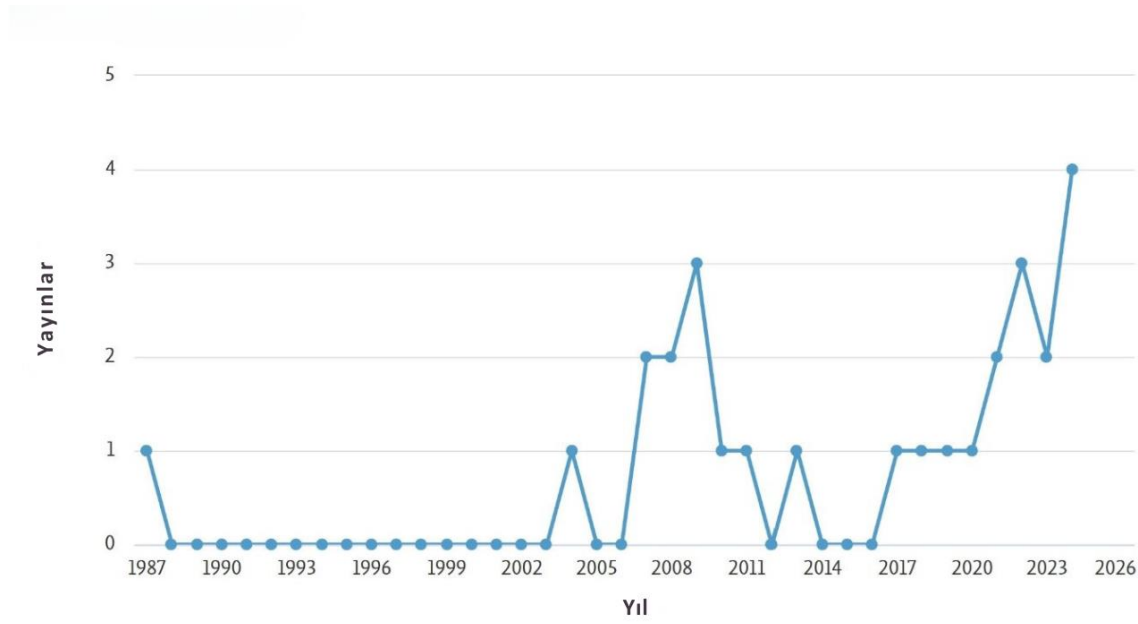
**Şekil 3.4:** Tek boyutlu stok kesme problemleri makale sayıları (Scopus veri tabanı).

Tez çalışmasına konu olan tek boyutlu stok kesme problemlerindeki yayın sayıları Şekil 3.4'deki gibidir. Ayrıca stok kesme problemlerinin temel amacı olan fire kaybı konusunun geçtiği yayın sayıları da Şekil 3.5'de verilmiştir.

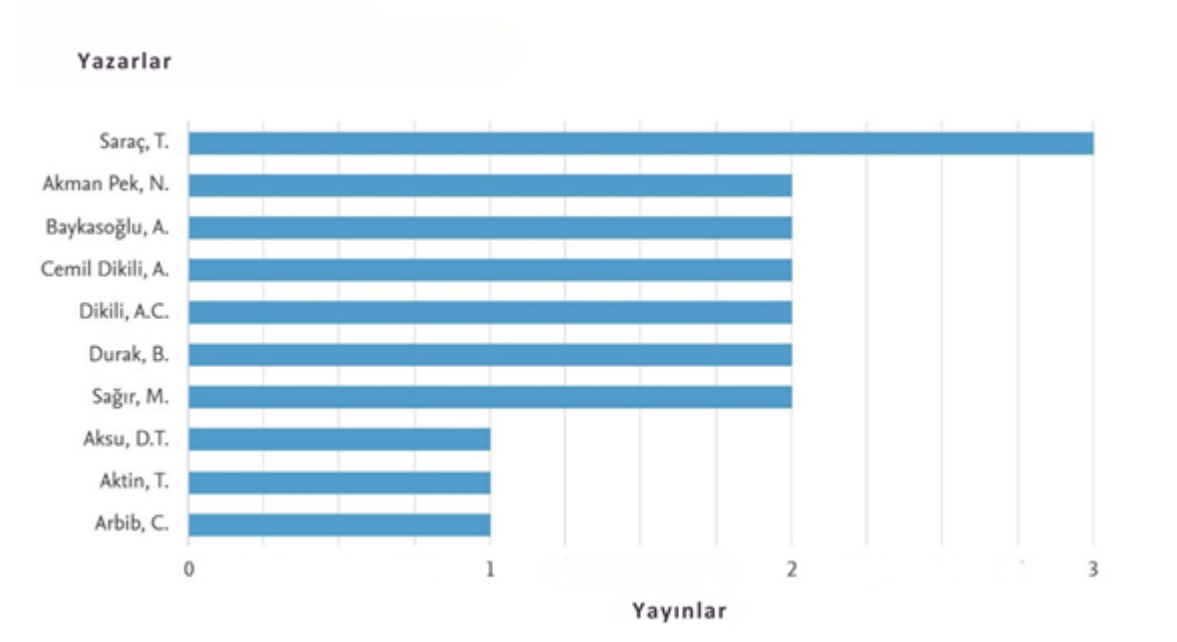


**Şekil 3.5:** Fire kaybı konusu makale sayıları (Scopus veri tabanı).

Stok kesme problemlerinin, Scopus veri tabanındaki Türkiye kaynaklı yayın sayıları Şekil 3.6'da görüldüğü üzere özellikle son yıllarda araştırmaların arttığı gözlenmektedir.



Şekil 3.6: Stok kesme problemleri üzerine yapılan Türkiye kaynaklı yayınların sayısındaki eğilim (Scopus veri tabanı).



Şekil 3.7: Stok kesme problemleri üzerine Türk yazarların bilimsel makale sayısı (Scopus veri tabanı).

Stok kesme problemleri üzerine yayını bulunan Türk yazarların bilimsel makale sayıları Şekil 3.7'de verilmiştir.

Scopus veri tabanındaki, stok kesme problemleri (Şekil 3.2), tek boyutlu stok kesme problemleri (Şekil 3.4) ve fire kaybı (Şekil 3.5) konularını içeren makale sayılarına ait grafikler incelendiğinde, problemin ilk ele alındığı 1960'lı yıllardan itibaren akademik çalışmaların artış gösterdiği görülmektedir. Bu artış, problemin literatürdeki öneminin ve uygulama alanlarının genişlediğini, aynı zamanda çözüm yöntemlerine yönelik araştırma ihtiyaçlarının sürekli olarak devam ettiğini göstermektedir. Hem mühendislik hem de operasyonel araştırma yöntemlerinin birleşimiyle, özellikle kağıt, metal, plastik, tekstil gibi üretim ve imalat sektöründeki, lojistik, planlama ve kaynak optimizasyonu gibi alanlarda karşılaşılan pratik problemlerin çözümünün, bu konulara olan ilgiyi artırdığı ve konunun multidisipliner bir şekilde ele alındığını ortaya koymaktadır. Artan makale sayısı, problemin hem teorik hem de pratik açıdan çözümüne yönelik önemli bir bilgi birikimi oluşturulduğunu ve araştırma potansiyelinin hâlâ güçlü bir şekilde devam ettiğini işaret etmektedir.

## 4. PROBLEMİN TANIMI VE GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL

### 4.1 Kağıt Endüstrisine Ait Genel Bilgiler

Dünyanın en önemli sanayi sektörlerinden birisi kağıt endüstrisidir. Kağıt, dünya genelinde birçok endüstrinin temel taşlarından biri olan ve hayatın hemen her alanında yaygın olarak kullanılan bir üründür. Kitaplardan gazetelere, ambalaj malzemelerinden temizlik ürünlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan kağıt, endüstriyel ve ticari faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir. Geri dönüşüm yoluyla kağıt üretimi, doğal kaynakların korunması, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik kalkınma açısından büyük avantajlar sunmaktadır.

Kağıt üretimi, dünya ekonomisinde ve toplumsal yaşamda önemli bir yer tutar. Özellikle geri dönüşümlü kağıt üretimi, çevresel etkileri azaltmak açısından kritik bir rol oynar. Ağaç kesiminden elde edilen ham maddelerle kağıt üretimi, ormansızlaşma sorununa katkıda bulunurken, geri dönüşümlü kağıt üretimi bu baskıyı hafifletir. Geri dönüşüm süreci sayesinde kağıt atıklarının yeniden kullanılması, enerji ve su tüketimini azaltırken aynı zamanda atık depolama alanlarındaki yükü de hafifletir. Bu açıdan geri dönüşümlü kağıt üretimi, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir endüstriyel süreçtir.

Kağıt geri dönüşümü, enerji tüketimini azaltır. Bir ton kâğıdın geri dönüşümü ile %70 hammadde, %60 kömür, %43 enerji ve %70 su tasarrufu sağlanmaktadır. Bunun yanında kişilere ek gelir ve istihdam olanağı da sağlamaktadır. Bazı kaynaklara göre bir ton geri dönüştürülmüş kâğıttan yaklaşık olarak 17 ağaç, 2.5 varil petrol, 4100 kWh elektrik, 4 m3 depolama alanı ve 31780 lt su tasarrufu sağlandığı belirtilmektedir. Bu çevresel faydalar, geri dönüşümden kağıt üretimini çevre dostu bir alternatif haline getirmektedir. Kağıt geri dönüşümü, kağıt fabrikalarına daha düşük maliyetli hammadde sağlar ve ekonomiye katkı sunar. Geri dönüşümlü kağıt üretimi, atık yönetimi ve toplama süreçleriyle de ekonomide yeni iş alanları yaratır. Ayrıca kağıt atıklarının geri kazanımı, atık depolama maliyetlerini azaltır ve enerji verimliliği sağlar (Demirarslan ve Başak. 2021).

Kağıt üretimi, diğer sanayi sektörleriyle karşılaştırıldığında, hammadde kaynaklarına olan bağlılık ve üretim süreçlerinde çevresel etkiler açısından benzersizdir. Özellikle geri dönüşümlü kağıt üretimi, diğer üretim süreçlerine kıyasla sürdürülebilirlik açısından öne

çıkar. Plastik ve metal üretimi gibi sektörler, büyük miktarda enerji ve su kullanımı gerektirirken, geri dönüşümden kağıt üretimi daha düşük bir karbon ayak izine sahiptir.

- ❖ Doğal Kaynak Kullanımı: Kağıt endüstrisi, sürdürülebilir orman yönetimi ve geri dönüşümle hammadde kaynaklarının korunmasını sağlar. Plastik ve kimya sektörleri ise fosil yakıtlara dayalıdır ve çevresel etkileri daha yüksektir.
- ❖ Geri Dönüşüm ve Döngüsel Ekonomi: Kağıt geri dönüşümü, döngüsel ekonominin en iyi örneklerinden biridir. Kağıt atıkları yeniden işlenip yeni ürünlere dönüştürülebilirken, birçok başka sektörde bu süreç daha zordur.

Avrupa Birliği'nde (AB) atık kâğıt geri dönüşüm oranları, son yıllarda istikrarlı bir şekilde yüksek seviyelerde seyretmiştir. 2022 yılı verilerine göre Avrupa'da kâğıt ve kartonların geri dönüşüm oranı %71,4 olarak gerçekleşmiştir. Bu oran, AB'nin döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda kâğıt atıklarının etkin bir şekilde geri dönüştürüldüğünü göstermektedir. AB, 2025 yılı için ambalaj atıkları toplam geri dönüşüm hedefini %65, 2030 yılı için ise %70 olarak belirlemiştir. Son 10 yıla bakıldığında, AB'de kâğıt geri dönüşüm oranlarının genellikle %70 civarında seyrettiği görülmektedir. Bu istikrarlı oranlar, AB'nin atık yönetimi politikalarının ve geri dönüşüm altyapısının etkinliğini yansıtmaktadır (Mısır, A. ve Arıkan, O .A., 2022).

Türkiye'de ise atıkların geri dönüşüm oranı %50 civarında gerçekleşmektedir. Bu durum, Türkiye'nin atık yönetimi ve geri dönüşüm konularında AB standartlarına ulaşmak için daha fazla çaba göstermesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ülkemizde kullanılan kâğıt hammaddesinin yaklaşık %20 sini selüloz oluşturmakta ve bunun tamamı ithal edilmektedir. İthal edilen selüloz genelde beyaz kağıt üretiminde kullanılmaktadır. Beyaz kâğıt üretiminin haricinde kâğıt üreten fabrikalarda hammadde olarak geri dönüştürülen atık-hurda kâğıt kullanılmaktadırlar ve bu miktarda toplam hammaddenin yaklaşık %80 ini oluşturmaktadır (Demirarslan ve Başak, 2021).

Geriden dönüşümden kağıt üretiminde karşılaşılan temel zorluklar şunlardır:

- ❖ Kalite Sorunları: Geriden dönüşüm malzemeleri kullanıldığında, kağıdın kalitesini korumak zor olabilir. Geriden dönüşümden elde edilen kağıtlar, yeni selüloz kağıtlara göre daha zayıf liflere sahip olabilir.

- ❖ Yabancı Maddelerin Ayrıştırılması: Geri dönüşüm sürecinde kağıt hamurundaki yabancı maddelerin tamamen temizlenmesi zor olabilir. Bu durum, üretim sürecini yavaşlatır ve ekstra maliyetlere yol açabilir.
- ❖ Enerji ve Su Kullanımı: Geri dönüşüm sürecinde su ve enerji kullanımı hala önemli bir zorluk teşkil eder. Özellikle atık suyun temizlenmesi ve geri dönüşümü, çevresel açıdan yönetilmesi gereken bir süreçtir.

Türkiye’de kağıt üretimi, hem yerli hammadde kullanımı hem de geri dönüşüm kağıdı işlemeyle gerçekleşmektedir. Ülkedeki kağıt üretim sektörü, son yıllarda artan talep ve ithalat bağımlılığını azaltma amacıyla önemli yatırımlar almıştır. Sektör, sürdürülebilir üretim, teknoloji yatırımları ve geri dönüşüm kapasitesinin artırılmasıyla büyümeye devam etmektedir. Yatırımlar sayesinde özellikle ambalaj kağıdı üretiminde kendi kendine yeterlilik hedefine yaklaşmıştır. Ayrıca yenilikçi üretim teknolojilerinin kullanılması ve Avrupa standartlarına uygun üretim yapılmasıyla Türkiye’nin kağıt sektöründe daha güçlü bir konuma gelmesi hedeflenmektedir.

Türkiye'nin kağıt üretim endüstrisi son yıllarda önemli ölçüde artan bir ihracat potansiyeline sahip olup, 2022 yılında kağıt ve kağıt ürünleri ihracatından 3,1 milyar dolar gelir elde etmiştir. Bu ihracatın büyük kısmı Birleşik Krallık, Irak ve İsrail gibi ülkelere yapılırken, yeni pazar arayışları kapsamında ABD gibi ülkelerde de artış gözlenmiştir. Türkiye, özellikle ambalaj kağıdı ve oluklu mukavva üretiminde Avrupa'nın önemli üreticilerinden biri haline gelmiş ve ihracatını son 15 yılda %66 oranında artırmıştır. Öte yandan Türkiye, kağıt ve kağıt ürünleri ithalatında dünyanın en büyük ithalatçıları arasında 16. sırada yer almakta ve bu ürünlerin ithalatında 2,5 milyar dolarlık bir hacme ulaşmıştır. Türkiye'nin kağıt ithalatında ilk sıralarda Almanya, Çin, Finlandiya ve İsveç gibi ülkeler yer almakta olup ithalatın büyük kısmı kaliteli selüloz ve hammadde ihtiyaçlarını karşılamak için yapılmaktadır. Türkiye’nin en çok ithal ettiği ürünler arasında özellikle kimyasal maddeler ve kağıt üretim hammaddeleri öne çıkmaktadır (Soygüder, A. 2024).

#### **4.2 Kağıt Üretim Süreci**

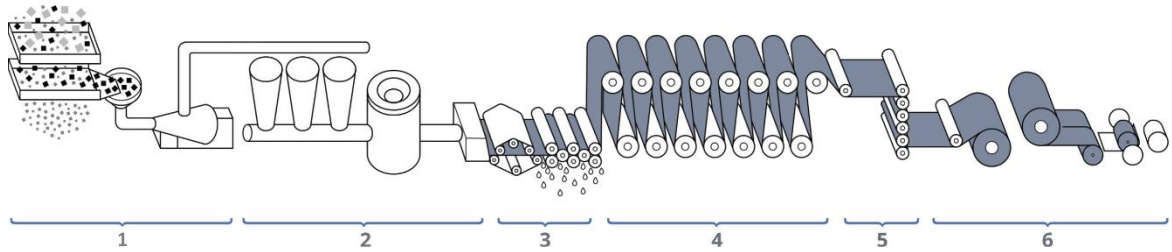
Kağıt üretim süreci, hammadde olarak kullanılacak geri dönüşümden elde edilen hurda kağıtların tedarik edilmesi ve fabrika sahasında stoklanması ile başlar. Kağıt fabrikalarına gelen geri dönüşüm kağıtları, dağınık halde telli/bantlı balya şeklinde getirilir ve cinslerine göre hurda kâğıt sahasında stoklanır. Şekil 4.1’de hurda kağıdın stoklanması gösterilmiştir.

Balya halindeki hurda kâğıtlar prosenin şekline göre telleri ile birlikte veya tellerinden uzaklaştırılarak sisteme gönderilir ve ayrıştırma ekipmanları vasıtasıyla yabancı maddelerin ayrıştırması gerçekleştirilir.



Şekil 4.1: Hurda kâğıdın istiflenmesi.

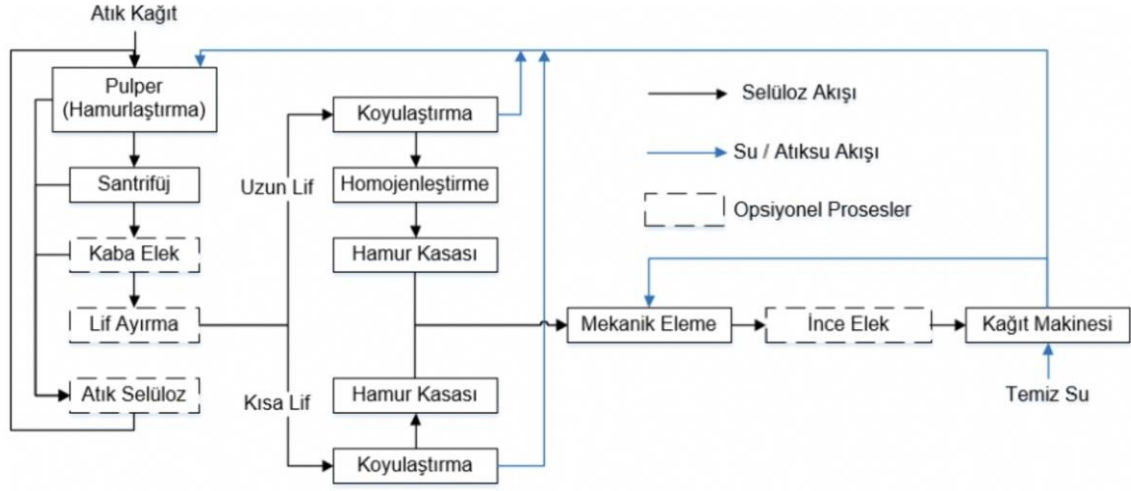
Sonraki süreç ise kâğıt üretim aşamalarını oluşturur. Genel itibariyle bu adımlar Şekil 4.2'deki gibi 6 adımda özetlenmiştir.



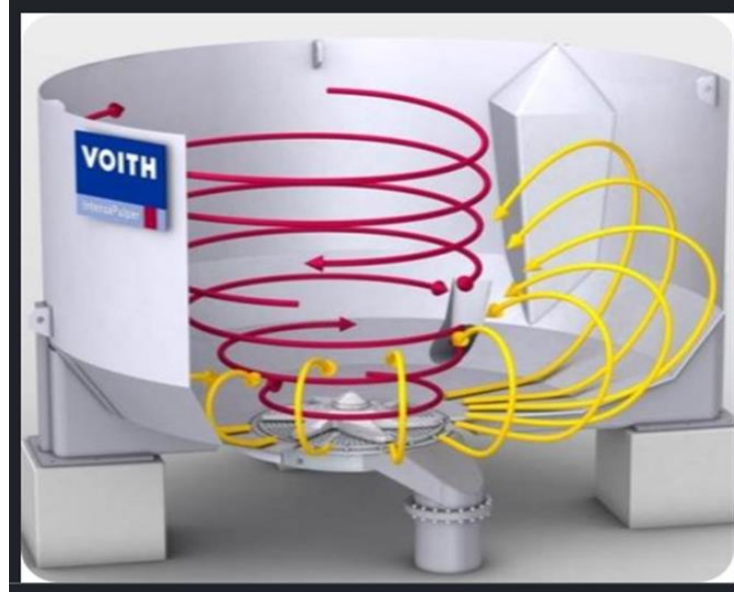
Şekil 4.2: Kâğıt üretim süreci aşamaları.

**Adım 1: Hamur ve Kağıt İşleme Süreci:** Geri dönüşüm hurda kağıdın su ve kimyasallar kullanılarak mekanik temizleme ile hamur haline getirilmesi sürecidir. Geri dönüştürülebilir kağıt, işlenmiş su ile karıştırılır ve bir lif süspansiyonu oluşturmak için "pulper" adı verilen devasa paslanmaz çelik bir kazanda karıştırılır. Yüksek performanslı ambalaj üretiminde kullanılabilecek yüksek kaliteli kağıt elde etmek için yabancı maddeler, bir dizi elekten geçirilerek çıkarılır. Hamur ve kağıt işleme süreci, atıkları azaltmak açısından önemlidir. Hamur, kağıt üretiminin bir yan ürünüdür ve bu süreç, çevreye zarar vermeden yüksek kaliteli sonuçlar üretilmesini sağlar. Farklı hammadde türleri ve farklı ürünler için ayrı teknik çözümler kullanılır.

Şekil 4.3' te, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (CSB), kâğıt üretimi sektörel uygulama kılavuzuna göre atık kağıdın temizlenme ve kağıt makinesine verilme prosesi verilmektedir.



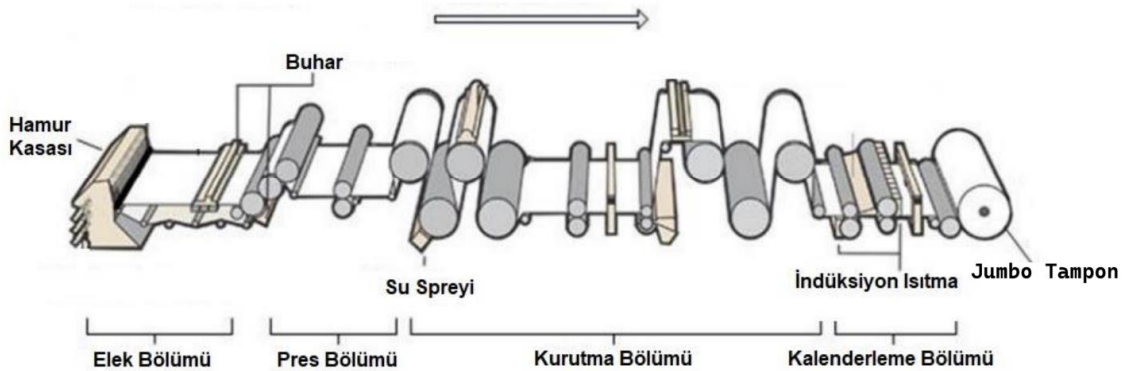
**Şekil 4.3:** Atık (hurda) kağıdın temizlenme aşaması (CSB-kağıt üretimi).



**Şekil 4.4:** Hurda kâğıdın suyla ilk buluştuğu temizleme-pulper kazanı.

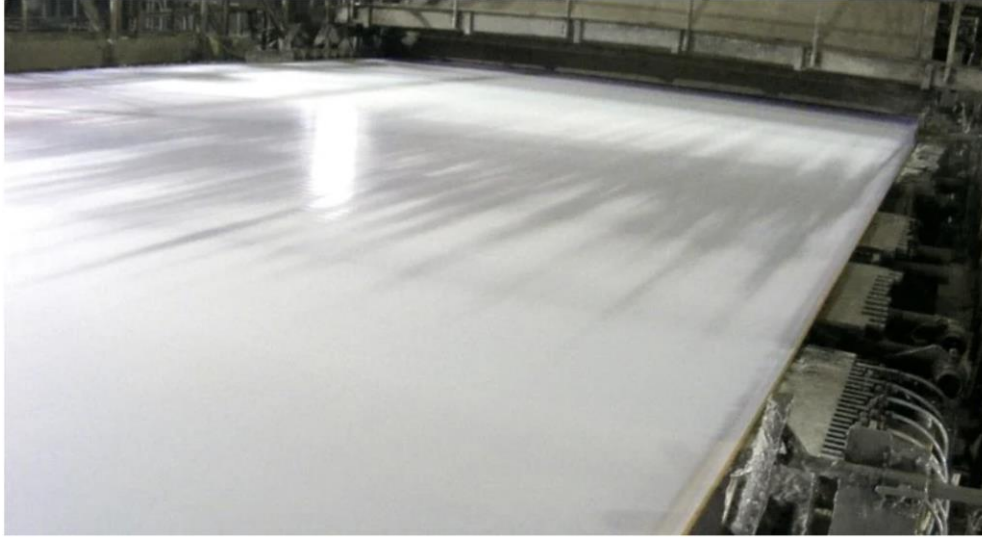
Bu aşamalarda hurda kağıttaki yabancı maddelerin ayrıştırılması ve hurda kağıdın hamur haline getirilmesi gerçekleştirilir. Metal, çakıl, plastik, kum vb. maddeler temizlenir.

**Adım 2: Kağıt Liflerini Seyreltme:** Kağıt makineleri, lif çözeltisinden suyu uzaklaştırarak elyaf ayırma eleklerine gönderir. Bu elekler hamuru kısa ve uzun elyaf şeklinde iki farklı bölüme ayırarak kısa ve uzun elyafta farklı tarzda işlem yapılmasını mümkün kılar. Kağıt yapım sürecinin başında bu çözelti yaklaşık olarak %1 lif ve %99 sudan oluşur. Kağıt liflerini bu şekilde seyreltmek, ince ve uniform bir kağıt üretilmesini sağlar. (Şekil 4.5’de kağıt makinesi şematik görüntüsü verilmiştir.)



**Şekil 4.5:** Bir kağıt makinesinin şematik görüntüsü (CSB-kağıt üretimi).

**Adım 3: Tel Bölümü (Levha Oluşturucular):** Kâğıt makinesinde işlenmiş olan hamura kâğıt formu verilir ve safiha olarak isimlendirilir ayrıca kâğıt safihasına çoğu özellikleri burada kazandırılır. Kâğıt makinesinin ıslak kısmında yer alan "headbox", sulu hamuru eşit şekilde püskürterek dağıtır. Bu sıvı, tel veya formasyon kumaşı üzerine düşer. Telin altında, suyu uzaklaştıran ve liflerin düzenli bir şekilde dokunmasını sağlayan hidrofoller (foiller) bulunur, böylece lifler sıkı bir katman oluşturur. Şekil 4.6'da kâğıt hamurunun elek üstüne serilmesi gösterilmiştir. Tel, suyu vakumla çeken emme kutularının üzerinden geçer ve kâğıt levhasını, yani kâğıt ağı denilen yumuşak bir hamur matı oluşturur. Bu noktada tel, 30-40 metre yol kat etmiştir. Birkaç saniye içinde su içeriği %75-80'e düşmüş ve ağı, parlaklığını kaybetmiştir.



**Şekil 4.6:** Kâğıt hamurunun elek üstüne serilmesi.

**Adım 4: Presleme ve Kurutma Bölümü:** Kâğıdın fazla suyunu çıkarmak ve kurutmak için kâğıt makinesinin presleme ve kurutma bölümlerinden geçmesi sürecidir. Bu aşamada kâğıt, mekanik olarak sıkıştırılarak nemi azaltılır ve buharla ısıtılan kurutma silindirlerinde kurutulur. Presleme ile suyun uzaklaştırılmasının bir sonraki aşaması, kâğıt ağını hamur matındaki suyu sıkmak için bir dizi baskı silindirinden geçirmektir. Bu baskı, lifleri sıkıştırarak yoğun ve pürüzsüz bir levha oluşturacak şekilde birbirine geçmelerini sağlar. Bu aşamada su içeriği %45-55 seviyesine düşmüştür. Şekil 4.7'de presler gösterilmiştir.



**Şekil 4.7:** Kağıt makinası presleme.

Kurutma aşamasında, kağıt ağı, buharla 130°C'ye kadar ısıtılan çok sayıda kurutma silindiri içeren kapalı bir alandan geçer. Bu işlem kağıdın %80-85 oranında kurumasını sağlar. Kağıt yüzeyine ince bir nişasta tabakası eklemek için ıslak bir sıvama çözeltisi uygulanır. Nişasta, kağıda sertlik kazandırır ve liflerin kağıt tabakası içinde daha iyi bağlanmasını sağlar. Sıvama işlemi uygulandıktan sonra kağıt, bir başka ısıtılmış kurutma silindiri setinden geçer. Kağıt ağı, kurutma bölümünde toplamda yaklaşık 400 metre yol kat edebilir. Süreç boyunca suyun %93'ü uzaklaştırılır. Şekil 4.8'de kağıt makinası kurutma bölümü gösterilmiştir.



**Şekil 4.8:** Kağıt makinası kurutma.

**Adım 5: Kağıt Sonlandırma (Kalender):** Kağıdın yüzeyini düzleştirmek ve pürüzsüz bir doku sağlamak için kullanılan silindirlere oluşan bir düzenektir. Kağıt, bu silindirlerin arasından geçirilerek yüzeyi parlatılır ve kalınlığı ayarlanır. Bu silindirler, kağıdı sıkıştırarak yüzeyinde pürüzsüz bir doku oluşturur. Şekil 4.9’da kalenderleme işlemi verilmiştir.



**Şekil 4.9:** Kağıt makinası kalenderleme.

**Adım 6: Kağıdın Tampon Olarak Sarımı ve Bobinlere Kesilmesi:** Kağıdın üretim hattında büyük bir rulo (jumbo rulo-tampon) şeklinde sarılması ve ardından müşteri ihtiyaçlarına göre farklı genişlik ve çaplardaki daha küçük rulolara (bobin) kesilmesi aşamasıdır. 500 metrelik yolculuğunu tamamlayan kağıt, kağıt makinesinden çıkar ve otomatik olarak 25-30 ton ağırlığa ve 6,5 metre enindeki bir jumbo ruloya (tampon) sarılır.

Jumbo rulo, bir vinçle yakındaki bobin kesme ünitesine taşınır. Burada kağıt, müşterinin siparişine göre açılır ve daha küçük rulolar halinde kesilerek bobinlere ayrılır ve sevkiyat için etiketlenir. Şekil 4.10'da tampon sarımı ve sarılan tamponun bobin kesme ünitesinde kesimi gösterilmiştir.



**Şekil 4.10:** Jumbo tampon sarımı ve bobin kesme.

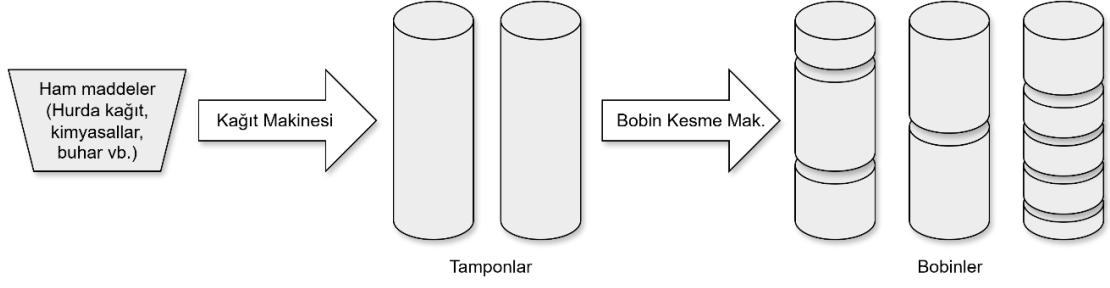


**Şekil 4.11:** Tamponlardan kesilmiş bobinler.

Şekil 4.11’de kağıt üretim tesisindeki bobin kesme ünitesi ve kesim sonrası bobinlerin mamul ambarda stoklanması gösterilmiştir.

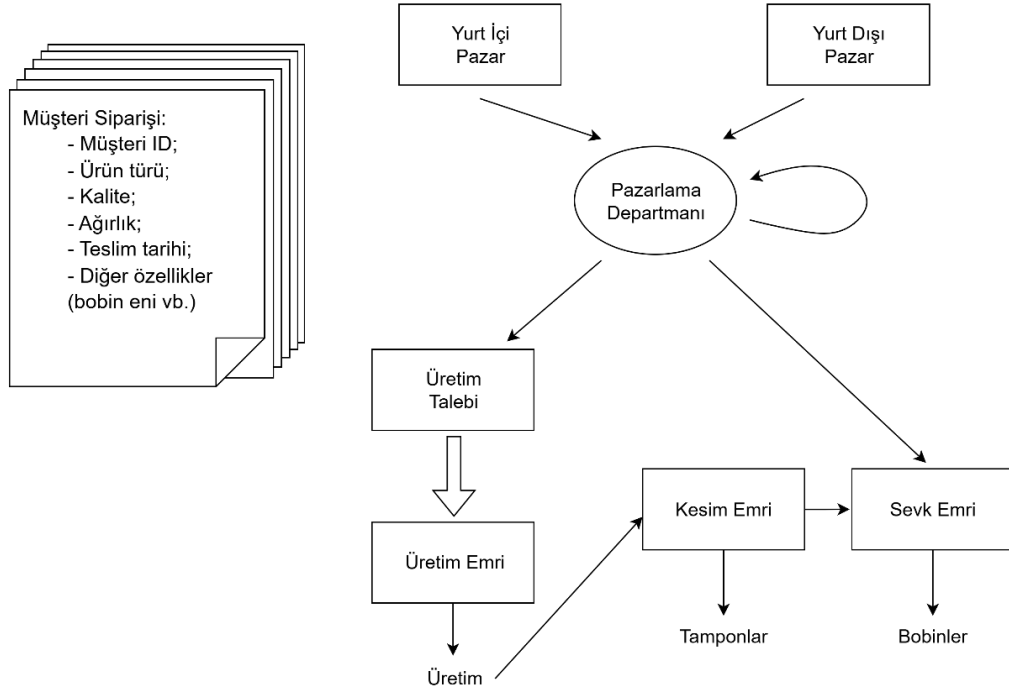
#### **4.3 Problemin Tanımlanması**

İlgili çalışma Balıkesir ilinde faaliyet gösteren ve Türkiye’nin ilk 500 sanayi kuruluşundan birisi olan bir kağıt fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Fabrikanın aylık üretim kapasitesi ortalama olarak 20.000 ton’dur. Müşteri siparişleri aylık dönemlerde alınır, üretim ve kesim planlaması yine aylık olarak yapılmaktadır. Kağıt üretim sürecinde hammaddeler (hurda kağıt), kağıt makinelerine beslenir ve burada çeşitli aşamalardan geçtikten sonra kağıt haline getirilir. Üretilen kağıt büyük jumbo tamponlar (roll) şeklinde sarılır. Jumbo tamponlar kesici makinelerde (winders) nihai ürün olarak daha küçük rulolar (bobinler-reels) haline getirilir. Şekil 4.12’de kağıt üretim sürecinin genel adımları verilmiştir.



**Şekil 4.12:** Kağıt üretim süreci genel adımları.

Kağıt üretim sürecindeki müşteri siparişi, pazarlama ve üretim arasındaki bilgi ve iş akışını gösteren şema Şekil 4.13'deki gibidir.



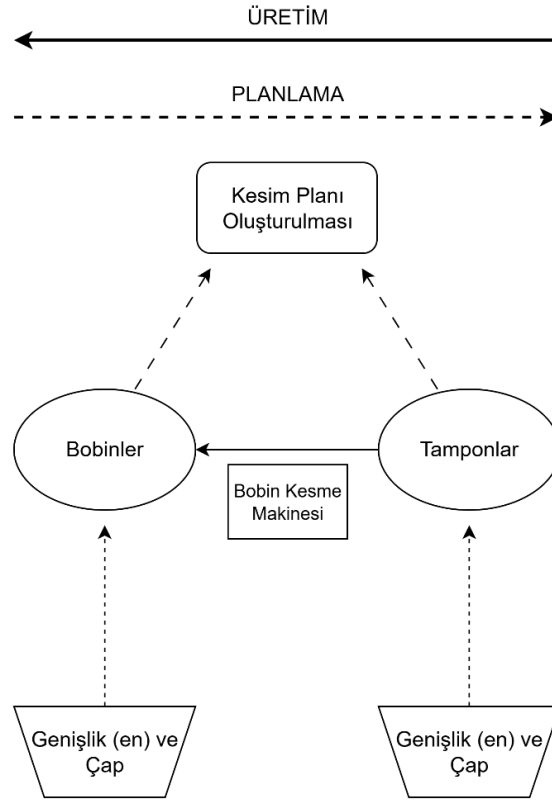
**Şekil 4.13:** Kağıt üretim sürecindeki müşteri siparişi, pazarlama ve üretim arasındaki bilgi ve iş akışı.

Müşteri siparişinin alınmasından, pazarlama departmanının ilgili talepleri üretim ve sevkiyat birimlerine iletmesine kadar olan süreci açıklar. Müşteri siparişleri, müşteri numarası, ürün türü, kalite, ağırlık, bobin eni, diğer özellikler, teslim tarihi gibi detayları içerecek şekilde aylık olarak alınır. Pazarlama departmanı hem yurt içi hem de yurt dışı pazarlara hizmet veren birimdir. Pazarlama departmanından gelen siparişler üç ana süreci tetikler:

- ❖ **Üretim İsteği → Üretim Emri → Üretim:** Pazarlama departmanı aylık dönemler halinde aldığı müşteri siparişlerine göre üretim isteğinde bulunur ve üretim planlama süreci sonrası üretim aşaması başlar. Bu süreç doğrudan ürün üretimi ile ilgilidir.
- ❖ **Kesim Emri:** Üretilen tamponların müşteri siparişlerine göre kesilip bobinler haline getirilmesidir. Bu çalışmada incelenecek problem bu kısım ile ilgilidir.
- ❖ **Sevkiyat Emri:** Pazarlama departmanının sevkiyat talepleri doğrultusunda kesilen bobinlerin sevkiyat süreci gerçekleşir.

Bu süreçler müşteri talepleri doğrultusunda üretim hattının nasıl planlandığını ve yönetildiğini göstermektedir. Sipariştan üretime, kesim işlemlerine ve stok yönetimine kadar bütün aşamalar bu şema ile birbirine bağlanmıştır.

Kağıt üretiminde üretim akışı tamponlardan bobinlere doğru iken, üretim planlama akışı ise ters yönde yani bobinlerden tamponlara doğru planlanır. Şekil 4.14 kağıt üretiminde tamponların kesim desenlerine göre bobin ürünlerine dönüştürüldüğü üretim sürecini açıklamaktadır.

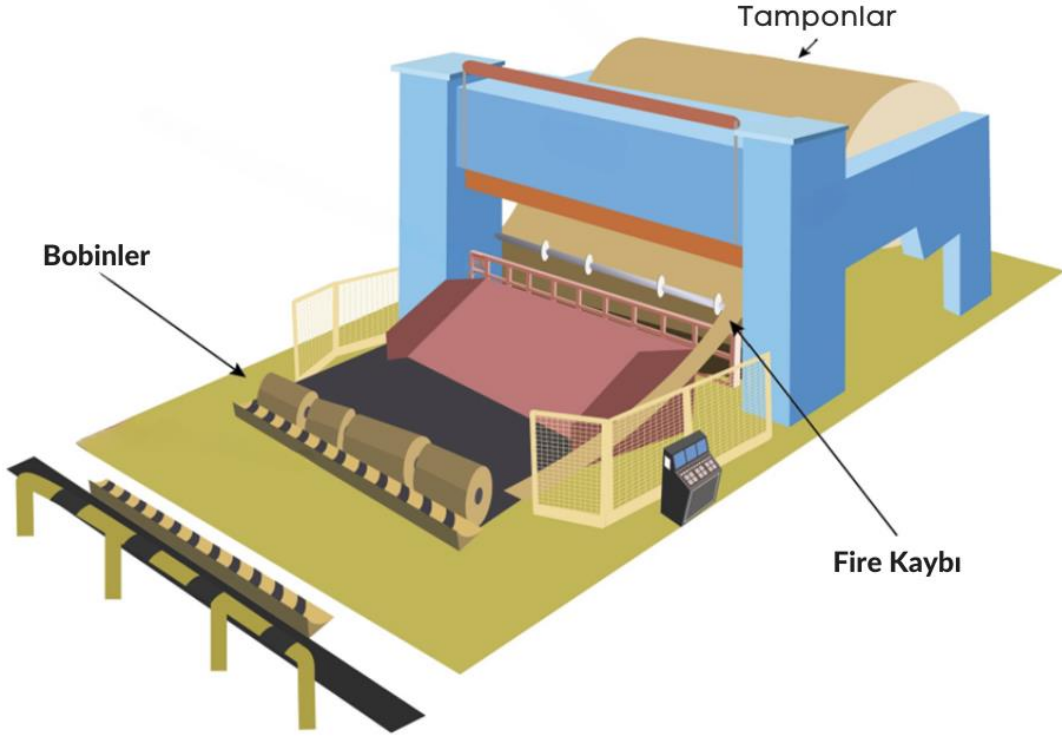


**Şekil 4.14:** Kağıt üretiminde jumbo tamponları kesim desenine göre bobinlere dönüştürülme süreci.

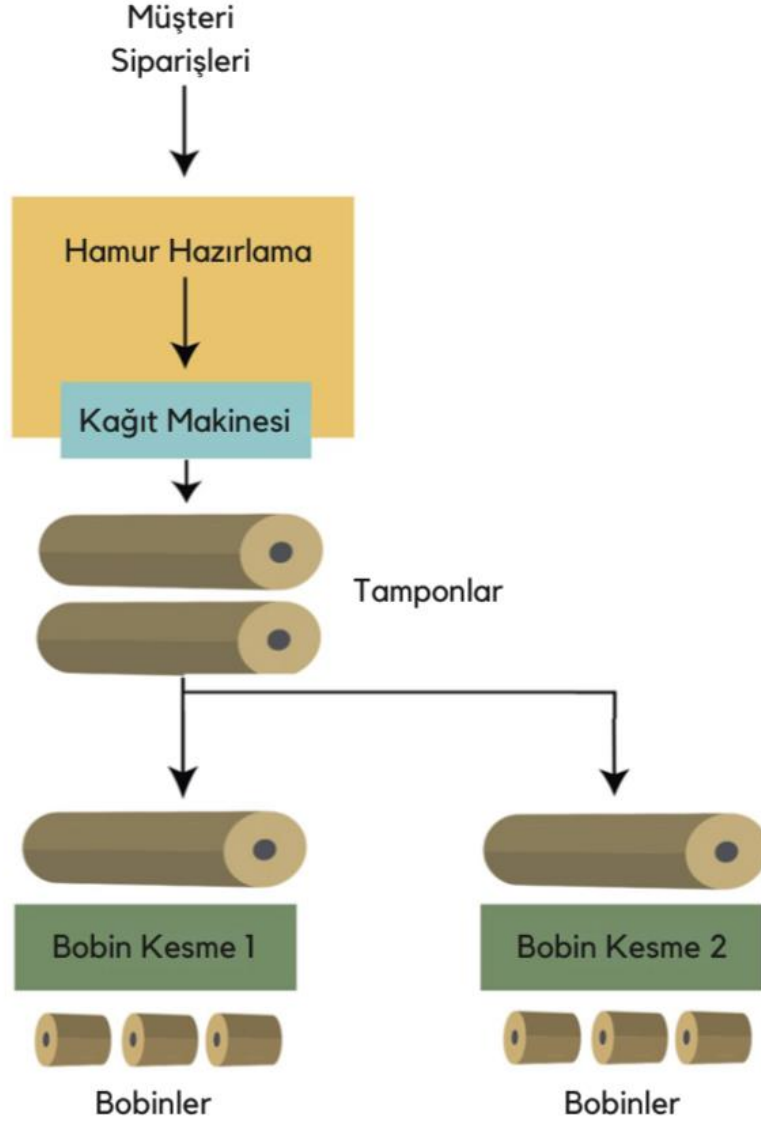


**Şekil 4.15:** Bobin kesme ünitesi.

Şekil 4.15'te üretilmiş ve kesim sırası bekleyen bir tampon, kesim makinasında kesim işlemi gören diğer tampon ve bu tamponlardan kesilmiş müşteriye sevk edilmek üzere mamul ambara girecek bobinler görülmektedir. Ayrıca bobin kesme ünitesinin şematik gösterimi Şekil 4.16'da, problemin şematik gösterimi de Şekil 4.17'de verilmiştir.



**Şekil 4.16:** Bobin kesme ünitesi şematik gösterim.



**Şekil 4.17:** Problemin şematik gösterimi I.

İlgili üretim tesisinde iki adet bobin kesme ünitesi bulunmaktadır. Yoğunluk yada arıza durumlarına göre tamponlar bu iki bobin kesme makinasına atanmaktadır.

Müşterilerden siparişler ürün türü, gramaj, kalite, bobin eni (mm), bobin çapı (cm) ve ağırlık (kg) karakteristiklerine göre toplanır. Alınan tüm siparişlere göre tampon üretim planlaması çalışması gerçekleştirilir. Firma 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 ve 160 gr olarak Fluting, Hp Fluting, Testliner, Hp Testliner, Torba Kağıt, İmitasyon NSSC ve Kraft Kağıt türlerinde, 600 mm ile 2800 mm arasında değişen bobin enlerinde siparişler almaktadır (Gramaj olarak ara gramajlarda da ürünler bulunmaktadır).

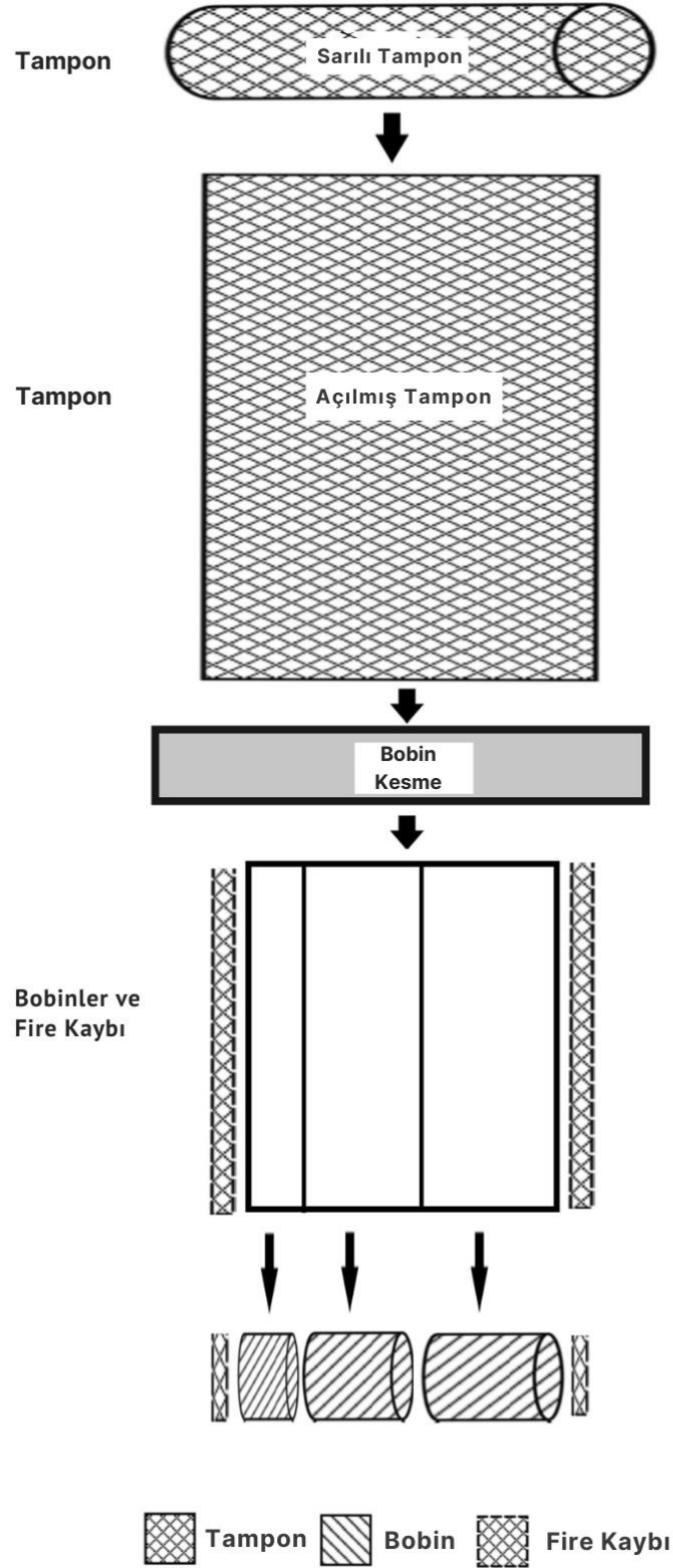
Tamponların çözümlenerek daha küçük bobinlere kesilmesi için kesim planlamaları yapılmaktadır. Hali hazırda bu işlemler planlama sorumlusu tarafından Microsoft Excel'de sezgisel olarak yapılmaktadır.

Aylık ortalama üretim miktarı 20.000 ton'dur, bu da yaklaşık 13200 adet bobin, 3700 kesim deseni (set planlaması) ve 900'den fazla tampon üretimine tekabül etmektedir. İlgili çalışma sonucu, bobin olarak küçük enlerde alınan müşteri siparişlerinin, minimum kesim firesi ve minimum stoğa üretim koşulunu sağlayacak, optimum kesim ve üretim planlarının oluşturulması hedeflenmiştir.

Kesim planlamalarında yapılacak optimizasyon sonucu aşağıdaki faydaların sağlanacağı düşünülmektedir:

- ❖ Tampon Kesim Fire Kaybının Azaltılması: Mevcut durumda standart 6500 mm olarak üretilen tamponlardan kalan set kesim planlaması firelerinin tampon eni planlaması ile azaltılması.
- ❖ Fire Kaybından Ötürü Oluşan Maliyetlerinin Azaltılması: Fire kaybının oluşturduğu hammadde maliyetinin azaltılması.
- ❖ Personel Kaynaklı Kesim ve Üretim Planı Hatalarının Önlenmesi: Excel'de planlama personeli tarafından manuel olarak yapılan set kesim planlaması ve tampon üretim planlaması hatalarının önlenmesi.
- ❖ Esnek Planlama: Çap oranı, üretilecek bobin sayısı, joker bobin ebatları, siparişin maksimum karşılanma oranı gibi bazı parametrelerin programa girilebilmesi ve değiştirilebilmesi sebebiyle hızlı ve esnek bir planlama imkanı.
- ❖ Daha Az Stoğa Üretim, Daha Fazla Siparişe Üretim: Kısıtlar sonucu stoğa üretimin minimize edilmesi, daha fazla siparişe üretimin yapılması.
- ❖ Eksik yada Fazla Teslimatların Azaltılması, Müşteri Memnuniyeti: Manuel set planlaması ve tampon planlaması sırasındaki hatalardan kaynaklı eksik yada fazla üretim sonucu teslimat miktarlarının da değişmesi ve müşteri memnuniyetsizliğinin giderilmesi.
- ❖ Müşteriye Zamanında Üretim ve Teslimat Sağlanması: Set kesim ve üretim planının doğru oluşturulması sonucu teslimat sürelerinde net sonuç alınması.
- ❖ Stok Devir Hızı ve Nakit Akış Sağlanması: Stoğa üretimin azaltılması ile stok devir hızının düşürülmesi siparişe üretimin artırılması ile daha hızlı nakit akış sağlanması.

- ❖ Kutu Fabrikası-Kutu Planlaması İçin Altyapı Oluşması: İleride açılması planlanan kutu fabrikası kesim planlaması için bilgi birikim sağlanması.



Şekil 4.18: Problemin şematik gösterimi II.

#### 4.4 Geliştirilen Matematiksel Model

Geliştirilen karışık tamsayılı doğrusal programlama modelinde kullanılan indisler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

##### Kümeler

$i$  : sipariş indeksi,  $i = \{1,2,..max_i\}$

$k$  : set indeksi,  $k = \{1,2,..max_k\}$

$r$  : joker genişlik indeksi,  $r = \{1,2,..max_r\}$

##### Parametreler

$b_i$  :  $i$  siparişinin kg cinsinden talebi

$cr$  : bobin çap oranı

$max_i$  : sipariş sayısı

$s_i$  :  $i$  siparişinin genişliği (cm)

$d_i$  :  $i$  siparişinin talebi (adet),  $d_i = \frac{b_i}{s_i \cdot cr \cdot 10}$

$max_k$  : kullanılabilir set sayısı

$minD$  : siparişin minimum karşılama oranı

$maxD$  : siparişin maksimum karşılama oranı

$max_r$  : kullanılabilir joker genişlik sayısı

$joker_r$  : joker olarak kullanılabilir genişlikler (cm)

$Wk$  : setin ayarlanabileceği maksimum genişlik (cm)

$Wm$  : setin ayarlanabileceği minimum genişlik (cm)

$\varphi$  : yeterince büyük pozitif sayı

$\omega_1$  :  $f_1$  amaç fonksiyonu ağırlığı

$\omega_2$  :  $f_2$  amaç fonksiyonu ağırlığı

## Karar Değişkenleri

- $X_{ki}$  :  $k$  setinden kesilecek  $i$  siparişi sayısı (adet)  
 $Z_{kr}$  :  $k$  setine yerleştirilen  $r$  joker bobin sayısı (adet)  
 $U_k$  :  $k$  setine yerleştirilen sipariş ve joker genişlikleri toplamı (cm)  
 $T_k = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ setine sipariş ataması yapılmışsa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$   
 $F_k$  :  $k$  seti kesiminden kalacak fire genişliği (cm)  
 $f_1$  : siparişi karşılamak için oluşturulan set sayısı toplamı (adet)  
 $f_2$  : kesimlerden arta kalan fire miktarı toplamı (cm)  
 $h_1$  : atama yapılan joker bobin miktar toplamı (cm)  
 $h_2$  : atama yapılan joker bobin sayısı toplamı (adet)

### 4.4.1 Amaç Fonksiyonu

Modelin amacı öncelikli olarak toplam set sayısının minimizasyonunu sağlamak olup ikincil olarak toplam firenin minimizasyonunu hedeflemektedir ve Denklem (4.1)'de verilmiştir. Tüm setlerin ve her bir setten kalan firelerin (cm) toplanarak minimizasyonu sağlanır. Modeldeki  $f_1$  ve  $f_2$  amaçlarının hangisinin daha fazla önem teşkil edeceği ise  $\omega_1$  ve  $\omega_2$  ağırlık parametreleri ile yönetilmektedir. Fabrika için sipariş yoğun dönemlerde  $\omega_1$  parametresinin ağırlığı daha büyük iken, siparişlerin düşük olduğu ve stoğa üretimin sözkonusu olduğu durumlarda ise  $\omega_2$  parametresinin ağırlığı daha büyük olacaktır.

$$\text{Min } (\omega_1 \cdot f_1 + \omega_2 \cdot f_2) \quad (4.1)$$

### 4.4.2 Kısıtlar

Amaç fonksiyonunun birinci terimine ( $f_1$ ) karşılık gelen set sayısı toplamı değeri Denklem (4.2)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$f_1 = \sum_k T_k \quad (4.2)$$

Geliştirilen modelin ikincil amacına ( $f_2$ ) karşılık gelen toplam fire değeri Denklem (4.3)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$f_2 = \sum_k F_k \quad (4.3)$$

Modeldeki setlere, birinci setten başlayarak sırayla atama yapılmasını sağlayan kısıt Denklem (4.4)'de verilmiştir. Bu kısıt aynı zamanda simetrik çözümleri engelleyerek arama uzayının daraltılmasını ve modelin daha etkin çalışmasını sağlamaktadır.

$$\sum_i X_{ki} \leq \varphi \cdot \sum_i X_{(k-1)i} \quad \forall k, k > 1; \quad (4.4)$$

Her bir  $k$  setinden arta kalan firenin hesabı için Denklem (4.5) kullanılır. Bu amaçla set için belirlenen genişlik değerinden ( $Wk$ ), o sete atanan siparişe ait ve joker olarak kullanılan bobinlerin toplam genişlik değerleri çıkarılır.

$$F_k = T_k \cdot (Wk - U_k) \quad \forall k; \quad (4.5)$$

Denklem (4.6) ve Denklem (4.7)'de verilen kısıtlar, talebin karşılanmasını sağlamaktadır. Yapılacak üretim miktarı, talebin  $minD$  oranının altında ve  $maxD$  oranının üstünde olamaz. Burada kullanılan  $minD$  ve  $maxD$  parametreleri, kullanıcı tarafından belirlenen parametreler olup modelin amacı doğrultusunda daha iyi çözümler elde etmeyi sağlayacak esnekliği tanıyacaktır. İlgili parametreler kesildikten sonra sevk edilebilecek miktarın müşteri tarafından kabul edilebilecek  $min$  ve  $max$  olarak yüzdelerini ifade eder. Bu tolerans aralıkları arasında kalan değerler müşteriye sevk edilebilmektedir ve üretim süreçlerinin pratik sınırlarını ve müşterilerin ihtiyaçlarını dengelemek için sektörde kabul edilen bir yaklaşımdır. Hem maliyet etkinliği hem de lojistik kolaylık açısından gerekli bir uygulamadır. Ayrıca bu tür esneklikler hem üretici hem de müşteri tarafında memnuniyet ve verimlilik sağlar.

$$\sum_k X_{ki} \geq minD \cdot d_i \quad \forall i; \quad (4.6)$$

$$\sum_k X_{ki} \leq maxD \cdot d_i \quad \forall i; \quad (4.7)$$

Denklem (4.8) sayesinde,  $k$  setine yerleştirilen siparişlerin ve joker bobinlerin genişlikleri toplamı,  $k$  seti için belirlenen maksimum genişlik değerini aşmaması sağlanmaktadır.

$$U_k \leq Wk \cdot T_k \quad \forall k; \quad (4.8)$$

Yukarıdaki denkleme benzer şekilde,  $k$  setine yerleştirilen siparişlerin ve joker bobinlerin genişlikleri toplamı,  $k$  seti için belirlenen minimum genişlik değerinin altında olmamalıdır (Denklem (4.9)).

$$U_k \geq Wm \cdot T_k \quad \forall k; \quad (4.9)$$

Her bir  $k$  setine yerleştirilen siparişlerin ve joker bobinlerin genişliklerinin toplamı Denklem (4.10)'daki gibi hesaplanır.

$$U_k = \sum_i X_{ki} \cdot s_i + \sum_r Z_{kr} \cdot joker_r \quad \forall k; \quad (4.10)$$

Eğer  $k$  setine atama yapılmışsa  $T_k$ 'nin 1 değerini almasını sağlayan kısıt Denklem (4.11)'de verilmiştir.

$$\varphi \cdot T_k \geq \sum_i X_{ki} \quad \forall k; \quad (4.11)$$

Atama yapılmamış  $k$  seti için  $T_k$ 'nin 0 değerini almasını sağlayan kısıt Denklem (4.12)'de verilmiştir.

$$T_k \leq \sum_i X_{ki} \quad \forall k; \quad (4.12)$$

İşaret kısıtları Denklem (4.13) - (4.16)'da verilmektedir.

$$X_{ki} \geq 0 \quad \forall k, \forall i; \quad (4.13)$$

$$Z_{kr} \geq 0 \quad \forall k, \forall r; \quad (4.14)$$

$$U_k, F_k \geq 0 \quad \forall k; \quad (4.15)$$

$$T_k \in \{0,1\} \quad \forall k; \quad (4.16)$$

Modelde doğrudan kullanılmayan ancak sonraki bölümde de sunulacağı üzere, test sonuçlarının analizinde yardımcı olacak yardımcı (joker) bobinlerin kullanımıyla ilgili hesaplamalar Denklem (4.17) ve Denklem (4.18)'de verilmiştir. Denklem (4.17) kesilen joker bobinlerin toplam genişliklerini; Denklem (4.18) ise kesilen joker bobinlerin sayısını hesaplamaya yararmaktadır. Joker bobinler, geçmiş sipariş tecrübelerine göre ve içinde bulunulan dönemde hızlı satış yapılabilecek ve birden fazla müşterinin kullanabildiği ortak ebatlardan oluşmaktadır.

Atama Yapılan Joker Bobinlerin Miktarı (cm):

$$h_1 = \sum_k \sum_r Z_{kr} \cdot joker_r \quad (4.17)$$

Atama Yapılan Joker Bobinlerin Sayısı (adet):

$$h_2 = \sum_k \sum_r Z_{kr} \quad (4.18)$$

Joker bobinlerin amaç fonksiyonunda yer almamasının sebebi, toplam set sayısının minimize edilmesinden kaynaklıdır. Toplam set sayısının yani bir başka deyişle kesim deseninin minimizasyonu modelde kullanılacak joker bobin sayısını da mantıksal olarak azaltmaktadır. Çözüm sonuçlarında joker bobin miktarı ayrıca gösterilerek raporlama yapılması sağlanmaktadır.

## 5. DENEYSEL TESTLER VE VAKA ÇALIŞMASI

Bu bölümde kağıt üretim endüstrisindeki tek boyutlu rulo kesme probleminin bir önceki bölümde açıklanan matematiksel modelinin, karışık tamsayılı doğrusal programlama yöntemi kullanılarak çözümü açıklanmıştır. Geliştirilen matematiksel model, AMD Ryzen 3 3200 2.60 GHz işlemci, 8 GB RAM, 64 bit işletim sistemi, Windows 10 22H2 sürümü yüklü bilgisayar üstünde, Python 3.0 programlama dilinde kodlanarak Gurobi Solver v11.0.3 kullanılarak çözümlenmiştir.

İlk olarak sayısal örnek üzerinden problemin anlatılması, çözümde kullanılan parametrelerin açıklanması ve parametre seçim nedenleri anlatılmış olup sonrasında küçük/orta/büyük/çok büyük boyutlu 41 adet farklı içeriklerdeki test problemleri kullanılarak deneysel testler yapılmıştır. Son bölümde ise fabrikada karşılaşılan gerçek hayat vaka uygulamalarının önerilen yöntem ile çözümlenmesi ve mevcut planlama sorumlusunun Excel ortamındaki çözümleri ile karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Test verilerinin ve gerçek hayat vaka çalışmalarının çözümünde sayısal örnek kısmındaki parametreler referans alınmıştır.

### 5.1 Sayısal Örnek

Çalışmadaki kağıt fabrikasında, Tablo 5.1’de belirtilen ürüne ait alınan bobin siparişlerinin istenen ebatlardaki kesim planlamasının yapılması gerekmektedir.

**Tablo 5.1:** Sayısal örnek verisi – sipariş bilgileri.

Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Çapı (cm)	Normalize Edilmemiş Bobin Sayısı (adet)
	$i$	$s_i$	$b_i$		$d_i$
FLUTING, 080GR	1	243	30.000	135	12,350
FLUTING, 080GR	2	253	10.000	135	3,950
FLUTING, 080GR	3	182	20.000	135	10,990
FLUTING, 080GR	4	95	4.000	135	4,210

FLUTING, 080GR ürününe ait alınmış müşteri siparişlerinden, varsa eğer, mamul ambarda bulunan hazır stoklar çıkarıldıktan sonra, üretilecek miktarlar tespit edilmektedir. Tablo 5.1’deki sayısal örnekte, talep edilen siparişlere ait mamul ambarda hazır bobin bulunmadığı varsayılarak tüm talebin üretimden karşılanması ve üretim sonrası kesim planlamasının yapılması gerekmektedir. Tablo 5.1’de  $s_i$  olarak verilen dört farklı bobin enine ait talepler

$b_i$  olarak verilmiştir. Bobin enleri cm, talep ise kg olarak takip edilmektedir. Bobinlerin çap diye nitelendirilen yükseklikleri ise yurtiçinde standart olarak 135 cm olarak istenmektedir. Bobin çapı, kg olarak alınan taleplerin bobin adedine çevrilmesinde kullanılmaktadır. 135 cm bobin çapı için bobin çap oranı parametresi ( $cr$ ) 1 olarak sektörde alınmaktadır.

Bobinlerin kg olarak alınan sipariş taleplerinin ( $b_i$ ), adet olarak hesaplanmasında  $d_i = \frac{b_i}{s_i \cdot cr \cdot 10}$  formülü kullanılmaktadır. Siparişler ve sevk miktarı kg olarak yapılırken, bobin kesim planlaması bobin olarak adet birimiyle yapılabilmektedir.  $d_i$  normalize edilmemiş bobin sayısı parametresinin ondalıklı sayısı olarak kullanılmasının sebebi, siparişin  $max$  ve  $min$  karşılanma oranlarını hesaplarken, müşteri talebine en yakın tamsayı adet değeri elde edilmesini sağlamaktadır.

**Tablo 5.2:** Sayısal örnek verisi – joker (yardımcı) bobin bilgileri.

Joker Bobin İndeksi	Kullanılabilecek Joker Bobin Enleri (cm)
$r$	$joker_r$
1	143
2	153
3	163
4	173
5	183

Tablo 5.2’de yardımcı bobin olarak kullanılan joker bobin ebatları, kesim planlamasında optimum sonuç elde edebilmek için kullanılmakta olup geçmiş dönemlerde en fazla alınan ve birden fazla müşterinin ortak kullanabildiği ebatlardan oluşmaktadır. Müşterilerden alınan siparişlerin ebatları 50 cm ile 280 cm arasında değişebilmektedir. Joker bobin ebatları da genellikle bu aralıkların ortalamasına yakın ebatlardan oluşur (143, 153, 163, 173, 183 cm). Joker bobinler planlamada stoğa üretim olarak gerçekleşmektedir. Ortalama ebatlardan oluştuğundan, birçok müşteriye pazarlama faaliyetleriyle hızlı bir şekilde satışı gerçekleştirilebilir. Sektörde joker bobinler her ne kadar hızlı satılsa da fabrikadaki temel üretim amacı stoğa değil, siparişe göre üretim olduğundan, joker bobin kesiminin de minimum olması gerekmektedir. Stok kesme problemlerinin çözümünde bazı araştırmacılar, amaç fonksiyonunda yardımcı malzemenin de minimizasyonuna yer verebilmektedirler. Yapılmış olan çalışmamızda ise kullanılacak kesim deseni (set planlaması) minimizasyonu hedeflenerek aslında joker bobin kullanımı da minimize edilmektedir. Amaç fonksiyonu veya modelde joker bobinlere doğrudan yer verilmeme sebebi budur.

**Tablo 5.3:** Diğer parametre bilgileri.

Parametre Adı	Parametre	Değer
Bobin ap oranı	$cr$	1
Min tampon eni genişliği (cm)	$Wm$	635
Max tampon eni genişliği (cm)	$Wk$	650
Siparişin <i>min</i> karşılanma oranı	$minD$	0.9
Siparişin <i>max</i> karşılanma oranı	$maxD$	1.2
Kullanılabilecek <i>max</i> set sayısı	$max_k$	$\sum d_i / 2$
$f_1$ amaç fonksiyonu ağırlığı	$\omega_1$	1000
$f_2$ amaç fonksiyonu ağırlığı	$\omega_2$	1
Yeterince büyük pozitif sayı	$\varphi$	100000

Tablo 5.3’de çalışmadaki diğer parametre değerlerine yer verilmiştir. Ana malzeme olarak üretilen tamponlar maksimum olarak 650 cm olarak retilenmektedir. Tüm kesim planlaması 650 cm’ye göre optimum olarak yapılamadığından, minimum olarak tampon üretim genişliği fabrika olarak 635 cm olarak belirlenmiştir. Bu aralıklar arasında kesim deseni yani set kesim planlamasına izin verilmektedir.

Sektörde müşteri siparişlerinin minimum karşılanma oranı ( $minD$ ) sözleşmelere bağlı olarak %90’dır. Maksimum olarak ( $maxD$ ) ise müşteriye %20 daha fazla sevk gerçekleştirilebilir. Örnekleme gerekirse, 10000 ton sipariş veren bir müşteriye, minimum 9000 ton, maksimum ise 12000 ton olarak sevk gerçekleştirilebilir.

Modelde optimum veya optimuma yakın sonucu daha hızlı sürede elde edebilmek amacıyla, kullanılabilecek maksimum set sayısı parametresi ( $max_k$ ) belirlenmiştir. Bu parametre, 650 cm enindeki her bir tamponun bölünebileceği minimum bölünme sayısından hesaplanmıştır. Tüm siparişlerin en büyük sipariş eni olan 280 cm olarak alındığı varsayıldığında,  $650/280 = 2,32$  set sayısı bulunmakta ve en düşük tamsayıya yuvarlanarak 2 değeri elde edilmektedir. Yani maksimum kesimi planlanabilecek set sayısı  $max_k = d_i / 2$  olarak modelde kullanılmaktadır.

Amaç fonksiyonu olarak ele alınan iki terim mevcuttur. Birincisi kesme işlemi için planlanan toplam set sayısının ( $f_1$ ) minimizasyonu, diğeri ise uygulanacak kesim planlamasına göre oluşan toplam firenin ( $f_2$ ) minimizasyonudur. Bu iki kısıttan hangisinin daha önemli olacağını belirlemek için  $\omega_1$  ve  $\omega_2$  olarak iki tane amaç fonksiyonu ağırlık parametresi belirlenmiştir. Sipariş yoğun dönemlerde, set sayısının minimizasyonu daha öncelikli olduğundan,  $f_1$  amaç fonksiyonunun ağırlığı olan  $\omega_1$  daha büyük değer olan 1000 olarak belirlenmiştir. Sipariş yoğun olmayan dönemlerde ise stoğa üretim gerçekleştirileceğinden,  $f_2$  karar değişkeni olan fire miktarının minimizasyonu daha büyük önem arz edecektir. Modeldeki bu ağırlık parametreleri işletmeye farklı dönemlerdeki durumlara göre esneklik kazandıracaktır.

Modeldeki setlere, ilk setten başlayarak sırayla atama yapılmasını sağlamak amacıyla belirlenen set sıra kısıtında yeterince büyük sayı olarak  $\varphi$  parametresi 100000 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.1’de verilen sayısal örnek, Tablo 5.2’deki yardımcı bobinler kullanılarak Tablo 5.3’deki parametrelerle, Python dilinde kodlanan matematiksel model kullanılarak Gurobi solver yardımıyla yapılan çözümlenme sonucu Tablo 5.5’deki sonuçlar elde edilmiştir. Gurobi Solver’a ilişkin parametreler ise *TimeLimit* 3600 sn, *FeasibilityTol* 1e-9, *MIPGap* parametresi ise varsayılan ayarında (1e-4) bırakılmıştır.

Problemin çözümüne ilişkin hesaplanan değişken değerleri Tablo 5.4’te verilmiştir. Çözümü yapan Gurobi, problemi çok kısa bir süre içerisinde (5.317 sn) çözümlenmiş olup optimum sonuca ulaşılmıştır (Gap=0).

**Tablo 5.4:** Sayısal örnek sonuç çıktıları.

<i>Sipariş Tür Sayısı</i>	<i>Kesilecek Bobin Sayısı</i>	<i>Ayarlanan Genişlik</i>	<i>Toplam Set Sayısı</i>	<i>Toplam Fire Miktarı</i>	<i>Joker Bobin Miktarı (cm)</i>	<i>Joker Bobin Sayısı (adet)</i>	<i>Amaç Fonk. Değeri</i>	<i>Çözüm Süresi (sn)</i>	<i>Gap</i>
$\sum i$	$\sum d_i$	$Wk$	$f_1$	$f_2$	$h_1$	$h_2$	$Ofv$		
4	32	650	12	44	1264	8	12044	5.317	0

**Tablo 5.5:** Sayısal örnek çözüm sonuçları.

<i>Set(k)</i>	<i>X<sub>ki</sub></i>	<i>Z<sub>kr</sub></i>	<i>U<sub>k</sub></i>	<i>W<sub>k</sub></i>	<i>T<sub>k</sub></i>	<i>F<sub>k</sub></i>
1	X[1,3]: 3 X[1,4]: 1		U[1]: 641	650	T[1]: 1	F[1]: 9
2	X[2,3]: 3 X[2,4]: 1		U[2]: 641	650	T[2]: 1	F[2]: 9
3	X[3,1]: 2	Z[3,2]: 1	U[3]: 649	650	T[3]: 1	F[3]: 1
4	X[4,3]: 3 X[4,4]: 1		U[4]: 641	650	T[4]: 1	F[4]: 9
5	X[5,3]: 3 X[5,4]: 1		U[5]: 641	650	T[5]: 1	F[5]: 9
6	X[6,1]: 1 X[6,2]: 1	Z[6,1]: 1	U[6]: 649	650	T[6]: 1	F[6]: 1
7	X[7,1]: 1 X[7,2]: 1	Z[7,1]: 1	U[7]: 649	650	T[7]: 1	F[7]: 1
8	X[8,1]: 2	Z[8,2]: 1	U[8]: 649	650	T[8]: 1	F[8]: 1
9	X[9,1]: 1 X[9,2]: 1	Z[9,1]: 1	U[9]: 649	650	T[9]: 1	F[9]: 1
10	X[10,1]: 1 X[10,2]: 1	Z[10,1]: 1	U[10]: 649	650	T[10]: 1	F[10]: 1
11	X[11,1]: 2	Z[11,2]: 1	U[11]: 649	650	T[11]: 1	F[11]: 1
12	X[12,1]: 2	Z[12,2]: 1	U[12]: 649	650	T[12]: 1	F[12]: 1
<i>f<sub>1</sub></i>			12			
<i>f<sub>2</sub></i>			44			

Elde edilen çözüme göre  $T[13]..T[16]$  arasındaki karar değişkenleri 0 değer aldığından tabloda yer verilmemiştir. Amaç fonksiyonu değeri:  $Min(\omega_1 \cdot f_1 + \omega_2 \cdot f_2)$  formülünden 12044 olarak bulunur.

Kesim planlaması yapılması gereken sipariş enleri ve optimum sonuç elde etmek için kullanılan joker bobinlerin, program çıktısına göre kesim deseni Tablo 5.6'daki gibi oluşmuştur. Siparişin tamamını verilen kısıtlar doğrultusunda kesim planında yerleştirmek için 12 set planlaması yapıp 153 ve 163 cm enindeki joker bobinlerden de 8 adet kullanılarak optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca planlanan her setten kalan fireler de (cm) Tablo 5.6'da paylaşılmıştır.

**Tablo 5.6:** Sayısal örneğe ait atama sonuçları.

<i>Set(k)</i>	<i>Kesim Deseni</i>				$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	182	182	182	95	641	650	9
2	182	182	182	95	641	650	9
3	243	243	163	-	649	650	1
4	182	182	182	95	641	650	9
5	182	182	182	95	641	650	9
6	243	253	153	-	649	650	1
7	243	253	153	-	649	650	1
8	243	243	163	-	649	650	1
9	243	253	153	-	649	650	1
10	243	253	153	-	649	650	1
11	243	243	163	-	649	650	1
12	243	243	163	-	649	650	1

$Wk$  karar değişkeni olup optimum sonuca göre tüm kesim desenlerinin alabileceği maksimum tampon uzunluğunu ifade eder ve değeri model tarafından belirlenmektedir. Model, sayısal örnek çözümünde  $Wk$  karar değişkenini optimum sonuca ulaşmak için 650 olarak hesaplamıştır.

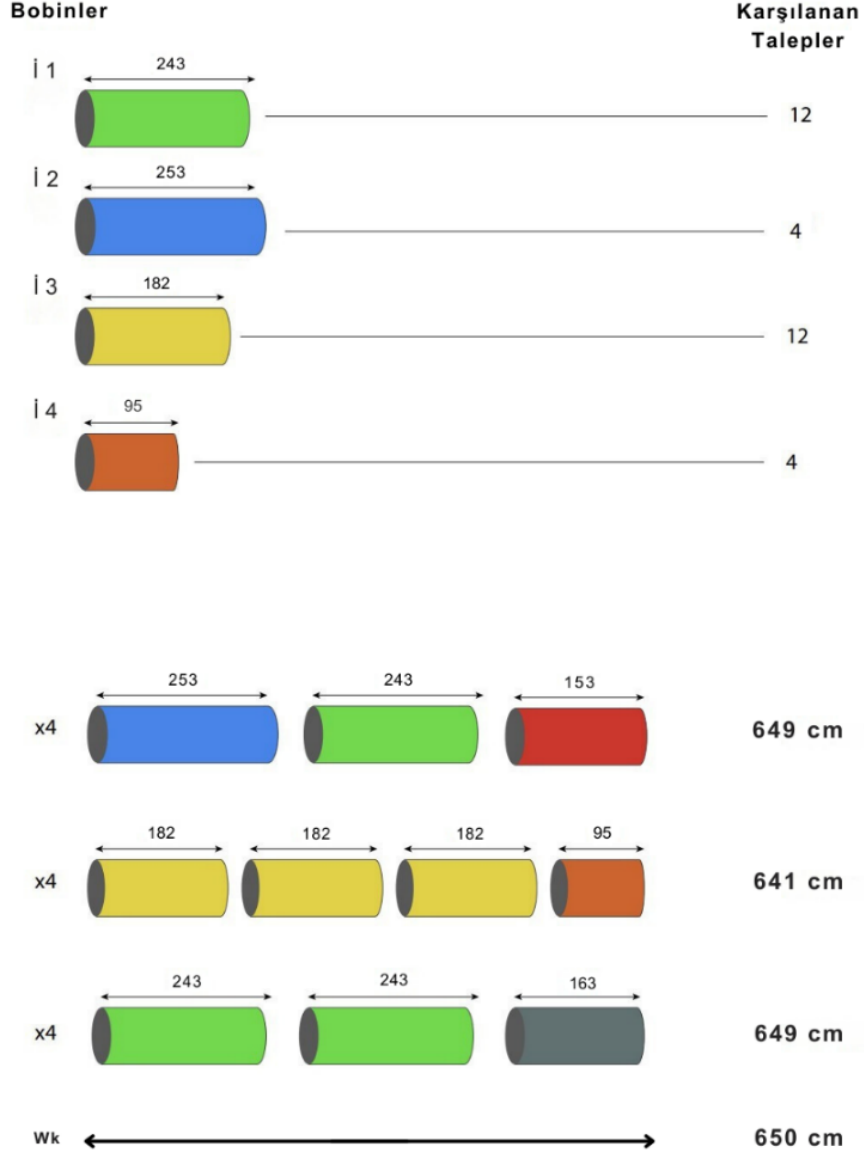
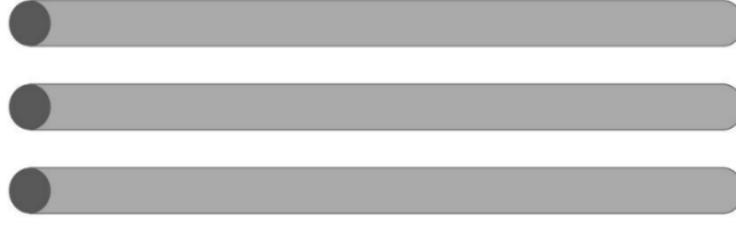
Talebin verilen kısıtlar doğrultusunda karşılandığı da Tablo 5.7’de görülmektedir.

**Tablo 5.7:** Talebin karşılanması.

<b>Ürün Adı</b>	<b>Bobin Eni (cm)</b>	<b>Talep (kg)</b>	<b>Talep Bobin Sayısı (adet)</b>	<b>Kesilen Bobin Sayısı</b>
FLUTING, 080GR	243	30.000	12,35	12
FLUTING, 080GR	253	10.000	3,95	4
FLUTING, 080GR	182	20.000	10,99	12
FLUTING, 080GR	95	4.000	4,21	4
FLUTING, 080GR	153	0	0	4
FLUTING, 080GR	163	0	0	4

Tablo 5.7’deki 153 ve 163 cm enindeki bobinler joker bobin olarak modelde kullanıldığından, talep (kg) ve talep bobin sayısı (adet) değerleri tabloda sıfır olarak gösterilmiştir.

## TAMPONLAR (635 - 650 cm)



Şekil 5.1: Sayısal örnek çözümünün görselleştirilmesi.

Sayısal örnek çözüm sonucu Şekil 5.1'deki gibi görselleştirilmiştir. İstenilen talepleri karşılamak için 650 cm enindeki üç adet tampon kullanılıp toplam 12 kesim deseni (set planlaması) ile çözüme ulaşılmıştır. Optimum çözüme ulaşılmasında ise 153 ve 163 cm enindeki joker bobinlerden 4'er adet kullanıldığı görülmektedir.

## 5.2 Deneysel Testler

Bu bölümde geliştirilen matematiksel modelin, farklı problem boyutları olarak 41 adet problem verisi üzerindeki çözümlenmeleri incelenmiştir. Problem boyutları, küçük (small), orta (med), büyük (large) ve çok büyük (very large) olarak gruplanmıştır. Problemlerin boyutları belirlenirken, kesim planlaması yapılacak olan sipariş tür sayısı (bobin genişlik türleri) ve planlanacak bobin sayısı referans alınmıştır. Ayrıca kullanılabilir joker bobinlerin ebatları da problemlerde farklılaştırılmıştır.

Problemlere ait, ürün adı, sipariş indeksi, bobin eni, kg olarak talep miktarı, 135 cm bobin çapı parametresine göre hesaplanan taleplerin adet cinsinden bobin miktarları ve kesim planlamasında kullanılabilir olan joker (yardımcı) bobinlerin en bilgileri gibi veriler, Ekler, Ek A:Deneysel Testler bölümünde (Tablo A.1-Tablo A.41) aralığında verilmiştir.

Tablo 5.8’de deneysel testlerde kullanılan problem setlerine ait özet bilgiler bulunmaktadır. Test verileri, fabrikanın belirli bir geçmiş dönemdeki gerçek verileri üzerinden probleme uyarlanmıştır.

**Tablo 5.8:** Deneysel test verilerine ilişkin özet bilgi.

Problem Boyutu	Problem No	Ürün Adı	Sipariş Tür Sayısı	Kesilecek Bobin Sayısı	Joker Bobin Tür Sayısı	En Küçük Sipariş Eni (cm)	En Büyük Sipariş Eni (cm)
küçük	Ex1	FLT, 130GR	3	20,02	3	162	250
	Ex2	FLT, 080GR	3	22,24	3	182	253
	Ex3	FLT, 080GR	3	24,32	3	182	253
	Ex4	FLT, 080GR	4	24,16	4	95	253
	Ex5	ETL, 090GR	4	26,13	4	102	233
	Ex6	FLT, 080GR	4	28,18	4	123	243
	Ex7	HP ETL, 130GR	4	30,26	4	132	172
	Ex8	KRAFT, 110GR	6	30,32	5	75	250
	Ex9	FLT, 080GR	6	33,93	5	95	253
	Ex10	HP FLT, 140GR	6	39,07	5	75	205
orta	Ex11	HP ETL, 080GR	6	50,42	5	103	245
	Ex12	FLT, 080GR	6	52,32	5	112	230
	Ex13	ETL, 080GR	6	55,16	5	123	183
	Ex14	KRAFT, 110GR	8	54,39	5	185	250
	Ex15	FLT, 100GR	8	56,91	5	72	122
	Ex16	HP ETL, 100GR	8	58,22	5	102	185
	Ex17	HP ETL, 080GR	8	60,08	5	123	245
	Ex18	HP ETL, 110GR	9	60,22	5	180	250

**Tablo 5.8** (devamı)

Problem Boyutu	Problem No	Ürün Adı	Sipariş Tür Sayısı	Kesilecek Bobin Sayısı	Joker Bobin Tür Sayısı	En Küçük Sipariş Eni (cm)	En Büyük Sipariş Eni (cm)
büyük	Ex19	HP ETL, 135GR	9	63,55	5	72	250
	Ex20	HP ETL, 100GR	9	65,20	5	102	185
	Ex21	KRAFT, 135GR	12	150,16	5	122	250
	Ex22	KRAFT, 110GR	12	170,80	5	112	250
	Ex23	HP ETL, 120GR	12	190,20	5	153	245
	Ex24	HP ETL, 115GR	15	160,78	5	138	250
	Ex25	HP ETL, 135GR	15	180,50	5	143	250
	Ex26	HP ETL, 135GR	15	200,42	5	122	250
	Ex27	FLT, 080GR	18	221,17	5	113	253
	Ex28	HP FLT, 125GR	18	240,17	5	102	250
çok büyük	Ex29	HP FLT, 120GR	18	280,38	5	85	240
	Ex30	HP ETL, 135GR	18	300,88	5	75	250
	Ex31	HP ETL, 090GR	20	330,14	5	71	250
	Ex32	HP FLT, 080GR	20	350,15	5	65	250
	Ex33	HP FLT, 100GR	20	370,48	5	52	280
	Ex34	HP ETL, 110GR	24	390,15	5	102	250
	Ex35	HP FLT, 100GR	24	411,11	5	112	250
	Ex36	HP FLT, 130GR	24	431,02	5	76	250
	Ex37	HP FLT, 120GR	27	420,46	5	65	280
	Ex38	HP FLT, 080GR	27	440,43	5	66	250
	Ex39	HP ETL, 090GR	27	480,61	5	70	250
	Ex40	HP FLT, 080GR	27	510,62	5	85	280
	Ex41	HP FLT, 130GR	30	883,54	5	75	250

Tablo 5.8'deki deneysel test verileri, geliştirilen matematiksel model ile Tablo 5.3'deki parametreler kullanılarak, 3600 sn (bir saat) ve 14400 sn (dört saat) olmak üzere iki farklı süre limitine göre programda çözümlenmiştir.

İki farklı süre limitine (3600 sn ve 14400 sn) göre çözümleme sonucuna ilişkin veriler, Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da verilmiştir.

Tablo 5.9'daki çözümlere bakıldığında, geliştirilen matematiksel model, 3600 sn süre limitinde, küçük ve orta büyüklükteki 20 adet problemde, 15 tanesini kısa süreler içinde optimum olarak çözerken, beş tanesini ise (Ex14, Ex16, Ex17, Ex18, Ex20) verilen süre limitinde optimuma yakın ( $Gap < 0,01$ ) olarak çözmüştür. Büyük problemlerin üç tanesinde (Ex21, Ex23, Ex28) optimum sonuç elde edilip altı tanesinde (Ex22, Ex24, Ex25, Ex26,

Ex27, Ex30) yine optimuma yakın (Gap <0,02) sonuçlar bulunmuşken, bir tane problemde (Ex29) ise 3600 sn (1 saat) süre limitinde uygun çözüm dahi elde edilememiştir. Çok büyük boyutlu problemlerin üç tanesinde (Ex30, Ex35, Ex37) optimuma yakın sonuçlar elde edilse de çoğunluğunda çözüm aşamasına ulaşamamıştır.

**Tablo 5.9:** Deneysel testlerin çözüm sonuçları – 3600 sn.

<i>Problem No</i>	<i>Sipariş Tür Sayısı</i>	<i>Kesilecek Bobin Sayısı</i>	<i>Çözüm Süresi (sn)</i>	<i>Gap</i>	<i>Toplam Set Sayısı</i>	<i>Toplam Fire Miktarı</i>	<i>Amaç Fonk. Değeri</i>	<i>Joker Bobin Miktarı (cm)</i>	<i>Joker Bobin Sayısı (adet)</i>
<i>ProbID</i>	$\sum i$	$\sum d_i$			$f_1$	$f_2$	$Ofv$	$h_1$	$h_2$
Ex1	3	20	<1	0,000	7	25	7025	602	4
Ex2	3	22	2	0,000	11	8	11008	2112	14
Ex3	3	24	<1	0,000	12	8	12008	2408	16
Ex4	4	24	1	0,000	9	10	9010	1570	10
Ex5	4	26	1	0,000	10	48	10048	692	4
Ex6	4	28	<1	0,000	11	26	11026	1620	10
Ex7	4	30	<1	0,000	10	91	10091	1903	11
Ex8	6	30	2	0,000	9	31	9031	0	0
Ex9	6	34	33	0,000	10	14	10014	775	5
Ex10	6	39	2342	0,000	12	8	12008	1397	9
Ex11	6	50	6	0,000	18	109	18109	2209	13
Ex12	6	52	18	0,000	14	58	14058	296	2
Ex13	6	55	2	0,000	13	92	13092	0	0
Ex14	8	54	3600	0,001	19	7	19007	343	2
Ex15	8	57	2	0,000	8	6	8006	173	1
Ex16	8	58	3600	0,009	11	109	11109	0	0
Ex17	8	60	3600	0,001	18	135	18135	529	3
Ex18	9	60	3600	0,001	22	32	22032	958	6
Ex19	9	63	24	0,000	20	64	20064	556	5
Ex20	9	65	3600	0,001	14	13	14013	173	1
Ex21	12	150	193	0,000	47	213	47213	439	3
Ex22	12	170	3600	0,017	54	75	54075	2601	17
Ex23	12	190	129	0,000	55	378	55378	858	6
Ex24	15	160	3600	0,001	50	87	50087	306	2
Ex25	15	180	3600	0,002	55	89	55089	163	1
Ex26	15	200	3600	0,019	62	187	62187	815	5
Ex27	18	221	3600	0,006	57	343	57343	163	1
Ex28	18	240	473	0,000	71	198	71198	163	1
Ex29	18	270	-	-					
Ex30	18	300	3600	0,018	69	257	69257	326	2
Ex31	20	330	-	-					
Ex32	20	350	-	-					
Ex33	20	370	-	-					
Ex34	24	390	-	-					

**Tablo 5.9** (devamı)

<i>Problem No</i>	<i>Sipariş Tür Sayısı</i>	<i>Kesilecek Bobin Sayısı</i>	<i>Çözüm Süresi (sn)</i>	<i>Gap</i>	<i>Toplam Set Sayısı</i>	<i>Toplam Fire Miktarı</i>	<i>Amaç Fonk. Değeri</i>	<i>Joker Bobin Miktarı (cm)</i>	<i>Joker Bobin Sayısı (adet)</i>
<i>ProbID</i>	$\sum i$	$\sum d_i$			$f_1$	$f_2$	$Ofv$	$h_1$	$h_2$
Ex35	24	411	3600	0,009	126	136	126136	918	6
Ex36	24	431	-	-					
Ex37	27	420	3600	0,001	105	86	105086	0	0
Ex38	27	440	-	-					
Ex39	27	480	-	-					
Ex40	27	510	-	-					
Ex41	30	883	-	-					

Geliştirilen matematiksel modelin, 14400 sn süre limitindeki Tablo 5.10'daki çözümlerine bakıldığında, küçük, orta ve büyük problem boyutlarında 3600 sn süre limitine göre aynı sonuçlar elde edilmiştir. Çok büyük boyuttaki problemlerin çözümüne bakıldığında ise 3600 sn süre limitine göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür (Tablo 5.10'da koyu renkli olarak verilmiştir). Çok büyük boyuttaki dört tane problemde (Ex34, Ex35, Ex36, Ex37) optimuma yakın ( $Gap < 0,02$ ) sonuç elde edilirken, sekiz tane problemde çözüm aşamasına ulaşamamıştır. 3600 sn süre limitinde uygun çözüm dahi bulunamayan Ex34 ve Ex36 problemleri, 14400 sn süre limitinde optimuma yakın olarak çözülmüştür. Ex35 probleminde ise 3600 sn süre limitinde 136 cm olan fire miktarı, 14400 sn süre limitinde ise 126 cm bulunarak amaç fonksiyonunda daha iyi bir değer elde edilmiştir. Fire miktarındaki iyilemeyi ise farklı bir joker bobin ebatı kullanarak gerçekleştirmiştir (Toplam joker bobin miktarı, 918 cm'den, 928 cm olarak değişmiştir).

**Tablo 5.10:** Deneysel testlerin çözüm sonuçları – 14400 sn.

<i>Problem No</i>	<i>Sipariş Tür Sayısı</i>	<i>Kesilecek Bobin Sayısı</i>	<i>Çözüm Süresi (sn)</i>	<i>Gap</i>	<i>Toplam Set Sayısı</i>	<i>Toplam Fire Miktarı</i>	<i>Amaç Fonk. Değeri</i>	<i>Joker Bobin Miktar (cm)</i>	<i>Joker Bobin Sayısı (adet)</i>
<i>ProbID</i>	$\sum i$	$\sum d_i$			$f_1$	$f_2$	$Ofv$	$h_1$	$h_2$
Ex1	3	20	0	0,000	7	25	7025	602	4
Ex2	3	22	2	0,000	11	8	11008	2112	14
Ex3	3	24	0	0,000	12	8	12008	2408	16
Ex4	4	24	1	0,000	9	10	9010	1570	10
Ex5	4	26	1	0,000	10	48	10048	692	4
Ex6	4	28	0	0,000	11	26	11026	1620	10
Ex7	4	30	0	0,000	10	91	10091	1903	11
Ex8	6	30	2	0,000	9	31	9031	0	0
Ex9	6	34	33	0,000	10	14	10014	775	5
Ex10	6	39	2342	0,000	12	8	12008	1397	9
Ex11	6	50	6	0,000	18	109	18109	2209	13
Ex12	6	52	18	0,000	14	58	14058	296	2
Ex13	6	55	2	0,000	13	92	13092	0	0
Ex14	8	54	14400	0,001	19	7	19007	343	2
Ex15	8	57	2	0,000	8	6	8006	173	1
Ex16	8	58	14400	0,009	11	109	11109	0	0
Ex17	8	60	14400	0,001	18	135	18135	529	3
Ex18	9	60	14400	0,001	22	32	22032	958	6
Ex19	9	63	25	0,000	20	64	20064	556	5
Ex20	9	65	7479	0,000	14	13	14013	173	1
Ex21	12	150	201	0,000	47	213	47213	439	3
Ex22	12	170	14400	0,017	54	75	54075	2601	17
Ex23	12	190	132	0,000	55	378	55378	858	6
Ex24	15	160	14400	0,001	50	87	50087	306	2
Ex25	15	180	14400	0,002	55	89	55089	163	1
Ex26	15	200	14400	0,019	62	187	62187	815	5
Ex27	18	221	14400	0,006	57	343	57343	163	1
Ex28	18	240	424	0,000	71	198	71198	163	1
Ex29	18	270	-	-					
Ex30	18	300	14400	0,018	69	257	69257	326	2
Ex31	20	330	-	-					
Ex32	20	350	-	-					
Ex33	20	370	-	-					
<b>Ex34</b>	<b>24</b>	<b>390</b>	<b>14400</b>	<b>0,019</b>	<b>117</b>	<b>279</b>	<b>117279</b>	<b>429</b>	<b>3</b>
<b>Ex35</b>	<b>24</b>	<b>411</b>	<b>14400</b>	<b>0,009</b>	<b>126</b>	<b>126</b>	<b>126126</b>	<b>928</b>	<b>6</b>
<b>Ex36</b>	<b>24</b>	<b>431</b>	<b>14400</b>	<b>0,018</b>	<b>121</b>	<b>141</b>	<b>121141</b>	<b>306</b>	<b>2</b>
Ex37	27	420	14400	0,001	105	86	105086	0	0
Ex38	27	440	-	-					
Ex39	27	480	-	-					
Ex40	27	510	-	-					
Ex41	30	883	-	-					

### 5.3 Gerçek Hayat Vaka Çalışması

Bu bölümde tez kapsamında uygulama yapılan firmadaki, planlama personeli tarafından 2024 yılı içerisindeki geçmiş dönemlerde yapılmış olan kesim planlamalarının, geliştirilen matematiksel model ile programda çözdürülüp sonuçları karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada orta, büyük ve çok büyük problem boyutundaki yedi adet geçmiş dönem verisi kullanılmıştır. Parametre olarak yine sayısal örnek bölümündeki prosese ait gerçek parametreler referans alınmıştır.

Tablo 5.11’de gerçek hayat vaka çalışması (GHVÇ) verilerinin özet bilgileri paylaşılmıştır.

**Tablo 5.11:** Gerçek hayat vaka çalışması verilerine ilişkin özet bilgi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş Tür Sayısı	Kesilecek Bobin Sayısı	Joker Bobin Tür Sayısı	En Küçük Sipariş Eni (cm)	En Büyük Sipariş Eni (cm)
Cs1	FLT, 080GR	18	445,38	7	113	250
Cs2	ETL, 080GR	9	238,76	7	123	253
Cs3	HP ETL, 100GR	13	637,62	6	102	185
Cs4	HP ETL, 135GR	18	258,39	8	122	250
Cs5	FLT, 080GR	9	197,20	6	112	250
Cs6	HP ETL, 130GR	7	282,96	7	132	183
Cs7	HP ETL, 080GR	9	168,10	8	103	245

Cs1 ve Cs2 nolu problemlere ait kesim planlaması yapılması istenen ürün, bobin enleri, talep miktarı ve planlaması yapılacak olan hesaplanmış bobin sayısı (adet) ile planlama esnasında optimum sonuç alabilmek için kullanılacak joker bobin enleri, Tablo 5.12 ve Tablo 5.13’te liste olarak verilmiştir. Diğer problemlerin (Cs3, Cs4, Cs5, Cs6, Cs7) detaylı verileri ise Ekler kısmında Ek B:Gerçek Hayat Vaka Çalışması Verileri alt başlığı altında tablolar (Tablo B.1-Tablo B.5 aralığında) halinde sunulmuştur.

**Tablo 5.12:** Gerçek hayat vaka çalışması Cs1 problem verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Cs1	FLT, 080GR	1	243	234.842	96,64	143
	FLT, 080GR	2	250	128.712	51,48	153
	FLT, 080GR	3	183	73.714	40,28	163
	FLT, 080GR	4	120	70.000	58,33	173
	FLT, 080GR	5	153	69.748	45,59	183
	FLT, 080GR	6	123	47.364	38,51	102
	FLT, 080GR	7	132	30.000	22,73	90
	FLT, 080GR	8	122	25.000	20,49	
	FLT, 080GR	9	143	25.000	17,48	
	FLT, 080GR	10	163	23.604	14,48	
	FLT, 080GR	11	162	23.544	14,53	
	FLT, 080GR	12	113	13.380	11,84	
	FLT, 080GR	13	182	12.192	7,00	
	FLT, 080GR	14	202	4.000	2,00	
	FLT, 080GR	15	233	2.528	1,00	
	FLT, 080GR	16	220	2.200	1,00	
	FLT, 080GR	17	253	2.090	1,00	
	FLT, 080GR	18	172	1.720	1,00	

**Tablo 5.13:** Gerçek hayat vaka çalışması Cs2 problem verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Cs2	ETL, 080GR	1	153	115.000	75,16	143
	ETL, 080GR	2	183	86.016	47,00	153
	ETL, 080GR	3	143	52.582	36,77	163
	ETL, 080GR	4	123	51.890	42,19	173
	ETL, 080GR	5	133	30.000	22,56	183
	ETL, 080GR	6	173	10.000	6,00	85
	ETL, 080GR	7	163	9.110	6,00	75
	ETL, 080GR	8	244	5.070	2,08	
	ETL, 080GR	9	253	2.134	1,00	

Vaka çalışmasına konu olan problemlerden, Cs1 ve Cs2 nolu problemlerin, planlama sorumlusu tarafından yapılmış ve iş emri olarak üretim departmanına verilmiş çözümleri, Tablo 5.14 ve Tablo 5.15'te paylaşılmıştır.

**Tablo 5.14:** Gerçek hayat vaka çalışması Cs1 planlama sorumlusu çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set Sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	1	253	220	172	-	-	645	650	5
2	1	250	233	163	-	-	646	650	4
3	1	243	202	202	-	-	647	650	3
4	18	250	250	143	-	-	643	650	126
5	14	243	243	163	-	-	649	650	14
6	15	243	243	162	-	-	648	650	30
7	14	250	243	153	-	-	646	650	56
8	13	243	243	153	-	-	639	650	143
9	7	183	182	153	132	-	650	650	0
10	6	183	120	120	113	113	649	650	6
11	12	153	132	123	122	120	650	650	0
12	8	183	123	122	120	<b>102</b>	650	650	0
13	4	183	132	123	120	<b>90</b>	648	650	8
14	11	183	123	120	120	<b>102</b>	648	650	22
15	4	250	183	123	<b>90</b>		646	650	16
$f_1$					129				
$f_2$					433				
$h_1$					2658				
$h_2$					27				

**Tablo 5.15:** Gerçek hayat vaka çalışması Cs2 planlama sorumlusu çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set Sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	1	253	244	153	-	-	650	650	0
2	1	244	143	133	123	-	643	650	7
3	25	183	153	153	153	-	642	650	200
4	6	183	173	163	123	-	642	650	48
5	8	183	183	143	133	-	642	650	64
6	12	143	133	123	123	123	645	650	60
7	2	143	143	143	133	<b>85</b>	647	650	6
8	3	143	143	143	143	<b>75</b>	647	650	9
$f_1$					58				
$f_2$					394				
$h_1$					395				
$h_2$					5				

Cs1 nolu problemin planlama sorumlusu tarafından yapılan çözümü incelendiğinde, probleme konu olan 18 farklı türdeki sipariş enlerini ve 445,38 adet planlaması istenilen bobini, kısıtlar doğrultusunda, 15 farklı kesim deseni ile, 129 adet set sayısı planlaması yaparak çözümlenmiştir. Bu çözümlenme sonucu toplam fire, 433 cm çıkmıştır. Ayrıca bu çözümü elde ederken, 90 ve 102 cm enindeki bobinlerin her birinden 8 ve 19 adet joker bobin kullanmıştır.

Diğer problem olan Cs2 nin çözümü incelendiğinde ise 9 farklı sipariş enindeki 238,76 adet bobinin kesim planlaması yapılırken, 8 farklı kesim deseni ile 58 set planlaması gerçekleştirip 394 cm fire kaybı oluşmuştur. Bu çözümü elde ederken de joker bobin olarak 85 ve 75 cm enindeki bobinlerden sırasıyla 2 ve 3 adet kullanmıştır.

Vaka çalışmasındaki diğer problemlerin (Cs3, Cs4, Cs5, Cs6, Cs7), planlama sorumlusu tarafından yapılmış olan kesim planları, amaç fonksiyonu ( $f_1, f_2$ ) değerleri ve çözümü elde etmek için kullandığı joker bobin miktarları, Ekler kısmında, Ek B:Gerçek Hayat Vaka Çalışması Verileri alt başlığı altındaki Tablo B.6 - Tablo B.10 aralığında verilmiştir.

GHVÇ problemlerinin geliştirilen matematiksel model ile programda 3600 sn süre limiti altında çalıştırılması sonucunda Tablo 5.16'daki sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 5.16:** Gerçek hayat vaka çalışması program çözümleri - 3600 sn.

<i>Problem No</i>	<i>Sipariş Tür Sayısı</i>	<i>Kesilecek Bobin Sayısı</i>	<i>Çözüm Süresi (sn)</i>	<i>Gap</i>	<i>Toplam Set Sayısı</i>	<i>Toplam Fire Miktarı</i>	<i>Amaç Fonk. Değeri</i>	<i>Joker Bobin Miktar (cm)</i>	<i>Joker Bobin Sayısı (adet)</i>
<i>ProbID</i>	$\sum i$	$\sum d_i$			$f_1$	$f_2$	$Ofv$	$h_1$	$h_2$
Cs1	18	445	-	-	-	-	-	-	-
Cs2	9	239	3600	0,020	53	341	53341	750	10
Cs3	13	638	-	-	-	-	-	-	-
Cs4	18	258	3600	0,003	79	258	79258	270	2
Cs5	9	197	3600	0,012	81	282	81282	9985	65
Cs6	7	283	3600	0,002	65	140	65140	1875	25
Cs7	9	168	3600	0,018	48	410	48410	1306	6

Modelin çözüm sonuçlarına bakıldığında, 3600 sn süre limitinde Cs1 ve Cs3 nolu problemlerin çözüm aşamasına geçilememiştir. Cs2, Cs4, Cs5, Cs6 ve Cs7 nolu problemlerde ise optimuma yakın (Gap < 0,02) sonuçlar elde edilmiştir.

3600 sn süre limitinde çözüm aşamasına geçilemeyen Cs1 ve Cs3 nolu problemler ayrıca 14440 sn (4 saat) olarak çalıştırıldığında ise Tablo 5.17'deki sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 5.17:** GHVÇ Cs1 ve Cs3 program çözümleri - 14400 sn.

<i>Problem No</i>	<i>Sipariş Tür Sayısı</i>	<i>Kesilecek Bobin Sayısı</i>	<i>Çözüm Süresi (sn)</i>	<i>Gap</i>	<i>Toplam Set Sayısı</i>	<i>Toplam Fire Miktarı</i>	<i>Amaç Fonk. Değeri</i>	<i>Joker Bobin Miktar (cm)</i>	<i>Joker Bobin Sayısı (adet)</i>
<i>ProbID</i>	$\sum i$	$\sum d_i$			$f_1$	$f_2$	$Ofv$	$h_1$	$h_2$
Cs1	18	445	14400	0,029	115	423	115423	1734	17
Cs3	13	638	-	-	-	-	-	-	-

14400 sn süre limitinde, Cs1 nolu problemde optimuma yakın (Gap<0,03) sonuç elde edilirken, Cs3 nolu problemde yine çözüm aşamasına geçilememiş olup daha uzun bir süre limiti olan 172800 sn (48 saat) olarak test amacıyla çalıştırılmıştır. Bu süre zarfında yine model çözüm aşamasına geçememiştir.

Vaka çalışmasına konu olan problemlerden Cs1 ve Cs2 nolu problemlerin planlama sorumlusu tarafından yapılmış çözümleri, Tablo 5.14 ve Tablo 5.15'de verilmişti. Geliştirilen model sonucu programda elde edilen çözümlerin detayı ise Tablo 5.18 ve Tablo 5.19'da paylaşılmıştır.

**Tablo 5.18:** Gerçek hayat vaka çalışması Cs1 model çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set Sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	17	243	250	153	-	-	646	650	68
2	11	243	243	153	-	-	639	650	121
3	11	250	250	143	-	-	643	650	77
4	10	243	243	163	-	-	649	650	10
5	8	243	183	122	<b>102</b>	-	650	650	0
6	7	243	243	162	-	-	648	650	14
7	5	183	120	120	113	113	649	650	5
8	5	250	153	123	123	-	649	650	5
9	5	132	132	132	132	122	650	650	0
10	2	183	183	122	162	-	650	650	0
11	2	183	183	182	<b>102</b>	-	650	650	0
12	2	250	120	120	153	-	643	650	14
13	2	153	123	123	123	123	645	650	10
14	2	120	120	120	143	143	646	650	8
15	1	243	120	120	162	-	645	650	5
16	1	183	183	153	122	-	641	650	9
17	1	120	120	120	120	162	642	650	8
18	1	120	153	123	123	123	642	650	8
19	1	183	183	153	123	-	642	650	8
20	1	120	120	120	120	163	643	650	7
21	1	120	120	120	182	<b>102</b>	644	650	6
22	1	183	120	120	220	-	643	650	7
23	1	183	120	120	120	<b>102</b>	645	650	5
24	1	243	120	120	153	-	636	650	14
25	1	250	123	132	143	-	648	650	2
26	1	120	120	123	123	162	648	650	2
27	1	183	113	182	172	-	650	650	0
28	1	243	183	120	<b>102</b>	-	648	650	2
29	1	183	183	120	162	-	648	650	2
30	1	183	120	120	123	<b>102</b>	648	650	2
31	1	183	120	123	122	<b>102</b>	650	650	0
32	1	183	183	120	163	-	649	650	1
33	1	120	123	123	182	<b>102</b>	650	650	0
34	1	183	122	163	182	-	650	650	0
35	1	243	123	122	162	-	650	650	0
36	1	243	123	182	<b>102</b>	-	650	650	0
37	1	123	123	202	202	-	650	650	0
38	1	120	120	123	123	163	649	650	1
39	1	183	120	113	233	-	649	650	1
40	1	243	253	153	-	-	649	650	1
$f_1$					115				
$f_2$					423				
$h_1$					1734				
$h_2$					17				

**Tablo 5.19:** Gerçek hayat vaka çalışması Cs2 model çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set Sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	7	153	123	123	123	123	645	650	35
2	2	153	153	133	133	<b>75</b>	647	650	6
3	15	153	153	153	183	-	642	650	120
4	5	153	183	183	123	-	642	650	40
5	5	143	143	143	143	<b>75</b>	647	650	15
6	2	123	123	133	133	133	645	650	10
7	3	183	183	143	133	-	642	650	24
8	1	153	143	143	133	<b>75</b>	647	650	3
9	2	183	133	163	163	-	642	650	16
10	1	153	143	173	173	-	642	650	8
11	2	153	183	133	173	-	642	650	16
12	1	183	123	133	133	<b>75</b>	647	650	3
13	2	183	143	143	173	-	642	650	16
14	2	153	183	143	163	-	642	650	16
15	1	183	183	143	133	-	642	650	8
16	1	183	143	244	<b>75</b>	-	645	650	5
17	1	153	244	253	-	-	650	650	0
$f_1$					53				
$f_2$					341				
$h_1$					750				
$h_2$					10				

Model çözümlenmeleri verilen Tablo 5.18 ve Tablo 5.19'daki "Kesim Deseni" sütunundaki koyu renkli ifadeler, modelin kullandığı joker bobin ebatlarını (cm) tanımlamaktadır. "Set Sayısı" sütunu, ilgili kesim deseninin tekrar sayısıdır.

Cs1 nolu problemin, siparişi karşılamak için verilen kısıtlar doğrultusunda, planlama sorumlusu ve modele ait çözüm sonucu karşılaştırıldığında, planlama sorumlusu toplam 129 adet set sayısı planlaması ve 433 cm toplam fire çıkarırken, model ise 115 adet set sayısı ve 423 cm toplam fire hesaplayarak problemi çözümlenmiştir. Ayrıca planlama sorumlusu 27 adet joker bobin kullanırken, model 17 adet joker bobin ile çözüme ulaşmıştır.

Cs2 nolu probleme bakıldığında ise planlama sorumlusu 58 adet set sayısı planlaması yaparken model ise 53 set sayısı planlaması gerçekleştirmiştir. Kesim planlaması sonucu oluşan toplam fire miktarları kontrol edildiğinde ise planlama sorumlusu 394 cm, model ise 341 cm toplam fire miktarı oluşmuştur.

Çözümlemede dikkat çeken bir sonuç ise kullanılan joker bobin miktarlarıdır. Planlama sorumlusu çözüm için 85 cm enindeki joker bobinden iki tane, 75 cm enindeki joker bobinden ise üç tane olmak üzere toplam beş adet joker bobin kullanırken, model ise 75 cm enindeki joker bobinden 10 tane kullanarak çözüme ulaşmıştır. Model, miktar (cm) ve sayı (adet) olarak planlama sorumlusuna göre daha fazla joker bobin kullanmıştır. Bu durum ilk bakışta negatif gibi gözükse de detaylarına baktığımızda, toplam talep miktarı yani kesilecek bobin sayısı 239 iken, planlama sorumlusu verilen kısıtlar doğrultusunda toplamda 248 adet (243 adet sipariş eni, 5 adet joker bobin) bobin planlaması ile çözüme ulaşırken, model ise 229 adet (219 adet sipariş eni, 10 adet joker bobin) ile daha az sayıda bobin planlaması ile çözüme ulaşmıştır. Bu sonuç modelin siparişin minimum ( $minD=0.9$ ) ve maksimum ( $maxD=1.2$ ) karşılanma oranı parametrelerini de daha optimum şekilde kullandığını göstermektedir.

Çalışmaya konu olan tüm GHVÇ problemlerinin, model ile planlama sorumlusu çözümlerinin sonuç değerlerinin karşılaştırması ise Tablo 5.20’de verilmiştir.

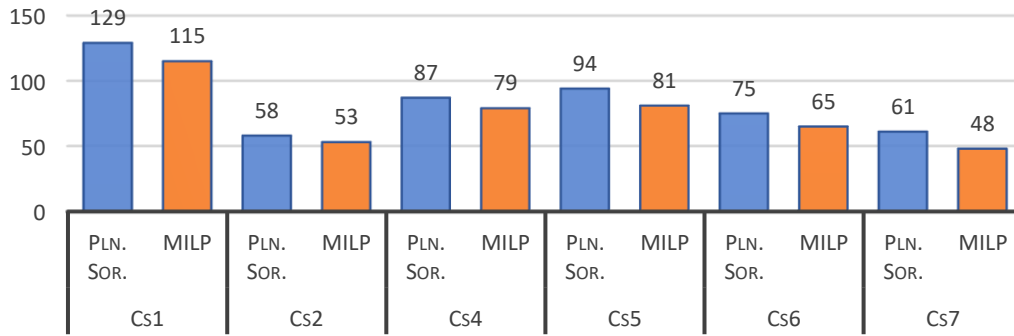
**Tablo 5.20:** GHVÇ problemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması.

<i>Problem No</i>	<i>Sipariş Tür Sayısı</i>	<i>Kesilecek Bobin Sayısı</i>	<i>Çözücü</i>	<i>Toplam Set Sayısı</i>	<i>Toplam Fire Miktarı</i>	<i>Amaç Fonk. Değeri</i>	<i>Joker Bobin Miktar (cm)</i>	<i>Joker Bobin Sayısı (adet)</i>
<i>ProbID</i>	$\sum i$	$\sum d_i$		$f_1$	$f_2$	$Ofv$	$h_1$	$h_2$
Cs1	18	445	Pln. Sor.	129	433	129433	2658	27
			MILP	115	423	115423	1734	17
Cs2	9	239	Pln. Sor.	58	394	58394	395	5
			MILP	53	341	53341	750	10
Cs3	13	638	Pln. Sor.	151	1130	152130	976	8
			MILP	-	-	-	-	-
Cs4	18	258	Pln. Sor.	87	429	87429	736	7
			MILP	79	258	79258	270	2
Cs5	9	197	Pln. Sor.	94	320	94320	11642	74
			MILP	81	282	81282	9985	65
Cs6	7	283	Pln. Sor.	75	540	75540	3925	26
			MILP	65	140	65140	1875	25
Cs7	9	168	Pln. Sor.	61	282	61282	6999	39
			MILP	48	410	48410	1306	6

Modelin verilen süre limitlerine göre çözüm bulabildiği problemlerdeki sonuçlarının, planlama sorumlusunun çözüm sonuçlarıyla karşılaştırmasına bakıldığında, amaç fonksiyonu değişkenleri olan, toplam set sayısı ( $f_1$ ) ve toplam fire miktarı ( $f_2$ ) değerlerinde, modelin çözümlerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

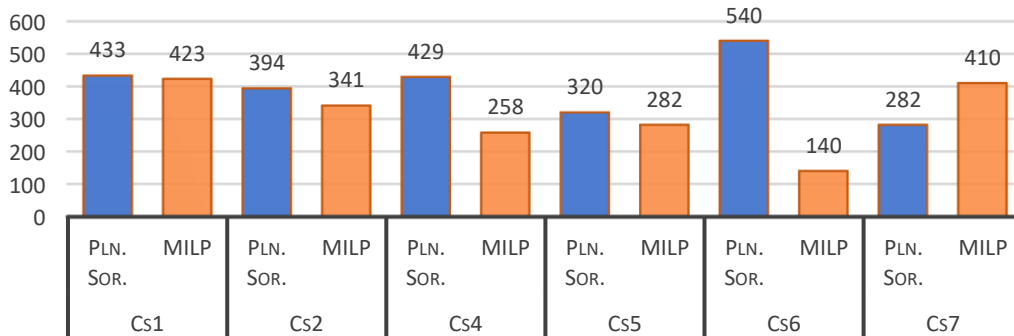
Toplam set sayısı (Şekil 5.2), toplam fire miktarı (Şekil 5.3) ve amaç fonksiyonu değeri (Şekil 5.4) karşılaştırmaları detaylı olarak aşağıdaki grafiklerde görselleştirilmiştir.

### Toplam Set Sayısı



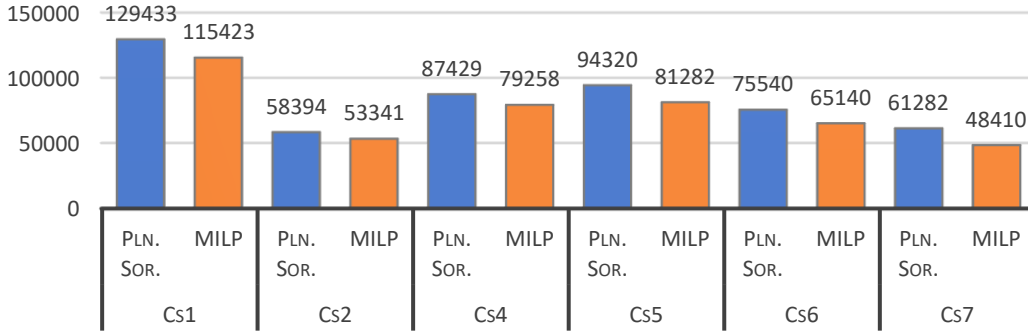
Şekil 5.2: GHVÇ problemlerinin sonuçlarının toplam set sayısı açısından karşılaştırılması.

### Toplam Fire Miktarı



Şekil 5.3: GHVÇ problemlerinin sonuçlarının toplam fire miktarı açısından karşılaştırılması.

## Amaç Fonksiyonu Değeri

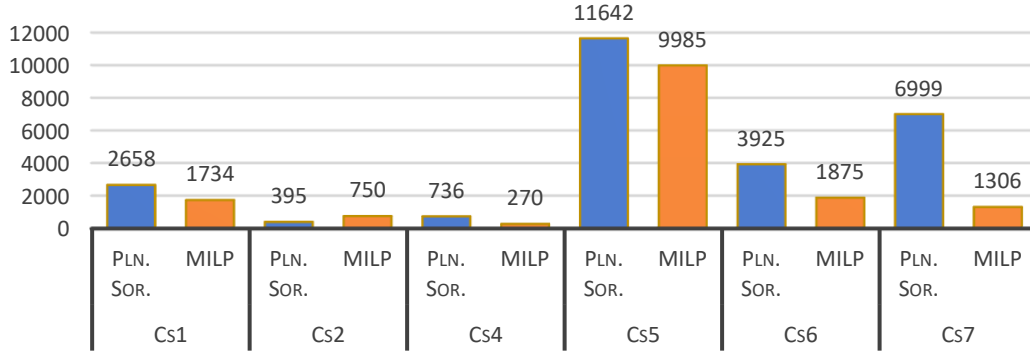


**Şekil 5.4:** GHVÇ problemlerinin amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırması.

Amaç fonksiyonunu oluşturan iki terimden ilki olan toplam set sayısı değişkeninin ağırlığı olan  $\omega_1$  parametresi, diğer kısıt olan toplam fire miktarının ağırlığı  $\omega_2$ 'den yüksek belirlendiği için yani başka bir ifadeyle, sipariş yoğun dönemlerde toplam set sayısı ölçütü toplam fire miktarı ölçütüne göre önceliklendirildiği için amaç fonksiyonu değerleri toplam set sayısına göre belirlenmiştir. Örneğin Cs7 nolu örnek problem incelendiğinde, planlama sorumlusu toplam set sayısı olarak 61 set, toplam fire miktarı olarak ise 282 cm amaç fonksiyonu değerlerini elde ederken, geliştirilen model ise toplam fire miktarından ziyade toplam set sayısını önceliklendirdiği için toplam set sayısı olarak 48, toplam fire miktarı olarak da 410 değerini elde etmiştir. Çözüm bulunan diğer problemlerde ise geliştirilen model sayesinde hem toplam set sayısı hem de toplam fire miktarında mevcut duruma göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

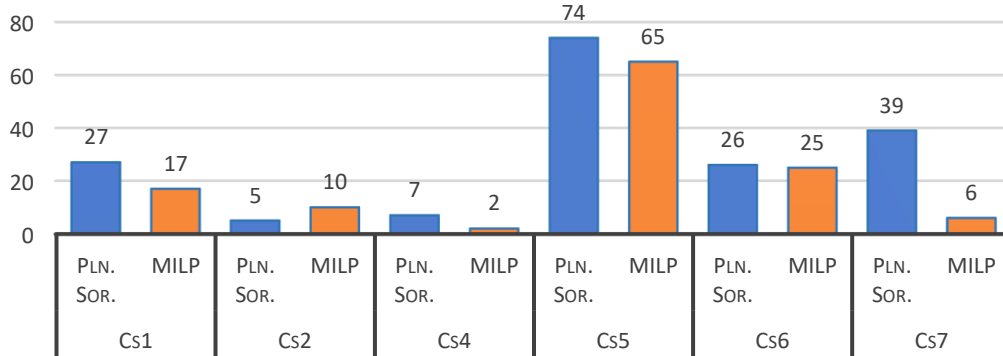
Modelde doğrudan kullanılmayan yani amaç fonksiyonunda yer almayan fakat raporlama amacıyla incelenen joker bobin kullanımı ile ilgili karşılaştırmalar ise Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.

### Joker Bobin Miktar (cm)



Şekil 5.5: GHVÇ problemlerinin joker bobin miktar (cm) karşılaştırması.

### Joker Bobin Miktar (adet)



Şekil 5.6: GHVÇ problemlerinin joker bobin miktar (kg) karşılaştırması.

Toplam kullanılan joker bobin miktarı (cm ve adet) karşılaştırması şekilleri incelendiğinde, mevcut planlamaya göre modelde daha az joker bobin kullanımı gerçekleştiği görülmektedir. Amaç fonksiyonunda joker bobin kullanımı ile ilgili bir kısıt yer almamasına rağmen, modelde toplam set sayısı minimize edildiği için joker bobin kullanımı da dolaylı olarak daha az gerçekleşmektedir.

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada stok kesme problemlerinin bir türü olan kağıt üretim endüstrisindeki rulo kesme problemleri ele alınmış ve sektördeki bir uygulama üzerinden kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışma özellikle büyük ölçekli üretim ortamlarında malzeme israfını azaltma ve üretim süreçlerindeki kesim planlamasını optimize etme ihtiyacına odaklanmıştır. Literatürde yaygın bir optimizasyon problemi olarak ele alınan rulo kesme problemleri, kombinatorial yapısı ve çok boyutlu parametreleri nedeniyle çözüm süreçlerinde zorluklar barındırmaktadır.

Araştırma kağıt üretimi sonucu gerçekleşen büyük rulolardan (tampon), müşteri siparişlerinin alındığı küçük rulolar (bobin) elde edilebilmesi için yapılan kesim planlaması süreçlerinde ortaya çıkan rulo kesme problemlerini ele almakta ve bu problemler için karar destek sistemi geliştirme hedefiyle matematiksel model önermektedir. Geliştirilen matematiksel model Python programlama dilinde kodlanarak, Gurobi çözücüsü yardımıyla, kullanılan ana malzeme (toplam set sayısı) ve fire miktarını azaltmaya yönelik çözümler üretmektedir. Çalışma kağıt endüstrisinin üretim planlamasında hem verimlilik hem de müşteri taleplerini karşılamada esneklik sağlayarak sektörel katkı sunmaktadır. Model, farklı genişlik (en) ve miktarlardaki siparişlerin karşılanması için çeşitli kombinasyonlar sunarak toplam set sayısı ve fire miktarını azaltmaktadır. Zamanla değişebilen sektörel ihtiyaçlar ve farklı hedefler doğrultusunda, ayarlanabilir parametreler ve amaç fonksiyonun farklılaştırılabilir olması sebebiyle üretim prosesine büyük esneklikler sağlamaktadır. Hali hazırda Excel ortamında yapılan ve hatalara olanak sağlayan kesim planlaması, geliştirilen model ve program sayesinde Bölüm 3.3'te detayları paylaşılan bir çok konuda üretim tesisine faydalar getirmiştir. Ayrıca joker (yardımcı) bobinlerin belirlenmesi ve bunların daha az miktarda stoklanarak gelecekteki taleplere adapte edilmesi, modelin pratik kullanımını artırmaktadır.

Kağıt üretim sektöründe üretim prosesinin bir parçası olan kesim planlamasında optimum çözüm ihtiyacından ziyade, değişebilen koşullara hızlı uyum sağlayabilmek ve optimuma yakın değerler elde etmek için esnek hareket kabiliyeti daha önemli görülmektedir. Sebebi ise kesim planlaması dinamik bir üretim ortamında gerçekleşir ve değişen koşullara hızlı uyum sağlayabilen esnek çözümler, teorik olarak en iyi sonucu hedefleyen ancak pratikte uygulanması zor olan optimum çözümlerden daha değerlidir. Esnek planlama; hız, maliyet,

müşteri memnuniyeti ve operasyonel etkinlik açısından daha büyük fayda sağlar. Tez kapsamında geliştirilen model küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerde optimum veya optimuma yakın sonuçlar elde ederken, çok büyük boyutlu bazı problemlerde yüksek çözüm sürelerine ihtiyaç duyabilmektedir. Gelecek çalışmalarda çok büyük boyutlu bazı problemlerde daha etkili sonuçlar elde etmek ve çözüm sürelerini iyileştirebilmek için meta-sezgisel algoritmaların geliştirilmesi ve bu tezde sunulan sonuçlarla karşılaştırılması hedeflenmektedir. Ek olarak programın üretim-kesim planlama prosesinde verimli bir şekilde kullanılabilmesi için görsel uygulamalarla desteklenmesi düşünülmektedir.

Matematiksel modelin performansını artırmak için çözüm uzayını daraltacak veya simetrik çözümleri önleyecek kısıtlar eklenebilir. Özellikle modelin çözüm hızını artırmak amacıyla Gurobi tarafından başlangıç çözümü olarak kullanılabilen uygun çözümlerin programda kullanılması (Warm Start) önemli bir gelişim sağlayabilir.

Bu çalışma kağıt üretimindeki rulo kesme problemlerine yönelik akademik literatüre katkı sunmayı hedeflerken, aynı zamanda endüstriyel uygulamalar için somut ve uygulanabilir bir çözüm önermektedir. Esnek planlama, fire kaybının azaltılması, yardımcı bobin kullanımı, personel hatalarının önlenmesi, daha az stoğa üretim gibi maliyet azaltma konularında sağlanan faydalar, modelin sektördeki uygulanabilirliğini artırmaktadır. Ayrıca teze konu olan kağıt üretim tesisinin bir parçası olması düşünülen ve çok boyutlu stok kesme problemi içerecek olan kutu fabrikasının kesim planlama faaliyetlerine de bilgi birikimi (know-how) sağlanacaktır.

## 7. KAYNAKLAR

- Adakcı, S. (2010). Stok Kesme Problemi ve Alüminyum Sektöründe Uygulaması (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 293958).
- Albayrak, E. (2013). İki Boyutlu Dikdörtgen Şekilli Stok Kesme Problemleri İçin Sezgisel-Metasezgisel Algoritma ve Yazılım Geliştirme (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 324658).
- Altürk, D. (2019). Bir Boyutlu Çok Amaçlı Kesme Problemlerinin Modellenmesi ve Çözüm Yaklaşımları (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 587894).
- Bayır, F. (2012). Kesme Problemine Sezgisel Bir Yaklaşım (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 340464).
- Bellman, R.E. (1957). *Dynamic Programming*, Princeton University Press.
- Bitrak, O.O. (2023). Türkiye Kağıt Sanayisinde Selüloz İthalatı, *Alanya Akademik Bakış Dergisi*, 2-15.
- Campello, B.S.C., Olivera, W. A., Ayres, A.O.C. and Ghidini, C. T. L. S. (2017). Lot sizing problem integrated with cutting stock problem in a paper industry: a multiobjective approach, *Pesquisa Operacional*, ResearchGate, 41, 1-13
- Chauhan, S.S., Martel, A. and D'amour, S. (2008). Roll assortment optimization in a paper mill: An integer programming approach. *Comput. Oper. Res.* 2008, 35, 614–627.
- Cherri, A.C., Arenales, M.N. and Yanasse, H.H. (2009). The one-dimensional cutting stock problem with usable leftover–A heuristic approach., *Eur. J. Oper. Res.*, 196, 897–908.
- Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. and Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms* (3rd ed.), MIT Press.
- Correia, M.H., Oliveira, J.F. and Ferreira, J.S. (2004). Reel and sheet cutting at a paper mill. *Comput. Oper. Res.* 2004, 31.

- Dagli, C.H., Tatoglu M.Y. (1986). An approach to two-dimensional cutting stock problems. *International Journal of Production Research*, 25, 175-190
- Demirarslan, K.O. ve Başak, S. (2021). Kamu kurumları için sıfır atık kapsamında atık kâğıt envanter çalışması, *Güfbed/Gustij Araştırma Makalesi*, 11(4), 1208-1216). DOI: 10.17714/gumusfenbil.877604
- Dyckhoff, H. (1990). A Typology of Cutting and Packing Problems, *European Journal of Operational Research*, 44(2), 145-159.
- Ergün, K. (2004). Kesme ve Paketleme Problemleri ve Araştırmaya Yönelik Bir Metot Geliştirilmesi ve Bu Metodun Etkinliğinin Sınanması (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 149871).
- Fairee, S. (2020). Trim Loss Optimization in Paper Production Using Reinforcement Artificial Bee Colony, *Computer Science IEEE Access*, 8, 130647–130660.
- Ferreira, J.S., Neves M.A. and Castro P.F. (1990). A two-phase roll cutting problem, *European Journal of Operational Research*, 44 (2), 185-196.
- Garey, M.R. and Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness* San Francisco: Freeman.
- Gilmore, P.C. and Gomory, R.E. (1961). A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem; Part I, *Operations Research*, 9(6), 849-859.
- Gilmore, P.C. and Gomory, R.E. (1963). A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem; Part II, *Operations Research*, 11, 863-888.
- Gilmore, P.C. and Gomory, R.E. (1964). Multistage Cutting Stock Problems of Two and More Dimensions, *Operations Research*, 13, 94–120.
- Glover, F. and Kochenberger, G.A. (2003). *Handbook of Metaheuristics*. Springer.
- Goulimis, C. (1990). Optimal solutions for the cutting stock problem, *European Journal of Operational Research*, 44:197-208.
- Gradisar, M., Jesenko, J. and Resinovic, G. (1997). Optimization of roll cutting in clothing industry, *Computers & Operations Research*, 24(10), 945-953.

- Gümüş, G. (2012). Dikdörtgen Şekilli Malzeme Kesme Problemleri İçin Genetik Algoritma Tabanlı Çok Ölçütlü Bir Çözüm Yaklaşımı (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 310332).
- Haessler, R.W. (1979). Solving the two-stage cutting stock problem, *Omega* 7 (2), 145-151 (1979).
- Hinterding, R. and Khan, L. (1995). Genetic algorithms for cutting stock problems: With and without contiguity *Progress in Evolutionary Computation, Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 2-24
- Hoffman, K. and Padberg, M.W. (1993). Solving airline crew scheduling problems by branch and cut. *Management Sci* 39:657–682.
- Iori, M., Lima, V., Miyazawa, F.K., Martello, S. and Monaci, M. (2004). Exact Solution Techniques for Two-dimensional Cutting and Packing, <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2004.12619>.
- Johnson, M.P., Rennick, C. and Zak, E. (1997). Case Studies from Industry: Skiving Addition to the Cutting Stock Problem in the Paper Industry, <https://doi.org/10.1137/S003614459531004X>
- Kantorovich, L.V. (1960). Mathematical Methods of Organizing and Planning Production, *Management Science*, 6(4), 366–422.
- Khan, R., Pruncu, C. and Khan, A.S. (2020). A Mathematical Model for Reduction of Trim Loss in Cutting Reels at a Make-to-Order Paper Mill, *Appl. Sci.* 10, 5274.
- Keskinocak, P., Wu, F., Goodwin, R., Murthy, S. and Akkiraju, R.I (2001). Scheduling Solutions for the Paper Industry, *Institute for Operations Research and the Management Sciences, Operations Research*, 50(2):249-259.
- Köksal, Ö. (2024). Tek Boyutlu Stok Kesme Problemi Üzerine Hibrit Bir Çözüm Yaklaşımı (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 856558).
- Lodi, A., Martello, S. and Vigo, D. (2002). Heuristic Algorithms for the Three Dimensional Bin Packing Problem, *European Journal of Operational Research*, 141, 410-420.

- Lodi, A., Martello, S. and Monaci, M. (2002). Two- dimensional packing problems: A survey, *European Journal of Operational Research*, 141(2), 241-252.
- Menon, S. and Schrage, L. (2002). Order allocation for stock cutting in the paper industry. *Operations Research*, 50:324-332.
- Mısır, A. ve Arıkan, O .A. (2022). Avrupa ve Türkiye’de Sıfır Atık Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, İTÜ Dergisi-e*, 1(1) 69–78,
- Ogunranti, G.A. and Oluleye, A. (2016). Minimizing Waste (Off-Cuts) Using Cutting Stock Model: The Case of One Dimensional Cutting Stock Problem in Wood Working Industry, *Journal of Industrial Engineering and Management, Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(3), 834-859.
- Onursal, F.S. (2015). Kesme Ve Paketleme Problemleri Üzerine Bir İnceleme, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimleri Dergisi*, 28, 165-182.
- Poltroniere, S.C., Araujo, S.A. and Poldi, K.C. (2016). Optimization of an Integrated Lot Sizing and Cutting Stock Problem in the Paper Industry, *Tendencias em Matematica Aplicada e Computacional*, N.3, 305-320.
- Pierce, JF. (1964). *Some large-scale production scheduling problems in the paper industry.* EnglewoodCliffs (N.J.): Prentice Hall.
- Pierce, JF. (1970). Pattern sequencing and matching in stock cutting operations. *Tappi*, 53:668-678.
- Scheithauer, G. (1991). A note on handling residual length optimization, 22: 461–466.
- Scheithauer, G. and Terno, J. (1995). The modified integer round-up property of the onedimensional cutting stock problem, *European J. Oper. Res.*, 84, 562–571.
- Soygüder, A. (2024). Türkiye’nin Kâğıt ve Atık Kâğıt Dış Ticaretinin Pandemi ile Döviz Kuru Oynaklığı Etkenleri İlişkisinde Araştırılması, *Biga İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5-1,1-20.
- Sweeney, P.E. and Haessler, R.W. (1990). One dimensional cutting stock decisions for rolls with multiple quality grades, *European Journal of Operations Research* 44 (2), 224-231.

- Tanır, D., Uğurlu, O., Nuriyev, U. ve Kapar, M. (2018). Birleşik Stok Kesme ve Patern Sıralama Problemi için Bir Sezgisel Algoritma, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22/1, 300-305.
- Tanir, D., Ugurlu, O., Guler, A. and Nuriyev, U. (2019). One-dimensional cutting stock problem with divisible items: A case study in steel industry, TWMS J. Appl. Eng. Math., 9, 473–484.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2024). Kâğıt üretimi sektörel uygulama kılavuzu, 3-12.
- T.C. İstanbul Sanayi Odası (2018). Kağıt Sektörü Raporu. 10-21.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2021). Kağıt Sektör Raporu, 5-32.
- Wagner, B.J. (1999). A Genetic Algorithm Solution for One-Dimensional Bundled Stock Cutting, European Journal of Operational Research, 117, 368-381.
- Wäscher, G. and Gau, T. (1996). Heuristics for the Integer one-dimensional Cutting Stock Problem: A Computational Study, Operations Research Spektrum, 18(3), 131-144.
- Wäscher, G., Haubner, H. and Schumann, H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems, European Journal of Operational Research, 183, 1109–1130.
- Scopus (2024). (arama ifadeleri: cutting stock problem, one dimensional cutting stock problem, Roll cutting stock problem).
- Westerlund, T., Jonhny, I. and Harjunkoski I. (1998). Solving a two-dimensional trim-loss problem with MILP, European Journal of Operational Research, 104, 572 – 581.
- Wikipedia, (2024). CSP : [https://en.wikipedia.org/wiki/Cutting\\_stock\\_problem](https://en.wikipedia.org/wiki/Cutting_stock_problem)
- Yanasse, H.H. and Limeira, M.S. (2006). A hybrid heuristic to reduce the number of different patterns in cutting stock problems. Computers & Operations Research, 33:2744-2756.
- Yavuz, Y. (2005). Üç Boyutlu Stok Kesme Probleminin Matematiksel Programlama Teknikleri İle Çözümü ve Mermer Endüstrisinde Bir Uygulama (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 186468).

Zak, EJ. (2002). Modeling multistage cutting stock problems., *European Journal of Operational Research*, 141:313-327.

Zak, EJ. (2002). Row and column generation technique for a multistage cutting stock problem., *Computers & Operations Research*, 29:1143-1156.

# EKLER

## EKLER

### EK A: Deneysel Test Verileri

Son sütunda yer alan “Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)” bilgileri sipariş indekslerine bağlı olmayıp ilgili problem için bütünsel olarak değerlendirilmesi gerekir.

**Tablo A.1:** Deneysel Test Ex1 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex1	FLT, 130GR	1	243	12.500	5,14	143
	FLT, 130GR	2	250	12.500	5,00	153
	FLT, 130GR	3	162	16.000	9,88	163

**Tablo A.2:** Deneysel Test Ex2 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex2	FLT, 080GR	1	243	26.500	10,91	153
	FLT, 080GR	2	253	12.000	4,74	163
	FLT, 080GR	3	182	12.000	6,59	143

**Tablo A.3:** Deneysel Test Ex3 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex3	FLT, 080GR	1	243	30.000	12,35	153
	FLT, 080GR	2	253	10.000	3,95	163
	FLT, 080GR	3	182	14.600	8,02	143

**Tablo A.4:** Deneysel Test Ex4 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex4	FLT, 080GR	1	243	20.000	8,23	143
	FLT, 080GR	2	253	10.000	3,95	153
	FLT, 080GR	3	95	9.500	10,00	163
	FLT, 080GR	4	182	3.600	1,98	173

**Tablo A.5:** Deneysel Test Ex5 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex5	ETL, 090GR	1	213	15.000	7,04	143
	ETL, 090GR	2	223	18.000	8,07	153
	ETL, 090GR	3	233	16.500	7,08	163
	ETL, 090GR	4	102	4.020	3,94	173

**Tablo A.6:** Deneysel Test Ex6 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex6	FLT, 080GR	1	243	48.600	20,00	143
	FLT, 080GR	2	123	7.600	6,18	153
	FLT, 080GR	3	220	2.200	1,00	163
	FLT, 080GR	4	172	1.720	1,00	173

**Tablo A.7:** Deneysel Test Ex7 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex7	HP ETL, 130GR	1	143	5.600	3,92	143
	HP ETL, 130GR	2	172	8.500	4,94	153
	HP ETL, 130GR	3	163	25.000	15,34	163
	HP ETL, 130GR	4	132	8.000	6,06	173

**Tablo A.8:** Deneysel Test Ex8 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex8	KRAFT, 110GR	1	205	14.790	7,21	143
	KRAFT, 110GR	2	220	11.000	5,00	153
	KRAFT, 110GR	3	250	10.000	4,00	163
	KRAFT, 110GR	4	240	9.600	4,00	173
	KRAFT, 110GR	5	173	5.500	3,18	183
	KRAFT, 110GR	6	75	5.200	6,93	

**Tablo A.9:** Deneysel Test Ex9 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex9	FLT, 080GR	1	243	17.000	7,00	143
	FLT, 080GR	2	253	12.500	4,94	153
	FLT, 080GR	3	182	11.000	6,04	163
	FLT, 080GR	4	95	8.500	8,95	173
	FLT, 080GR	5	102	3.000	2,94	183
	FLT, 080GR	6	123	5.000	4,07	

**Tablo A.10:** Deneysel Test Ex10 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex10	HP FLT, 140GR	1	195	19.500	10,00	143
	HP FLT, 140GR	2	190	19.000	10,00	153
	HP FLT, 140GR	3	205	14.500	7,07	163
	HP FLT, 140GR	4	102	5.100	5,00	173
	HP FLT, 140GR	5	95	3.800	4,00	183
	HP FLT, 140GR	6	75	2.250	3,00	

**Tablo A.11:** Deneysel Test Ex11 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex11	HP ETL, 080GR	1	225	36.000	16,00	143
	HP ETL, 080GR	2	245	35.000	14,29	153
	HP ETL, 080GR	3	205	12.500	6,10	163
	HP ETL, 080GR	4	123	6.500	5,28	173
	HP ETL, 080GR	5	113	5.500	4,87	183
	HP ETL, 080GR	6	103	4.000	3,88	

**Tablo A.12:** Deneysel Test Ex12 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex12	FLT, 080GR	1	162	41.000	25,31	143
	FLT, 080GR	2	182	16.500	9,07	153
	FLT, 080GR	3	112	7.750	6,92	163
	FLT, 080GR	4	230	16.000	6,96	173
	FLT, 080GR	5	202	6.084	3,01	183
	FLT, 080GR	6	152	1.600	1,05	

**Tablo A.13:** Deneysel Test Ex13 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex13	ETL, 080GR	1	153	15.500	10,13	143
	ETL, 080GR	2	183	15.016	8,21	153
	ETL, 080GR	3	143	17.300	12,10	163
	ETL, 080GR	4	123	9.890	8,04	173
	ETL, 080GR	5	133	14.500	10,90	183
	ETL, 080GR	6	173	10.000	5,78	

**Tablo A.14:** Deneysel Test Ex14 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex14	KRAFT, 110GR	1	225	20.050	8,91	143
	KRAFT, 110GR	2	250	15.000	6,00	153
	KRAFT, 110GR	3	185	16.500	8,92	163
	KRAFT, 110GR	4	200	16.500	8,25	173
	KRAFT, 110GR	5	215	17.000	7,91	190
	KRAFT, 110GR	6	240	15.000	6,25	
	KRAFT, 110GR	7	235	12.000	5,11	
	KRAFT, 110GR	8	230	7000	3,04	

**Tablo A.15:** Deneysel Test Ex15 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex15	FLT, 100GR	1	82	9.000	10,98	153
	FLT, 100GR	2	72	7.446	10,34	143
	FLT, 100GR	3	87	9.000	10,34	163
	FLT, 100GR	4	92	8.200	8,91	173
	FLT, 100GR	5	102	7.200	7,06	183
	FLT, 100GR	6	122	7.600	6,23	
	FLT, 100GR	7	112	2300	2,05	
	FLT, 100GR	8	113	1130	1,00	

**Tablo A.16:** Deneysel Test Ex16 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex16	HP ETL, 100GR	1	132	16.000	12,12	143
	HP ETL, 100GR	2	113	15.000	13,27	153
	HP ETL, 100GR	3	122	12.000	9,84	163
	HP ETL, 100GR	4	102	10.000	9,80	173
	HP ETL, 100GR	5	180	7000	3,89	183
	HP ETL, 100GR	6	152	5000	3,29	
	HP ETL, 100GR	7	162	5000	3,09	
	HP ETL, 100GR	8	185	5400	2,92	

**Tablo A.17:** Deneysel Test Ex17 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex17	HP ETL, 080GR	1	245	25.000	10,20	143
	HP ETL, 080GR	2	225	22.000	9,78	153
	HP ETL, 080GR	3	153	16.000	10,46	163
	HP ETL, 080GR	4	205	15.000	7,32	173
	HP ETL, 080GR	5	123	8.800	7,15	183
	HP ETL, 080GR	6	230	11.600	5,04	
	HP ETL, 080GR	7	143	7.500	5,24	
	HP ETL, 080GR	8	133	6.500	4,89	

**Tablo A.18:** Deneysel Test Ex18 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex18	HP ETL, 110GR	1	250	40.000	16,00	143
	HP ETL, 110GR	2	240	25.000	10,42	153
	HP ETL, 110GR	3	220	20.000	9,09	163
	HP ETL, 110GR	4	190	10.000	5,26	173
	HP ETL, 110GR	5	200	10.000	5,00	183
	HP ETL, 110GR	6	215	7.000	3,26	
	HP ETL, 110GR	7	180	9000	5,00	
	HP ETL, 110GR	8	230	7500	3,26	
	HP ETL, 110GR	9	205	6000	2,93	

**Tablo A.19:** Deneysel Test Ex19 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex19	HP ETL, 135GR	1	250	35.000	14,00	143
	HP ETL, 135GR	2	180	22.000	12,22	163
	HP ETL, 135GR	3	210	17.000	8,10	173
	HP ETL, 135GR	4	225	11.500	5,11	183
	HP ETL, 135GR	5	240	12.000	5,00	90
	HP ETL, 135GR	6	185	9.300	5,03	
	HP ETL, 135GR	7	200	10000	5,00	
	HP ETL, 135GR	8	215	8800	4,09	
	HP ETL, 135GR	9	72	3600	5,00	

**Tablo A.20:** Deneysel Test Ex20 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex20	HP ETL, 100GR	1	172	30.000	17,44	143
	HP ETL, 100GR	2	132	20.000	15,15	153
	HP ETL, 100GR	3	122	12.200	10,00	163
	HP ETL, 100GR	4	175	11.000	6,29	173
	HP ETL, 100GR	5	112	5.800	5,18	183
	HP ETL, 100GR	6	102	5100	5,00	
	HP ETL, 100GR	7	183	4000	2,19	
	HP ETL, 100GR	8	180	3600	2,00	
	HP ETL, 100GR	9	185	3600	1,95	

**Tablo A.21:** Deneysel Test Ex21 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex21	KRAFT, 135GR	1	250	95.124	38,05	143
	KRAFT, 135GR	2	185	65.000	35,14	153
	KRAFT, 135GR	3	210	32.000	15,24	163
	KRAFT, 135GR	4	225	30.000	13,33	173
	KRAFT, 135GR	5	190	25.000	13,16	183
	KRAFT, 135GR	6	200	22.000	11,00	
	KRAFT, 135GR	7	240	15.000	6,25	
	KRAFT, 135GR	8	215	12.800	5,95	
	KRAFT, 135GR	9	230	11.500	5,00	
	KRAFT, 135GR	10	235	7000	2,98	
	KRAFT, 135GR	11	122	2500	2,05	
	KRAFT, 135GR	12	132	2650	2,01	

**Tablo A.22:** Deneysel Test Ex22 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex22	KRAFT, 110GR	1	250	100.032	40,01	143
	KRAFT, 110GR	2	185	33.600	18,16	153
	KRAFT, 110GR	3	200	40.000	20,00	163
	KRAFT, 110GR	4	215	32.872	15,29	173
	KRAFT, 110GR	5	210	32.000	15,24	183
	KRAFT, 110GR	6	225	27.000	12,00	
	KRAFT, 110GR	7	240	22000	9,17	
	KRAFT, 110GR	8	132	15000	11,36	
	KRAFT, 110GR	9	122	15000	12,30	
	KRAFT, 110GR	10	112	10000	8,93	
	KRAFT, 110GR	11	235	10000	4,26	
	KRAFT, 110GR	12	245	10000	4,08	

**Tablo A.23:** Deneysel Test Ex23 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex23	HP ETL, 120GR	1	153	85.000	55,56	143
	HP ETL, 120GR	2	205	38.818	18,94	153
	HP ETL, 120GR	3	195	30.000	15,38	163
	HP ETL, 120GR	4	230	30.000	13,04	173
	HP ETL, 120GR	5	190	25.000	13,16	183
	HP ETL, 120GR	6	240	24.000	10,00	
	HP ETL, 120GR	7	200	20.000	10,00	
	HP ETL, 120GR	8	210	21.000	10,00	
	HP ETL, 120GR	9	212	21.000	9,91	
	HP ETL, 120GR	10	213	15.000	7,04	
	HP ETL, 120GR	11	204	16.500	8,09	
	HP ETL, 120GR	12	202	10.000	4,95	
	HP ETL, 120GR	13	218	11.000	5,05	
	HP ETL, 120GR	14	220	11.000	5,00	
	HP ETL, 120GR	15	245	10.000	4,08	

**Tablo A.24:** Deneysel Test Ex24 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex24	HP ETL, 115GR	1	225	40.000	17,78	143
	HP ETL, 115GR	2	185	40.000	21,62	153
	HP ETL, 115GR	3	250	40.000	16,00	163
	HP ETL, 115GR	4	200	40.000	20,00	173
	HP ETL, 115GR	5	245	40.000	16,33	183
	HP ETL, 115GR	6	210	40.000	19,05	
	HP ETL, 115GR	7	240	22.000	9,17	
	HP ETL, 115GR	8	215	15.000	6,98	
	HP ETL, 115GR	9	230	14.500	6,30	
	HP ETL, 115GR	10	235	14.500	6,17	
	HP ETL, 115GR	11	138	14.000	10,14	
	HP ETL, 115GR	12	143	4.500	3,15	
	HP ETL, 115GR	13	148	4500	3,04	
	HP ETL, 115GR	14	153	4500	2,94	
	HP ETL, 115GR	15	190	4000	2,11	

**Tablo A.25:** Deneysel Test Ex25 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex25	HP ETL, 135GR	1	243	80.000	32,92	143
	HP ETL, 135GR	2	225	50.000	22,22	153
	HP ETL, 135GR	3	200	40.000	20,00	163
	HP ETL, 135GR	4	185	40.000	21,62	173
	HP ETL, 135GR	5	210	35.000	16,67	183
	HP ETL, 135GR	6	220	30.000	13,64	
	HP ETL, 135GR	7	205	22.500	10,98	
	HP ETL, 135GR	8	235	14.000	5,96	
	HP ETL, 135GR	9	215	13.000	6,05	
	HP ETL, 135GR	10	143	13.000	9,09	
	HP ETL, 135GR	11	153	12.500	8,17	
	HP ETL, 135GR	12	163	11.500	7,06	
	HP ETL, 135GR	13	240	5.000	2,08	
	HP ETL, 135GR	14	245	5.000	2,04	
	HP ETL, 135GR	15	250	5.000	2,00	

**Tablo A.26:** Deneysel Test Ex26 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex26	HP ETL, 135GR	1	243	80.000	32,92	143
	HP ETL, 135GR	2	200	70.000	35,00	153
	HP ETL, 135GR	3	245	35.000	14,29	163
	HP ETL, 135GR	4	185	35.000	18,92	173
	HP ETL, 135GR	5	235	30.000	12,77	183
	HP ETL, 135GR	6	250	30.000	12,00	
	HP ETL, 135GR	7	210	25.000	11,90	
	HP ETL, 135GR	8	173	25.000	14,45	
	HP ETL, 135GR	9	180	25.000	13,89	
	HP ETL, 135GR	10	205	20000	9,76	
	HP ETL, 135GR	11	220	18000	8,18	
	HP ETL, 135GR	12	225	14000	6,22	
	HP ETL, 135GR	13	240	5000	2,08	
	HP ETL, 135GR	14	122	5000	4,10	
	HP ETL, 135GR	15	132	5200	3,94	

**Tablo A.27:** Deneysel Test Ex27 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex27	FLT, 080GR	1	243	100.000	41,15	143
	FLT, 080GR	2	250	70.000	28,00	153
	FLT, 080GR	3	183	37.000	20,22	163
	FLT, 080GR	4	120	35.000	29,17	173
	FLT, 080GR	5	153	34.000	22,22	183
	FLT, 080GR	6	123	21.000	17,07	
	FLT, 080GR	7	132	16.000	12,12	
	FLT, 080GR	8	122	13.500	11,07	
	FLT, 080GR	9	143	13.000	9,09	
	FLT, 080GR	10	163	13.000	7,98	
	FLT, 080GR	11	162	13.000	8,02	
	FLT, 080GR	12	113	6.700	5,93	
	FLT, 080GR	13	182	5600	3,08	
	FLT, 080GR	14	202	4000	1,98	
	FLT, 080GR	15	233	2528	1,08	
	FLT, 080GR	16	220	2200	1,00	
	FLT, 080GR	17	253	2500	0,99	
	FLT, 080GR	18	172	1720	1,00	

**Tablo A.28:** Deneysel Test Ex28 Problem Verisi.

<b>Problem No</b>	<b>Ürün Adı</b>	<b>Sipariş İndeksi</b>	<b>Bobin Eni (cm)</b>	<b>Talep (kg)</b>	<b>Bobin Sayısı (adet)</b>	<b>Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)</b>
<b>ProbID</b>		<b><math>i</math></b>	<b><math>s_i</math></b>	<b><math>b_i</math></b>	<b><math>d_i</math></b>	<b><math>joker_r</math></b>
Ex28	HP FLT, 125GR	1	200	61.415	30,71	143
	HP FLT, 125GR	2	210	57.500	27,38	153
	HP FLT, 125GR	3	185	50.000	27,03	163
	HP FLT, 125GR	4	250	52.500	21,00	173
	HP FLT, 125GR	5	225	48.000	21,33	183
	HP FLT, 125GR	6	245	44.000	17,96	
	HP FLT, 125GR	7	235	28.000	11,91	
	HP FLT, 125GR	8	230	27.500	11,96	
	HP FLT, 125GR	9	240	22.500	9,38	
	HP FLT, 125GR	10	183	15.000	8,20	
	HP FLT, 125GR	11	143	14.500	10,14	
	HP FLT, 125GR	12	173	12.000	6,94	
	HP FLT, 125GR	13	132	12.000	9,09	
	HP FLT, 125GR	14	153	12.000	7,84	
	HP FLT, 125GR	15	163	12.000	7,36	
	HP FLT, 125GR	16	215	8.800	4,09	
	HP FLT, 125GR	17	102	4.000	3,92	
	HP FLT, 125GR	18	112	4.400	3,93	

**Tablo A.29:** Deneysel Test Ex29 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex29	HP FLT, 120GR	1	240	104.200	43,42	143
	HP FLT, 120GR	2	205	86.000	41,95	153
	HP FLT, 120GR	3	250	87.332	34,93	163
	HP FLT, 120GR	4	220	80.000	36,36	173
	HP FLT, 120GR	5	175	60.370	34,50	183
	HP FLT, 120GR	6	180	38.388	21,33	
	HP FLT, 120GR	7	185	20.000	10,81	
	HP FLT, 120GR	8	139	14.000	10,07	
	HP FLT, 120GR	9	105	10000	9,52	
	HP FLT, 120GR	10	102	9.000	8,82	
	HP FLT, 120GR	11	105	10000	9,52	
	HP FLT, 120GR	12	183	7200	3,93	
	HP FLT, 120GR	13	213	6600	3,10	
	HP FLT, 120GR	14	112	3300	2,95	
	HP FLT, 120GR	15	145	3000	2,07	
	HP FLT, 120GR	16	132	2700	2,05	
	HP FLT, 120GR	17	122	2500	2,05	
	HP FLT, 120GR	18	95	1900	2,00	
	HP FLT, 120GR	19	85	850	1,00	

**Tablo A.30:** Deneysel Test Ex30 Problem Verisi.

<b>Problem No</b>	<b>Ürün Adı</b>	<b>Sipariş İndeksi</b>	<b>Bobin Eni (cm)</b>	<b>Talep (kg)</b>	<b>Bobin Sayısı (adet)</b>	<b>Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)</b>
<b>ProbID</b>		<b><i>i</i></b>	<b><i>s<sub>i</sub></i></b>	<b><i>b<sub>i</sub></i></b>	<b><i>d<sub>i</sub></i></b>	<b><i>joker<sub>r</sub></i></b>
Ex30	HP ETL, 135GR	1	243	79.860	32,86	143
	HP ETL, 135GR	2	185	51.000	27,57	153
	HP ETL, 135GR	3	200	47.406	23,70	163
	HP ETL, 135GR	4	132	47.000	35,61	173
	HP ETL, 135GR	5	225	43.932	19,53	183
	HP ETL, 135GR	6	122	35.000	28,69	
	HP ETL, 135GR	7	235	35.000	14,89	
	HP ETL, 135GR	8	85	34.000	40,00	
	HP ETL, 135GR	9	215	20.000	9,30	
	HP ETL, 135GR	10	94	20.000	21,28	
	HP ETL, 135GR	11	245	10.000	4,08	
	HP ETL, 135GR	12	250	10.000	4,00	
	HP ETL, 135GR	13	109	10.000	9,17	
	HP ETL, 135GR	14	84	8.476	10,09	
	HP ETL, 135GR	15	124	6.300	5,08	
	HP ETL, 135GR	16	75	5.300	7,07	
	HP ETL, 135GR	17	112	4.500	4,02	
	HP ETL, 135GR	18	104	4.100	3,94	

**Tablo A.31:** Deneysel Test Ex31 Problem Verisi.

<b>Problem No</b>	<b>Ürün Adı</b>	<b>Sipariş İndeksi</b>	<b>Bobin Eni (cm)</b>	<b>Talep (kg)</b>	<b>Bobin Sayısı (adet)</b>	<b>Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)</b>
<b>ProbID</b>		<b><math>i</math></b>	<b><math>s_i</math></b>	<b><math>b_i</math></b>	<b><math>d_i</math></b>	<b><math>joker_r</math></b>
Ex31	HP ETL, 090GR	1	250	120.000	48,00	143
	HP ETL, 090GR	2	230	42.987	18,69	153
	HP ETL, 090GR	3	215	42.262	19,66	163
	HP ETL, 090GR	4	200	30.000	15,00	173
	HP ETL, 090GR	5	91	25.000	27,47	183
	HP ETL, 090GR	6	180	25.000	13,89	
	HP ETL, 090GR	7	185	25000	13,51	
	HP ETL, 090GR	8	190	25000	13,16	
	HP ETL, 090GR	9	210	25000	11,90	
	HP ETL, 090GR	10	225	25000	11,11	
	HP ETL, 090GR	11	240	25000	10,42	
	HP ETL, 090GR	12	81	25000	30,86	
	HP ETL, 090GR	13	95	15500	16,32	
	HP ETL, 090GR	14	71	15000	21,13	
	HP ETL, 090GR	15	76	15000	19,74	
	HP ETL, 090GR	16	101	11500	11,39	
	HP ETL, 090GR	17	116	11500	9,91	
	HP ETL, 090GR	18	122	11000	9,02	
	HP ETL, 090GR	19	132	10500	7,95	
	HP ETL, 090GR	20	175	1766	1,01	

**Tablo A.32:** Deneysel Test Ex32 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex32	HP FLT, 080GR	1	250	150.000	60,00	143
	HP FLT, 080GR	2	243	110.000	45,27	153
	HP FLT, 080GR	3	122	65.000	53,28	163
	HP FLT, 080GR	4	225	60.000	26,67	173
	HP FLT, 080GR	5	163	45.000	27,61	183
	HP FLT, 080GR	6	132	40.000	30,30	
	HP FLT, 080GR	7	205	32.916	16,06	
	HP FLT, 080GR	8	92	25.000	27,17	
	HP FLT, 080GR	9	90	12.600	14,00	
	HP FLT, 080GR	10	210	11.000	5,24	
	HP FLT, 080GR	11	123	6.200	5,04	
	HP FLT, 080GR	12	200	6.000	3,00	
	HP FLT, 080GR	13	215	11.024	5,13	
	HP FLT, 080GR	14	102	6.300	6,18	
	HP FLT, 080GR	15	65	5.200	8,00	
	HP FLT, 080GR	16	115	4.800	4,17	
	HP FLT, 080GR	17	190	3.800	2,00	
	HP FLT, 080GR	18	245	4.800	1,96	
	HP FLT, 080GR	19	75	3.800	5,07	
	HP FLT, 080GR	20	70	2.800	4,00	

**Tablo A.33:** Deneysel Test Ex33 Problem Verisi.

<b>Problem No</b>	<b>Ürün Adı</b>	<b>Sipariş İndeksi</b>	<b>Bobin Eni (cm)</b>	<b>Talep (kg)</b>	<b>Bobin Sayısı (adet)</b>	<b>Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)</b>
<b>ProbID</b>		<b><i>i</i></b>	<b><i>s<sub>i</sub></i></b>	<b><i>b<sub>i</sub></i></b>	<b><i>d<sub>i</sub></i></b>	<b><i>joker<sub>r</sub></i></b>
Ex33	HP FLT, 100GR	1	250	100.000	40,00	143
	HP FLT, 100GR	2	175	80.000	45,71	153
	HP FLT, 100GR	3	240	70.000	29,17	163
	HP FLT, 100GR	4	203	60.000	29,56	173
	HP FLT, 100GR	5	192	50.000	26,04	183
	HP FLT, 100GR	6	200	40.000	20,00	
	HP FLT, 100GR	7	235	40.000	17,02	
	HP FLT, 100GR	8	280	40.000	14,29	
	HP FLT, 100GR	9	129	40000	31,01	
	HP FLT, 100GR	10	230	30000	13,04	
	HP FLT, 100GR	11	185	30000	16,22	
	HP FLT, 100GR	12	205	30000	14,63	
	HP FLT, 100GR	13	210	30000	14,29	
	HP FLT, 100GR	14	220	30000	13,64	
	HP FLT, 100GR	15	85	10000	11,76	
	HP FLT, 100GR	16	245	10.000	4,08	
	HP FLT, 100GR	17	170	6800	4,00	
	HP FLT, 100GR	18	52	5200	10,00	
	HP FLT, 100GR	19	55	5000	9,09	
	HP FLT, 100GR	20	75	5200	6,93	

**Tablo A.34:** Deneysel Test Ex34 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex34	HP ETL, 110GR	1	250	120.000	48,00	143
	HP ETL, 110GR	2	240	110.000	45,83	153
	HP ETL, 110GR	3	205	80.000	39,02	163
	HP ETL, 110GR	4	220	80.000	36,36	173
	HP ETL, 110GR	5	173	70.000	40,46	183
	HP ETL, 110GR	6	225	30.000	13,33	
	HP ETL, 110GR	7	230	30.000	13,04	
	HP ETL, 110GR	8	235	30.000	12,77	
	HP ETL, 110GR	9	203	30.000	14,78	
	HP ETL, 110GR	10	219	32000	14,61	
	HP ETL, 110GR	11	245	25000	10,20	
	HP ETL, 110GR	12	210	20000	9,52	
	HP ETL, 110GR	13	185	20000	10,81	
	HP ETL, 110GR	14	132	19000	14,39	
	HP ETL, 110GR	15	180	18000	10,00	
	HP ETL, 110GR	16	200	18000	9,00	
	HP ETL, 110GR	17	215	17000	7,91	
	HP ETL, 110GR	18	122	13500	11,07	
	HP ETL, 110GR	19	183	9000	4,92	
	HP ETL, 110GR	20	102	8200	8,04	
	HP ETL, 110GR	21	112	8000	7,14	
	HP ETL, 110GR	22	175	7000	4,00	
	HP ETL, 110GR	23	190	5600	2,95	
	HP ETL, 110GR	24	120	2400	2,00	

**Tablo A.35:** Deneysel Test Ex35 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex35	HP FLT, 100GR	1	250	150.000	60,00	143
	HP FLT, 100GR	2	225	90.000	40,00	153
	HP FLT, 100GR	3	200	80.000	40,00	163
	HP FLT, 100GR	4	240	75.000	31,25	173
	HP FLT, 100GR	5	185	60.000	32,43	183
	HP FLT, 100GR	6	245	48.000	19,59	
	HP FLT, 100GR	7	210	42.000	20,00	
	HP FLT, 100GR	8	230	42.000	18,26	
	HP FLT, 100GR	9	215	42.000	19,53	
	HP FLT, 100GR	10	192	42000	21,88	
	HP FLT, 100GR	11	203	40000	19,70	
	HP FLT, 100GR	12	219	35000	15,98	
	HP FLT, 100GR	13	190	34000	17,89	
	HP FLT, 100GR	14	235	28864	12,28	
	HP FLT, 100GR	15	180	24000	13,33	
	HP FLT, 100GR	16	205	12500	6,10	
	HP FLT, 100GR	17	123	10000	8,13	
	HP FLT, 100GR	18	220	6600	3,00	
	HP FLT, 100GR	19	113	3300	2,92	
	HP FLT, 100GR	20	132	2600	1,97	
	HP FLT, 100GR	21	155	3000	1,94	
	HP FLT, 100GR	22	164	3200	1,95	
	HP FLT, 100GR	23	175	3500	2,00	
	HP FLT, 100GR	24	112	1100	0,98	

**Tablo A.36:** Deneysel Test Ex36 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex36	HP FLT, 130GR	1	235	140.000	59,57	143
	HP FLT, 130GR	2	250	120.000	48,00	153
	HP FLT, 130GR	3	225	100.000	44,44	163
	HP FLT, 130GR	4	210	80.000	38,10	173
	HP FLT, 130GR	5	200	60.000	30,00	183
	HP FLT, 130GR	6	185	60.000	32,43	
	HP FLT, 130GR	7	230	30000	13,04	
	HP FLT, 130GR	8	240	30000	12,50	
	HP FLT, 130GR	9	163	30000	18,40	
	HP FLT, 130GR	10	180	30000	16,67	
	HP FLT, 130GR	11	215	27927	12,99	
	HP FLT, 130GR	12	153	26000	16,99	
	HP FLT, 130GR	13	102	21667	21,24	
	HP FLT, 130GR	14	112	19333	17,26	
	HP FLT, 130GR	15	76	10000	13,16	
	HP FLT, 130GR	16	190	9500	5,00	
	HP FLT, 130GR	17	132	8000	6,06	
	HP FLT, 130GR	18	245	7500	3,06	
	HP FLT, 130GR	19	219	6600	3,01	
	HP FLT, 130GR	20	203	6000	2,96	
	HP FLT, 130GR	21	86	5200	6,05	
	HP FLT, 130GR	22	96	4000	4,17	
	HP FLT, 130GR	23	122	3600	2,95	
	HP FLT, 130GR	24	91	2700	2,97	

**Tablo A.37:** Deneysel Test Ex37 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex37	HP FLT, 120GR	1	205	150.000	73,17	143
	HP FLT, 120GR	2	220	150.000	68,18	153
	HP FLT, 120GR	3	240	100.000	41,67	163
	HP FLT, 120GR	4	173	60.000	34,68	173
	HP FLT, 120GR	5	250	50.000	20,00	183
	HP FLT, 120GR	6	264	40.000	15,15	
	HP FLT, 120GR	7	280	28.000	10,00	
	HP FLT, 120GR	8	180	18.000	10,00	
	HP FLT, 120GR	9	233	16.500	7,08	
	HP FLT, 120GR	10	170	17000	10,00	
	HP FLT, 120GR	11	70	14000	20,00	
	HP FLT, 120GR	12	85	13600	16,00	
	HP FLT, 120GR	13	65	13000	20,00	
	HP FLT, 120GR	14	75	13000	17,33	
	HP FLT, 120GR	15	95	13300	14,00	
	HP FLT, 120GR	16	90	6300	7,00	
	HP FLT, 120GR	17	105	6300	6,00	
	HP FLT, 120GR	18	80	5600	7,00	
	HP FLT, 120GR	19	100	5000	5,00	
	HP FLT, 120GR	20	120	4800	4,00	
	HP FLT, 120GR	21	130	2700	2,08	
	HP FLT, 120GR	22	132	2700	2,05	
	HP FLT, 120GR	23	135	2700	2,00	
	HP FLT, 120GR	24	122	2500	2,05	
	HP FLT, 120GR	25	125	2500	2,00	
	HP FLT, 120GR	26	109	2200	2,02	
	HP FLT, 120GR	27	110	2200	2,00	

**Tablo A.38:** Deneysel Test Ex38 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex38	HP FLT, 080GR	1	250	150.000	60,00	143
	HP FLT, 080GR	2	243	100.000	41,15	153
	HP FLT, 080GR	3	245	90.000	36,73	163
	HP FLT, 080GR	4	183	80.000	43,72	173
	HP FLT, 080GR	5	225	80.000	35,56	183
	HP FLT, 080GR	6	205	30000	14,63	
	HP FLT, 080GR	7	91	30000	32,97	
	HP FLT, 080GR	8	230	30000	13,04	
	HP FLT, 080GR	9	132	30000	22,73	
	HP FLT, 080GR	10	235	30000	12,77	
	HP FLT, 080GR	11	240	20000	8,33	
	HP FLT, 080GR	12	96	16000	16,67	
	HP FLT, 080GR	13	86	15000	17,44	
	HP FLT, 080GR	14	190	15000	7,89	
	HP FLT, 080GR	15	210	15000	7,14	
	HP FLT, 080GR	16	71	14000	19,72	
	HP FLT, 080GR	17	116	10000	8,62	
	HP FLT, 080GR	18	216	10000	4,63	
	HP FLT, 080GR	19	200	10000	5,00	
	HP FLT, 080GR	20	112	10000	8,93	
	HP FLT, 080GR	21	122	7200	5,90	
	HP FLT, 080GR	22	215	4200	1,95	
	HP FLT, 080GR	23	66	3300	5,00	
	HP FLT, 080GR	24	76	3000	3,95	
	HP FLT, 080GR	25	101	3000	2,97	
	HP FLT, 080GR	26	111	2200	1,98	
	HP FLT, 080GR	27	174	1750	1,01	

**Tablo A.39:** Deneysel Test Ex39 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex39	HP ETL, 090GR	1	245	170.293	69,51	143
	HP ETL, 090GR	2	250	94.118	37,65	153
	HP ETL, 090GR	3	230	90.673	39,42	163
	HP ETL, 090GR	4	203	68.182	33,59	173
	HP ETL, 090GR	5	205	63.637	31,04	183
	HP ETL, 090GR	6	219	58.624	26,77	
	HP ETL, 090GR	7	210	50.978	24,28	
	HP ETL, 090GR	8	225	40.910	18,18	
	HP ETL, 090GR	9	220	27.782	12,63	
	HP ETL, 090GR	10	105	26365	25,11	
	HP ETL, 090GR	11	200	21991	11,00	
	HP ETL, 090GR	12	192	20455	10,65	
	HP ETL, 090GR	13	185	19737	10,67	
	HP ETL, 090GR	14	110	18511	16,83	
	HP ETL, 090GR	15	90	17977	19,97	
	HP ETL, 090GR	16	132	15910	12,05	
	HP ETL, 090GR	17	115	14105	12,27	
	HP ETL, 090GR	18	95	13300	14,00	
	HP ETL, 090GR	19	235	13045	5,55	
	HP ETL, 090GR	20	143	13030	9,11	
	HP ETL, 090GR	21	215	13000	6,05	
	HP ETL, 090GR	22	237	12000	5,06	
	HP ETL, 090GR	23	100	8083	8,08	
	HP ETL, 090GR	24	180	7200	4,00	
	HP ETL, 090GR	25	240	6048	6,00	
	HP ETL, 090GR	26	70	5000	7,14	
	HP ETL, 090GR	27	120	4800	4,00	

**Tablo A.40:** Deneysel Test Ex40 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex40	HP FLT, 080GR	1	245	195.918	79,97	143
	HP FLT, 080GR	2	250	89.415	35,77	153
	HP FLT, 080GR	3	205	78.540	38,31	163
	HP FLT, 080GR	4	225	77.812	34,58	173
	HP FLT, 080GR	5	230	75.761	32,94	183
	HP FLT, 080GR	6	210	50.000	23,81	
	HP FLT, 080GR	7	200	46.539	23,27	
	HP FLT, 080GR	8	235	40.000	17,02	
	HP FLT, 080GR	9	143	38.000	26,57	
	HP FLT, 080GR	10	220	29239	13,29	
	HP FLT, 080GR	11	216	24000	11,11	
	HP FLT, 080GR	12	219	21948	10,02	
	HP FLT, 080GR	13	203	20500	10,10	
	HP FLT, 080GR	14	222	20000	9,01	
	HP FLT, 080GR	15	215	19395	9,02	
	HP FLT, 080GR	16	280	20000	7,14	
	HP FLT, 080GR	17	132	18500	14,02	
	HP FLT, 080GR	18	240	17243	7,18	
	HP FLT, 080GR	19	105	16000	15,24	
	HP FLT, 080GR	20	90	15500	17,22	
	HP FLT, 080GR	21	115	14000	12,17	
	HP FLT, 080GR	22	190	14000	7,37	
	HP FLT, 080GR	23	85	14000	16,47	
	HP FLT, 080GR	24	95	14000	14,74	
	HP FLT, 080GR	25	100	14000	14,00	
	HP FLT, 080GR	26	185	11207	6,06	
	HP FLT, 080GR	27	237	10000	4,22	

**Tablo A.41:** Deneysel Test Ex41 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Ex41	HP FLT, 130GR	1	250	176.669	70,67	143
	HP FLT, 130GR	2	235	120.000	51,06	153
	HP FLT, 130GR	3	210	115.406	54,96	163
	HP FLT, 130GR	4	200	112.500	56,25	173
	HP FLT, 130GR	5	183	108.787	59,45	183
	HP FLT, 130GR	6	225	108.571	48,25	
	HP FLT, 130GR	7	185	100.615	54,39	
	HP FLT, 130GR	8	205	57.234	27,92	
	HP FLT, 130GR	9	172	50.000	29,07	
	HP FLT, 130GR	10	102	43.621	42,77	
	HP FLT, 130GR	11	105	42.500	40,48	
	HP FLT, 130GR	12	190	42.500	22,37	
	HP FLT, 130GR	13	90	40.379	44,87	
	HP FLT, 130GR	14	95	37.642	39,62	
	HP FLT, 130GR	15	240	36.000	15,00	
	HP FLT, 130GR	16	230	32.500	14,13	
	HP FLT, 130GR	17	100	30.000	30,00	
	HP FLT, 130GR	18	112	24.413	21,80	
	HP FLT, 130GR	19	80	22.500	28,13	
	HP FLT, 130GR	20	115	23.000	20,00	
	HP FLT, 130GR	21	110	20000	18,18	
	HP FLT, 130GR	22	180	20000	11,11	
	HP FLT, 130GR	23	132	18462	13,99	
	HP FLT, 130GR	24	85	17500	20,59	
	HP FLT, 130GR	25	120	16000	13,33	
	HP FLT, 130GR	26	175	17500	10,00	
	HP FLT, 130GR	27	245	12500	5,10	
	HP FLT, 130GR	28	215	13000	6,05	
	HP FLT, 130GR	29	220	8800	4,00	
	HP FLT, 130GR	30	75	7500	10,00	

## EK B: Gerçek Hayat Vaka Çalışması Verileri

**Tablo B.1:** Gerçek Hayat Vaka Çalışması Cs3 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Cs3	HP ETL, 090GR	1	163	174.282	106,92	143
	HP ETL, 090GR	2	172	150.000	87,21	153
	HP ETL, 090GR	3	143	131.806	92,17	163
	HP ETL, 090GR	4	153	139.902	91,44	173
	HP ETL, 090GR	5	132	99.982	75,74	183
	HP ETL, 090GR	6	122	65.000	53,28	122
	HP ETL, 090GR	7	175	60.000	34,29	
	HP ETL, 090GR	8	112	32.918	29,39	
	HP ETL, 090GR	9	173	26.980	15,60	
	HP ETL, 090GR	10	102	25.000	24,51	
	HP ETL, 090GR	11	183	19.444	10,63	
	HP ETL, 090GR	12	180	15.000	8,33	
	HP ETL, 090GR	13	185	15.000	8,11	

**Tablo B.2:** Gerçek Hayat Vaka Çalışması Cs4 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Cs4	HP ETL, 135GR	1	243	100.000	41,15	143
	HP ETL, 135GR	2	200	95.000	47,50	153
	HP ETL, 135GR	3	245	45.000	18,37	163
	HP ETL, 135GR	4	185	40.000	21,62	173
	HP ETL, 135GR	5	235	40.000	17,02	183
	HP ETL, 135GR	6	250	40.000	16,00	190
	HP ETL, 135GR	7	210	35.000	16,67	80
	HP ETL, 135GR	8	173	25.000	14,45	102
	HP ETL, 135GR	9	180	25.000	13,89	
	HP ETL, 135GR	10	205	25.000	12,20	
	HP ETL, 135GR	11	220	24.935	11,33	
	HP ETL, 135GR	12	225	18.000	8,00	
	HP ETL, 135GR	13	240	5.000	2,08	
	HP ETL, 135GR	14	122	5.000	4,10	
	HP ETL, 135GR	15	132	5.200	3,94	
	HP ETL, 135GR	16	143	5.600	3,92	
	HP ETL, 135GR	17	153	4.800	3,14	
	HP ETL, 135GR	18	163	4.900	3,01	

**Tablo B.3:** Gerçek Hayat Vaka Çalışması Cs5 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Cs5	FLT, 080GR	1	243	250.000	102,88	143
	FLT, 080GR	2	250	150.000	60,00	153
	FLT, 080GR	3	162	21.000	12,96	163
	FLT, 080GR	4	182	13.000	7,14	173
	FLT, 080GR	5	230	11.810	5,13	183
	FLT, 080GR	6	201	10.065	5,01	223
	FLT, 080GR	7	202	4.084	2,02	
	FLT, 080GR	8	152	1.600	1,05	
	FLT, 080GR	9	112	1.131	1,01	

**Tablo B.4:** Gerçek Hayat Vaka Çalışması Cs6 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Cs6	HP ETL, 130GR	1	143	109.000	76,22	143
	HP ETL, 130GR	2	172	100.000	58,14	153
	HP ETL, 130GR	3	163	85.000	52,15	163
	HP ETL, 130GR	4	132	56.000	42,42	173
	HP ETL, 130GR	5	173	44.000	25,43	210
	HP ETL, 130GR	6	153	34.560	22,59	200
	HP ETL, 130GR	7	183	11.000	6,01	75

**Tablo B.5:** Gerçek Hayat Vaka Çalışması Cs7 Problem Verisi.

Problem No	Ürün Adı	Sipariş İndeksi	Bobin Eni (cm)	Talep (kg)	Bobin Sayısı (adet)	Kullanılabilir Joker Bobin Enleri (cm)
ProbID		$i$	$s_i$	$b_i$	$d_i$	$joker_r$
Cs7	HP ETL, 080GR	1	225	90.000	40,00	143
	HP ETL, 080GR	2	245	65.000	26,53	153
	HP ETL, 080GR	3	205	62.976	30,72	163
	HP ETL, 080GR	4	183	43.050	23,52	173
	HP ETL, 080GR	5	113	20.000	17,70	183
	HP ETL, 080GR	6	103	15.000	14,56	123
	HP ETL, 080GR	7	173	15.600	9,02	133
	HP ETL, 080GR	8	123	4.800	3,90	
	HP ETL, 080GR	9	133	2.856	2,15	

**Tablo B.6:** GHVÇ Cs3 Planlama Sorumlusu Çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	8	185	172	172	112	-	641	650	72
2	8	180	172	163	132	-	647	650	24
3	11	183	172	143	143	-	641	650	99
4	22	143	143	143	112	102	643	650	154
5	2	153	132	132	122	102	641	650	18
6	35	175	163	153	153	-	644	650	210
7	4	172	163	163	143	-	641	650	36
8	16	173	172	163	132	-	640	650	160
9	16	172	172	163	132	-	639	650	176
10	13	153	122	122	122	122	641	650	117
11	8	132	132	132	132	<b>122</b>	650	650	0
12	8	163	163	163	153	-	642	650	64
$f_1$					151				
$f_2$					1130				
$h_1$					976				
$h_2$					8				

**Tablo B.7:** GHVÇ Cs4 Planlama Sorumlusu Çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	11	243	220	185	-	-	648	650	22
2	4	250	250	143	-	-	643	650	28
3	3	245	245	153	-	-	643	650	21
4	3	250	235	163	-	-	648	650	6
5	4	210	185	132	122	-	649	650	4
6	5	250	225	173	-	-	648	650	10
7	3	245	225	173	-	-	643	650	21
8	2	240	235	173	-	-	648	650	4
9	9	245	210	185	-	-	640	650	90
10	6	235	235	173	-	-	643	650	42
11	12	243	205	200	-	-	648	650	24
12	18	243	200	200	-	-	643	650	126
13	1	243	210	<b>190</b>	-	-	643	650	7
14	3	210	180	180	<b>80</b>	-	650	650	0
15	3	180	180	180	<b>102</b>	-	642	650	24
$f_1$					87				
$f_2$					429				
$h_1$					736				
$h_2$					7				

**Tablo B.8:** GHVÇ Cs5 Planlama Sorumlusu Çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	1	202	182	152	112	-	648	650	2
2	1	243	202	201	-	-	646	650	4
3	2	243	201	201	-	-	645	650	10
4	3	230	230	182	-	-	642	650	24
5	13	243	243	162	-	-	648	650	26
6	3	243	<b>223</b>	183	-	-	649	650	3
7	60	250	243	<b>153</b>	-	-	646	650	240
8	11	243	243	<b>163</b>	-	-	649	650	11
$f_1$					94				
$f_2$					320				
$h_1$					11642				
$h_2$					74				

**Tablo B.9:** GHVÇ Cs6 Planlama Sorumlusu Çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					$U_k$	$Wk$	$F_k$
1	6	183	172	153	132	-	640	650	60
2	13	172	172	153	143	-	640	650	130
3	26	173	172	163	132	-	640	650	260
4	4	163	163	163	153	-	642	650	32
5	10	<b>210</b>	163	143	132	-	648	650	20
6	5	<b>200</b>	163	143	143	-	649	650	5
7	11	143	143	143	143	<b>75</b>	647	650	33
$f_1$					75				
$f_2$					540				
$h_1$					3925				
$h_2$					26				

**Tablo B.10:** GHVÇ Cs7 Planlama Sorumlusu Çözümü.

<i>Desen No</i>	<i>Set sayısı</i>	<i>Kesim Deseni</i>					<i>U<sub>k</sub></i>	<i>W<sub>k</sub></i>	<i>F<sub>k</sub></i>
1	15	225	205	113	103	-	646	650	60
2	9	245	225	173	-	-	643	650	63
3	4	205	205	123	113	-	646	650	16
4	9	245	245	<b>153</b>	-	-	643	650	63
5	8	205	183	<b>133</b>	<b>123</b>	-	644	650	48
6	16	<b>240</b>	225	183	-	-	648	650	32
<i>f<sub>1</sub></i>					61				
<i>f<sub>2</sub></i>					282				
<i>h<sub>1</sub></i>					6999				
<i>h<sub>2</sub></i>					39				

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ramazan Yanıç

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	2025
Lisans	İstanbul Üniversitesi/ Endüstri Mühendisliği	2006
Lise	Fethiye Lisesi	2001

## Yayın Listesi

Yanıç, R., Küçükkoç, İ. (2025). Roll Cutting Problem In Paper Production Industry, 2nd International Thales Congress on Life, Engineering, Architecture, and Mathematics (Cairo, Egypt, 26 January 2025). [Tezden türetilmiştir]