

Demiryolu Araçları Manevra Problemi:  
TCDD Marşandiz Gar Manevra Alanı Uygulaması

Gülsüm DEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2019

Shunting Problem in Railways:  
An Application to Turkish State Railways at Marşandiz Station Shunting Area

Gülsüm DEMİR

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Industrial Engineering

August 2019

Demiryolu Araçları Manevra Problemi:  
TCDD Marşandiz Gar Manevra Alanı Uygulaması

Glsm DEMİR

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi R. Aykut ARAPOğLU

Ağustos 2019

## ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Gülsüm DEMİR'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Demiryolu Araçları Manevra Problemi: TCDD Marşandiz Gar Manevra Alanı Uygulaması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi R. Aykut ARAPOĞLU

**İkinci Danışman** : -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof. Dr. İnci SARIÇİÇEK

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet GÜLŞEN

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi R. Aykut ARAPOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi R. Aykut ARAPOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Demiryolu Araçları Manevra Problemi: TCDD Marşandiz Gar Manevra Alanı Uygulaması” başlıklı yüksek lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 28/08/2019

Gölsüm DEMİR

## ÖZET

Ülkemizde demiryolu ile yük ve yolcu taşımacılığı Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) işletmesi tarafından sağlanmaktadır. Demiryolu yük taşımacılığının en zorlu bileşenlerinden biri olan manevra alanlarında, trenlerin kabul ve sevk işlemleri gerçekleştirilmekte olup bu faaliyetler yüksek maliyetli, uzun zaman alan ve emek yoğun işlemlerdir. Manevra alanlarında tren-zaman çizelgesine göre gerçekleştirilen temel işlemler; gelen vagonlarının manevra alanına varış yaptıkları tren teşkilinden ayrıştırılması, giden vagonlarla eşleştirilmesi ve giden tren teşkilini oluşturmak üzere yeniden birleştirilmesidir. Bu işlemler gelen vagonların paralel manevra hatlarına atanması yoluyla yapılır. Gelen vagonların manevra hat uzunluklarını aşmayacak ve bloklamayı önleyecek şekilde hatlara atanması problemi literatürde Demiryolu Aracı Manevra Problemi (DAMP) olarak bilinmektedir. DAMP'nin amacı toplam manevra maliyetinin en küçüklemeektir.

Bu çalışmada, TCDD idaresinde Ankara ili Marşandiz Gar'daki gerçek bir problem DAMP olarak ele alınmış ve Schrijver (2003) modeli temel alınarak bir Tamsayılı Doğrusal Programlama (TDP) modeli oluşturulmuştur. Bu model GAMS yazılımı kullanılarak kodlanmış ve çözülmüştür. Çözüm sonucunda ulaşılan manevra maliyeti ile mevcut durumda katlanılan maliyetler karşılaştırıldığında manevra maliyetinin mevcut duruma göre %17 daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, farklı vagon sıralamaları ile türetilen 12 problem çözülmüş, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde, farklı ikili hatlar kullanılarak türetilen 15 problem de çözülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Demiryolu Yük Taşımacılığı, Demiryolu Aracı Manevra Problemi, Tamsayılı Doğrusal Programlama

## SUMMARY

Passenger and freight transportation in Turkey is handled by state owned Turkish State Railways (TCDD). One of the most challenging components in rail freight transportation is shunting field where inbound trains are accepted in, and outbound trains depart from and also the processes in this field are highly expensive, time consuming and labor intensive. Fundamental operations according to timetable in shunting field include decoupling of inbound cars coming from inbound trains then matching and recoupling of inbound cars to outbound cars. These operations are performed by assigning the incoming cars to a limited number of parallel shunting tracks. The problem of determination of shunting movements under the constraints of the shunting track capacity and car blocking/crossing constraints is known as “The train unit shunting problem” in the literature. In this problem, the objective is to minimize the total shunting cost associated with the shunting movements.

In this study, a real world shunting problem which arose in Marşandiz Gar at central train station in Ankara is modeled as a DAMP and an ILP (Integer Linear Programming) model based on Schrijver (2003) is proposed. The proposed model is coded in GAMS and solved to optimality. The resultant total shunting cost is found to be 17% lower than the actual shunting cost. Moreover, 12 problem instances are generated by using different car sequences and these instances are also solved. Similarly, 15 more instances are generated by considering possible pairs of shunting tracks.

**Keywords:** Rail Freight Transportation, Train Unit Shunting Problem, Integer Linear Programming

## TEŞEKKÜR

Demiryolu araçları manevra probleminin çözümüne yönelik olan ve demiryollarında endüstri mühendisliği uygulamalarına örnek olabileceği için son derece mutlu olduğum bu çalışmada; bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren Sayın Dr. Öğr. Üyesi R. Aykut ARAPOĞLU'na, çalışmamın her aşamasında tecrübelerini ve yardımlarını esirgemeyen TCDD ailesinin değerli üyelerine teşekkür etmeyi borç bilir ve destekleri ile beni asla yalnız bırakmayan annem Haskar DEMİR ve babam Kaya DEMİR'e, kardeşlerim Gülistan, Gül ve Sevilay'a ve arkadaşım Ercan HÜYÜKTEPE'ye şükranlarımı sunarım.

Gülsüm DEMİR



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| ÖZET.....  | vi        |
| SUMMARY.....   | vii       |
| TEŞEKKÜR.....  | viii      |
| İÇİNDEKİLER .....                                    | ix        |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                | xi        |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                              | xii       |
| <b>1. GİRİŞ VE AMAÇ.....</b>                         | <b>1</b>  |
| <b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>                 | <b>5</b>  |
| 2.1. Genel Manevra Problemi .....                    | 5         |
| 2.2. Demiryolu Taşımacılığında Manevra Problemi..... | 6         |
| 2.2.1. Yolcu Taşımacılığında Manevra Problemi .....  | 8         |
| 2.2.2. Yük Taşımacılığında Manevra Problemi .....    | 11        |
| <b>3. DEMİRYOLU ARAÇLARI MANEVRA PROBLEMİ.....</b>   | <b>16</b> |
| 3.1. Temel Tanımlar .....                            | 17        |
| 3.2. DAMP Tanımı.....                                | 21        |
| 3.2.1. Eşleştirme ve manevra hatlarına atama.....    | 22        |
| 3.2.2. Manevra alanında bloklama .....               | 24        |
| <b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                    | <b>28</b> |
| 4.1. DAMP İçin Varsayımlar .....                     | 28        |
| 4.2. TDP Modeli.....                                 | 29        |
| 4.2.1. Matematiksel gösterim.....                    | 29        |
| 4.2.2. Amaç fonksiyonu.....                          | 32        |

**İÇİNDEKİLER (devam)****Sayfa**

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2.3. Kısıtlar.....  | 33        |
| <b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>  | <b>43</b> |
| 5.1. Marşandiz Gar Manevra Alanı Uygulaması .....                           | 43        |
| 5.2. Model Girdileri.....   | 47        |
| 5.3. Model Çıktıları .....  | 50        |
| 5.4. Problem Türetme .....  | 52        |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>EK AÇIKLAMALAR .....</b>   | <b>60</b> |
| Ek Açıklama – A: Küçük boyutlu problem için GAMS kodu .....                 | 61        |
| Ek Açıklama – B: Küçük boyutlu problemin GAMS sonuç çıktısı .....           | 66        |
| Ek Açıklama – C: Marşandiz Gar manevra problemi GAMS kodu .....             | 67        |
| EK Açıklama – D: Marşandiz Gar manevra probleminin GAMS sonuç çıktısı ..... | 73        |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.1. ICM türünde 3 pulmanlı yolcu vagonu (Akker vd.den, 2008) .....            | 10           |
| 2.2. Manevra Alanı ve Boğaz Yapısı (LIFO) (Gatto vd.den, 2009) .....           | 11           |
| 2.3. Manevra Alanı ve Boğaz Yapısı (FIFO) (Beygang vd.den, 2010) .....         | 12           |
| 2.4. Manevra Alanı (Alev vd.den, 2009) .....                                   | 13           |
| 2.5. Manevra alanı (Shi ve Zhou'dan, 2015) .....                               | 14           |
| 2.6. Vagonların sınıflandırma alanına atanması (Boysen vd.den, 2015) .....     | 14           |
| 2.7. Kuzey ve güney yönlü çoklu manevra alanı (Otto ve Pesch'den, 2016) .....  | 15           |
| 2.8. Çoklu manevra alanı ve çapraz geçiş örneği (Otto ve Pesch'den, 2016)..... | 15           |
| 3.1. Grup ve Yön Manevrası (MEB'den, 2011).....                                | 18           |
| 3.2. Hibrit manevra lokomotifi (Aselsan, 2018).....                            | 19           |
| 3.3. Manevra hattı makas örneği (TCDD Taşımacılık'tan, 2019) .....             | 20           |
| 4.1. TDP modeli eşleştirme ve atama yapısı .....                               | 32           |
| 4.2. Örnek problem için bloklama senaryosu-1 .....                             | 40           |
| 4.3. Örnek problem için bloklama senaryosu-2.....                              | 41           |
| 5.1. Marşandiz Gar'ın demiryolu haritasında yeri (TCDD, 2019).....             | 44           |
| 5.2. Marşandiz Gar manevra alanı-1 .....                                       | 45           |
| 5.3. Marşandiz Gar manevra alanı-2.....  | 45           |
| 5.4. Marşandiz Gar manevra alanı kroki.....                                    | 46           |
| 5.5. Marşandiz manevra alanındaki manevra hatları .....                        | 46           |
| 5.6. Küçük boyutlu problem için t1 manevra hattına atama .....                 | 51           |
| 5.7. Küçük boyutlu problem için t2 manevra hattına atama .....                 | 51           |
| 5.8. Marşandiz manevra örneği t1 ve t2 hatlarına atama .....                   | 52           |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u>  | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 4.1. Örnek problem vagon bilgileri.....                             | 37           |
| 4.2. Örnek problem manevra hattı bilgileri .....                    | 37           |
| 4.3. Örnek probleme ait alt kümeler .....                           | 38           |
| 5.1. Tren zaman çizelge örneği.....                                 | 44           |
| 5.2. Yük grupları ve yük türleri (TCDD Taşımacılık'tan, 2019) ..... | 46           |
| 5.3. Marşandiz Gar manevra hattı özellikleri .....                  | 47           |
| 5.4. Marşandiz manevra örneği gelen vagon bilgileri.....            | 48           |
| 5.5. Marşandiz manevra örneği sıralaması.....                       | 49           |
| 5.6. Birim manevra maliyetleri.....                                 | 49           |
| 5.7. Örnekler için model çalışma bilgileri.....                     | 50           |
| 5.8. Türetilen problemler için geliş-gidiş sıralamaları.....        | 53           |
| 5.9. Türetilen 2'li hat atamaları için model bilgileri .....        | 54           |

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüz demiryolu taşımacılığı, 19. yüzyılın başlarında İngiliz maden ocağı hatlarıyla (Bilgiç, 2017); bugünkü milli sınırlarımız içinde ise 23 Eylül 1856'da 130 km'lik İzmir-Aydın demiryolu hattıyla başlamıştır (TCDD, 2018). Sınırların anlamını yitirdiği günümüz dünyasında demiryolu taşımacılığı gün geçtikçe sanayinin gelişimine, nüfusun artmasına ve yerleşim alanlarının değişimine göre ulaştırma sistemleri arasındaki önemini arttırmaktadır. Diğer yandan küreselleşme süreci hız kesmeden ürünlerin, hizmetlerin, insanların ve sermayenin daha serbest şekilde dolaşımını gerektirmektedir. Bu gerekliliklere karşın ülkemizde demiryolu yük taşımacılığı için önemli yere sahip olan manevra alanlarındaki zaman alan ve karmaşık faaliyetler içeren manevra alanı planlaması günlük ve manuel olarak yapılmaktadır.

Demiryolu taşımacılığı yolcu ve yük taşımacılığı olarak ikiye ayrılmaktadır. Yolcu taşımacılığında kullanılan trenlerde yolcu vagonlarının sıralaması, yolcu treninin ilk hareket ettiği istasyondan varış yapacağı istasyona kadar değişikliğe uğramamaktadır. Yük taşımacılığında ise trenlerde bulunan yük vagonlarının sayı ve sıraları rota üzerindeki manevra alanlarında değişmektedir. Demiryolu yük taşımacılığında özellikle gün içinde yoğun trafiğin yaşandığı zaman aralıklarında planlayıcılar, manevra sahalarında birçok zorlukla karşılaşmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada demiryolu yük taşımacılığındaki günlük toplam manevra maliyetini en küçükleyecek manevraların belirlenmesine odaklanılmıştır. Manevra alanı; manevra lokomotiflerinin hareket ettirmesiyle vagonların; yükleme-boşaltmalarının yapıldığı, sıralandığı, park edildiği paralel manevra hatlarından ve bu hatları birbirine bağlayan makaslardan oluşmaktadır. Manevra işlemleri temel olarak;

- manevra hatlarına park edilen gelen yük treninde bulunan vagonların ayrıştırılması,
- gelen yük vagonu ile giden yük vagonlarının uygun bir manevra hattında eşleştirilmesi,
- tren zaman çizelgesine uygun olarak hazırlanacak giden yük trenini oluşturmak üzere eşleştirilen yük vagonlarının yeniden birleştirilmesidir.

Demiryolu yük vagonlarının ayrıştırılması, eşleştirilmesi ve yeniden birleştirilmesi işlemleri manevra lokomotifleri tarafından yapılmaktadır. Manevra alanına gelen yük vagonlarının ayrıştırma ve giden yük vagonları olarak yeniden birleştirme işlemleri dışında gerekli

durumlarda manevra alanlarında temizlik ve vagon bakımı gibi ilave işlemler de yapılmaktadır. Yapılan ilave işlemler bu çalışma kapsamına dahil edilmemiştir.

Demiryolu yük taşımacılığının en önemli alt sistemlerinden olan manevra alanları ve bu alanlardaki faaliyetler, maliyet ve süre yoğun işlemlerdir. Ulaştırma ve Haberleşme Terimleri Sözlüğünde (UAB, 2011) vagon atma olarak kısa tanımı yapılan manevra hareketi; manevra lokomotifinin, vagon veya vagon grubunu herhangi bir manevra hattından alması ya da manevra hattına bırakmasıdır. Demiryolu manevra maliyetleri çoğunlukla manevra hareketlerinden oluşan manevra alanına gelen yük vagonlarının manevra hatlarına alınması ve giden trenlerde bulunan yük vagonlarının manevra hatlarından sevk edilme maliyetlerini içermektedir.

Ülkemizde demiryolu ile yük ve yolcu taşımacılığını Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) altyapı işletmesi sağlamaktadır. Manevra alanlarında demiryolu araçlarının (lokomotif, vagon vd.) hareketlerinin planlanması, mevcut durumda manevra alanındaki görevli kişi tarafından yapılmaktadır. Manevra alanında vagonların sınıflandırılması manevra yöneticisinin kararları ile yürütüldüğünden maliyet ve performans ölçümleri etkin şekilde yapılamamaktadır. Bu çalışmada, demiryolu yük taşımacılığında manevra alanlarında gerçekleştirilen manevraların toplam manevra maliyetini en küçükleyecek şekilde belirlenmesi ile kaynakların etkin kullanımı ve yürütülen manevra faaliyetlerine ait performans ölçümüne katkı sağlamak amaçlanmaktadır.

Ele alınan Demiryolu Aracı Manevra Problemi (DAMP - Train Unit Shunting Problem) en düşük manevra maliyetini sağlayacak şekilde gelen ve giden vagonların manevra hatlarına park edilerek eşleştirilmesi olarak tanımlanabilir. DAMP'nin tanımı için manevra alanına gelen yük treninde bulunan gelen vagon, önceden belirlenmiş olan tren zaman çizelgesine göre giden yük treninde bulunan giden vagon ve manevra hattı tanımları bileşen olarak önceliklidir. DAMP için temel girdiler; belirli sayıda hatta sahip bir manevra sahası, her bir trenin varış-çıkış zamanlarını ve tren teşkilini (vagonların tipi ve trendeki sırasını) gösterir önceden belirlenmiş ve değişmeyecek bir tren zaman çizelgesi, her bir manevra hattında gerçekleştirilen manevra hareketine ait birim maliyetlerdir. Manevra maliyetleri doğrudan manevra hareket sayısına bağlıdır. Bu nedenle, en düşük manevra maliyetine ancak manevra sayısı en küçüklenerek ulaşılabilir. Özellikle demiryolu

hareketliliğinin yoğun yaşandığı yük taşımacılığında en düşük manevra sayısı ile manevra sahasındaki demiryolu trafiğini yönetmek demiryolu emniyeti açısından da kaçınılmazdır.

DAMP'nin tanımı için önemli kavramlardan biri olan bloklama, manevra hattına alınan herhangi bir vagonun (gelen veya giden) aynı manevra hattından hareket ederek varış veya çıkış yapması gereken başka bir vagonu engellemesi durumu olarak tanımlanır. Bu çalışmada DAMP için oluşturulan Tamsayılı Doğrusal Programlama (TDP) modelinde bloklama istenmeyen bir durumdur ve bloklamayı engelleyen kısıtlar modele dahil edilmiştir. DAMP'nin çözümü için önerilen TDP modelinde kullanılan günlük tren zaman çizelgesi (gelen ve giden trenlere ait teşkiller), manevra hat uzunlukları ve vagon uzunlukları gibi veriler TCDD işletmesi idaresinde olan Ankara ilinde bulunan Marşandiz Gar manevra sahasında gerçekleştirilen manevra işlemlerine aittir. TDP modeli GAMS yazılımı kullanılarak kodlanmış olup CPLEX çözücüsü kullanılarak ele alınan örnek manevra problemi için minimum maliyetli çözüm elde edilmiştir.

Ulaştırma sektöründe ana bileşenlerden olan demiryolları diğer ulaşım türleri ile rekabet edebilmek için önemli yapısal ve teknik gelişim süreçlerinden geçmektedir. Sürdürülebilir ve en iyi kaynak kullanımının gün geçtikçe kaçınılmaz hale geldiği demiryolu yük taşımacılığında, demiryolu işletmeciliğinin karmaşık yapısından dolayı oluşan birçok problem yönelim araştırmasının konuları arasındadır. Demiryollarında stratejik, taktik ve operasyonel düzeyde planlamalar çerçevesinde demiryolu ağı, demiryolu araçlarının planlanması, tren zaman çizelgeleme vb. konularda kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiş olsa da her düzeyde demiryolu planlamasını etkileyecek olan manevra planlaması için yapılan çalışmalar yoğunlukla yurtdışı kaynaklı çalışmalardır. Bu çalışmadaki motivasyon, ülkemizdeki demiryolu manevra alanlarında gerçekleştirilen günlük manevra hareketleri sırasında manevra hatlarının kapasitelerini, emniyet gerekliliklerini ve çeşitli işlevsel kısıtları da içerecek şekilde manevra hareket planlayıcılarına karar vermelerinde destek olmaktadır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde genel manevra ve demiryolu taşımacılığı manevra problemi hakkında çalışmaları içeren literatür araştırmasına yer verilmektedir. Sonraki bölümde; DAMP için girdiler, temel tanımlar ve ele alınan problem teorik bilgi başlığında paylaşılmaktadır. Dördüncü bölüm olan materyal ve yöntem başlığında TDP ile oluşturulan

önerilen matematiksel model açıklanmaktadır. Beşinci bölümde ele alınan problemin GAMS/CPLEX hesaplamaları ve çözümü gösterilmektedir. Son bölümde; çalışmanın özeti, ele alınan Marşandiz Gar manevra alanındaki planlama için elde edilen sonuçlar ve sonraki çalışmalar için düşünceleri içeren sonuç ve öneriler yer almaktadır.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Demiryolu taşımacılığı manevra planlaması hakkında yapılan çalışmaların son yıllarda arttığı görülmektedir. Bu bölümde genel manevra problemleri alt başlığında; hafif raylı ve şehir içi otobüs ile taşımacılıktaki; demiryolu taşımacılığı manevra problemi alt başlığında ise yolcu ve yük taşımacılığındaki manevra problemleri hakkında yapılmış çalışmaları inceleyen genel bir bakış sağlanmaktadır.

### 2.1. Genel Manevra Problemi

1980'lere kadar diğer alanlara göre demiryolu taşımacılığındaki planlama aşamalarında optimizasyon çalışmaları oldukça sınırlıdır. Demiryolu yük taşımacılığında ilk olarak kargo trenlerinin manevra süreçleri için Cordeau vd. (1998) tarafından araştırma yapıldığı görülmektedir (Tormos vd., 2006; Caprara vd., 2007).

Literatürde, hafif raylı sistemler için Blasum vd. (1999) tarafından Berlin'de (Almanya), yolcu tramvaylarının depolarında bir sonraki sabah zaman çizelgesine göre sıralanması ve raylara atanması ele alınmaktadır. İlgili çalışmadaki problem, şehir içi raylı sistem yöneticilerinin karar verdiği günlük planlamalarda karşılaştığı problem olan ertesi sabah çalışacak sırada yolcu tramvaylarının işlemedikleri akşam saatlerinde park edildikleri depolardaki uygun pozisyonlara atanmasıdır. Bu problemin küçük çapta bir örneğinin çözümü için dinamik programlama algoritması önerilmiş ve ayrıca bu çalışmada problemin NP-zor olduğu da gösterilmektedir.

Winter ve Zimmermann (2000) ise Almanya'nın Halle şehrinde şehir içi hafif raylı sistemlerin günlük planlanmasında gerçek zamanlı yolcu taşıyan araçların sevk işlemlerinde karşılaşılan dört farklı alt problemi ele almaktadır. Temel olarak hafif raylı araçların depoya varışlarından sonra çizelgedeki depodan çıkış zamanlarına kadar depoda uygun bir hatta atanmaları ve böylece en az manevranın yapılması amaçlanmaktadır. Almanya şehiriçi hafif raylı sistem verilerinin kullanıldığı çalışmada, Tamsayılı Doğrusal Programlama (TDP) ile en iyi sonucu bulmanın yanı sıra hafif raylı araçların depoya varışlarındaki gecikme süresine

de odaklanılmıştır. TDP ile ulaşılan en iyi sonuç ve gerçek zamanlı verileri kullanan sezgisel yaklaşımlar geliştirmişlerdir.

Blasum vd. ve Winter ve Zimmermann'ın ele aldığı hafif raylı sistem taşımacılığında araçların park yerlerine atanması probleminin, park alanındaki her bir hatta iki araç atanması durumunda bile NP-Tam olduğunu Eggermont vd. (2009) çalışmalarında göstermişlerdir.

Şehir içi otobüs ulaşımında gün içinde çalışmaları tamamlandıktan sonra otobüs park alanlarına çekilen ve ertesi gün sabahı tekrar sevk işlemleri gerçekleştirilen farklı tipte araçların, park alanlarına atanması problemini Hamdouni vd. (2006) ele almıştır. Bu araçların, park alanına önceden belirlenmiş zaman çizelgesine göre önce veya sonra şeklinde zaman sapmalarını da içeren varışlarını dikkate alan iki yaklaşım geliştirmişlerdir. Her iki yaklaşımda problem, TDP ile modellenmiş olup Montreal taşımacılık işletmesine ait gerçek veriler ile çözüm gerçekleştirilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Otobüs park alanları için diğer bir çalışma Gallo ve di Miele (2001) tarafından yapılmıştır. Bu tür depolara işi tamamlandıktan sonra sevk edilen araçlar çok dar alanlara park edildiğinden, herhangi bir aracın park alanını terk etmesi gerektiğinde bu durum, diğer birçok aracın yolu açmak üzere hareket etmesini (manevra) gerektirmektedir. İlgili çalışmada, bu tür bloklamalardan kaçınacak ve en küçük manevra maliyeti ile park alanlarına araçların atanmasını sağlayan “en az bloklama ile eşleştirme” ve “genelleştirilmiş atama” temellerine dayalı bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmada, otobüslerin sıralaması FIFO (ilk giren ilk çıkar) prensibine göre ele alınmaktadır. İtalya'nın Floransa Şehri Ulaşım işletmesine ait veriler kullanılarak çözümü gerçekleştirilen örnek problem için sonuçlar değerlendirilmiştir.

## **2.2. Demiryolu Taşımacılığında Manevra Problemi**

Hafif raylı ve şehir içi otobüs taşımacılığındaki araçların park alanlarına atanması problemlerini ele alan çalışmalar sonrası demiryolu yolcu ve yük taşımacılığı alt başlıkları için literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Caprara vd. (2007)'ne göre demiryolu yolcu taşımacılığında manevra problemi hakkında yapılan çalışmaların, yük taşımacılığına göre daha nadiren yapıldığı görülmektedir.

Tomii ve Zhou (2000) demiryolu depolarındaki manevra çizelgelemesini, kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi olarak çalışmışlardır. Manevra planlayıcıları için araç rotalama, bakım ve temizlik işlemlerini de göz önünde bulunduran manevra probleminin çözümü için genetik algoritma ve proje değerlendirme ve gözden geçirme tekniğini (PERT) kullanmışlardır. Çalışmalarında bloklamayı engelleyen kısıt, her bir manevra hattına sadece bir tip vagon atanması şeklindedir.

Demiryolu araçlarının ertesi sabah en az manevra hareketi ile sevk edilmesi alt problemini, araçların manevra hatlarında sıralaması olarak çalışan Di Stefano ve Koci (2004) çizge teorisi yaklaşımını kullanmıştır. DAMP'nin farklı durumları için en uygun sıralamayı araştıran çalışmada algoritmaya dayalı çözüm ve sezgisel yaklaşımlar önerilmiştir. İlgili çalışmanın temel amacı bu problemi zorlaştıran kısıtları araştırmaktır. Bu nedenle vagon ve manevra hat uzunlukları dikkate alınmadan zaman çizelgesine göre varış ve çıkış zamanları ile manevra hatlarının kullanım türlerine (tek yönlü hat veya serbest hat) odaklanılmıştır.

Manevra alanlarında, gelen vagonların varış yaptıkları tren teşkilinden ayrıştırılması, sınıflandırılması ve giden vagonların birleştirilerek tren teşkilinin oluşturulması işlemlerinin eşgüdümlü yapılabilmesini amaçlayan manevra alanı sevk planı He vd. (2000) tarafından önerilmektedir. Çalışmanın amacı manevra alanından zamanında çıkış yapacak vagon sayısını arttırmaktır. Önerilen bulanık sevk planının araştırılması için genetik algoritma tercih edilmiştir.

Dahlhaus vd. (2000) tarafından giden treni oluşturmak üzere gelen vagonların varış noktalarına göre yeniden birleştirilmesi şeklinde ele alınan tren manevra problemi için en az manevra hattının kullanılması amaçlanmıştır. Çin demiryolu taşımacılığı işletmesine ait verilerin kullanıldığı çalışmada ele alınan problemin NP-Zor olduğu gösterilmiştir.

DAMP'leri için dayanıklılık (robustness) kavramı Cicerone vd. (2009) tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada, manevra hatlarının elverişsizliği veya gelen vagonlarda beklenmeyen sıralama gibi girilen verideki uyumsuzlukların giderilmesi için kurtarma kurallarını kendi ürettikleri uygun çözüme uygulamışlardır. En iyilik ve dayanıklılık arasındaki ödünleşme ve uyumsuzlukların çoklu olduğu durumlarda çözüm üretmenin zorluğuna da değinilmiştir.

### 2.2.1. Yolcu Taşımacılığında Manevra Problemi

Demiryolu yolcu taşımacılığında manevra problemi ilk olarak Freling vd. (2002) tarafından tren-zaman çizelgesine göre faaliyeti tamamlanan yolcu vagonlarının belirli bir istasyona park edilmesi olarak ele alınmıştır. Manevra problemi birçok yönden değerlendirilmiş ve önerilen çözüme temel olacak iki alt probleme odaklanılmıştır. Bu iki alt problemin ilki; manevra alanına varış yapan her bir yolcu vagonunun alandan çıkış yapacak bir yolcu vagonu ile eşleştirilmesidir. Burada amaçlanan, aynı manevra hareketini gerektiren yolcu vagonlarının mümkün olduğunca birlikte dizi halinde tutulması ve böylece manevra sayısının en düşük seviyede tutulmasıdır. İkinci alt problem ise oluşturulan dizi halindeki yolcu vagonlarının bloklama oluşturmayacak ve manevra hattı uzunluk kapasitesini aşmayacak şekilde hatlara atanmasıdır. Bu iki alt problem temelinde, uygun bir park planı bulmak üzere küme kapsama problemi olarak ele alınan model, sütun türetme algoritması kullanılarak çözülmüştür. Önerilen model ile Hollanda demiryolu taşımacılığı idaresindeki Zwolle istasyonuna ait veriler kullanılarak elde edilen çözüm paylaşılmıştır.

Van den Broek (2017) tarafından manevra alanlarında bakım ve/veya temizlik (servis hizmetleri), park, eşleştirme ve sevk işlemleri gerçekleştirilen yolcu vagonları için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Manevra alanına gelen yolcu vagonlarının alandan çıkış yapacak vagonlarla eşleştirilmesi, servis işlemlerinin planlanması, vagonların park edilmek üzere manevra hatlarına atanması ve manevra alanından istasyonlara vagonların sevki şeklinde tanımlanan alt problemlerin bütünleşik çözümünü içeren manevra planlaması şeklinde yerel arama adıyla sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir. Hollanda demiryolu işletmesi Hague merkez istasyonu ve yakınında bulunan serbest yönlü manevra hatlarına sahip manevra alanında gerçekleştirilen işlemlere ait veriler kullanılarak önerilen yaklaşımla örnek bir problem için çözüm değerlendirilmiştir.

Lentink vd. (2008) ise manevra alanlarında gerçekleştirilen; gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi, dizi halindeki gelen vagonların varış platformlarından manevra hatlarına ve tam tersi yönde sevklerine ait maliyetlerin tahmini, vagonların manevra hatlarına park için atanmasını ve dizi halinde giden vagonların ilgili istasyonlara sevki şeklinde alt problemleri çalışmışlardır. Bütünleşik problem yerine alt problemler halinde çalışılması yönünden Lentink vd.nin (2008) çalışması, Freling vd. (2002)'nin çalışmasına

benzer bir yaklaşım içermektedir. Bu çalışmada da ele alınan gelen vagonların giden vagonlarla eşleştirilmesi alt probleminin çözümünde, Lentink vd. (2008) yolcu vagonları için Freling vd.nin önerdiği algoritmadaki dizi kavramını kullanmışlardır. Ayrıca park edilemeyen dizi halindeki vagonlar için ceza maliyeti modele eklenmiştir. Hollanda demiryolları işletmesine ait manevra alanları olan Zwolle ve Enschede'ye ait sırasıyla 24 ve 72 saatlik veri kullanılarak önerilen modele ait çözümler tartışılmıştır. Çalışmada önerilen yaklaşım ile Zwolle manevra alanındaki işlemlere uygun bir manevra planının üretilmesi için yirmi dakikaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Hollanda demiryolları idaresindeki Zwolle ve Enschede manevra alanlarında gerçekleştirilen yolcu taşımacılığını konu edinen diğer bir çalışma Kroon vd. (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. DAMP'nin bütünlük çözümü yerine, alt problemlerden ikisi olan gelen vagonların giden vagonlarla eşleştirilmesi ve park edilmek üzere manevra hatlarına atanması problemlerine odaklanılmıştır. Bu yaklaşımda bloklamayı engelleyen kısıtların fazlalığı problemin karmaşıklığını arttırmıştır. Zwolle manevra alanında aynı türde yolcu vagonlarının serbest yönlü manevra hatlarına atanmasına ait gerçek problem verileri ile önerilen model test edildiğinde CPLEX çözücünün uygun çözüm bulması için dahi çok fazla olan 339,739 adet bloklamayı engelleyen kısıtın olduğu belirtilmiştir. Kısıt sayısını azaltmak için bu kısıtların kümelenmesi ve kısıt gruplarının oluşturulması şeklinde bir yaklaşım tartışılmıştır. Bu yaklaşımla, ele alınan örnek problem için bloklamayı engelleyen kısıt sayısı 17,005 adede düşürülmüştür. Önerilen yaklaşım ve model ile daha büyük ölçekli problemlerin çözümü için saatlerce işlem süresine ihtiyaç duyulduğu ileriki çalışmalar bölümüne not düşülmüştür.

Akker vd. (2008), Kroon vd. (2006) tarafından tartışılan bütünlük yaklaşıma benzer bir yaklaşımı araştırmıştır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi alt türün pulman sayısı, türün ise yolcu vagonu türü olarak tanımlanması ışığında tren teşkillerini oluşturmak üzere eşleştirme ve uygun manevra hatlarına atamaların yapılması şeklinde çalışılan DAMP'nin çözümü için açgözlü (greedy) sezgisel ve dinamik programlama ile model oluşturulmuştur.



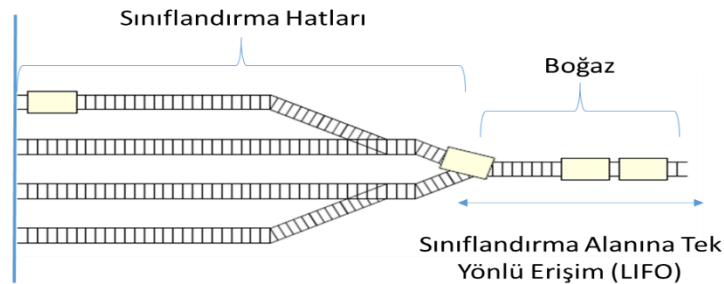
Şekil 2.1. ICM türünde 3 pulmanlı yolcu vagonu (Akker vd.den, 2008)

Sezgisel yaklaşım, çıkış yapacak vagonların doğru sırada teşkili için manevra hatlarına varış yapan vagonların atanması ve eşleştirme için kullanılmıştır. Dinamik programlama ise olası tüm manevra hat atamalarına ve eşleştirmeleri taramak üzere kullanılmıştır. Kroon vd.'nin önerdiği modelin aksine kullanılan iki yaklaşımda da gelen ve giden vagonların bekleme süreleri göz önünde bulundurulmuştur. Önerilen iki algoritma dışında bu çalışmada, DAMP için yerel arama ve tamsayılı doğrusal programlama çözüm yaklaşımlarına da yer verilmiştir.

Manevra alanında bakım veya temizlik gibi işlemlerin servis hizmetleri olarak ele alındığı ve bu işlemler sonrası vagonların park edilmek üzere hatlara atanması şeklindeki problemin çözümü için Jacobsen ve Pisinger (2011) bütünleşik bir yaklaşım önermişlerdir. Ele alınan problemde her bir vagon servis hizmeti sunan atölye veya tesiste işlem öncesi veya sonrası manevra hatlarına park edilmek üzere atanmaktadır. Bu çalışmada, hizmet sürelerini en küçükleyecek, sevk gecikmesine ve LIFO (son giren ilk çıkar, tek yönlü) türündeki manevra hatlarında bloklamayı engelleyecek şekilde manevra planlaması oluşturmak üzere güdümlü yerel arama, güdümlü hızlı yerel arama ve tavlama benzetimi gibi meta sezgisel yaklaşımlar önerilmektedir. Çalışmanın sonuçlarına göre yerel arama yaklaşımı ile elde edilen planların CPLEX çözücüsü ile elde edilen manevra planlarına benzer olduğu ve MIP çözücü ile 12 saat süren hesaplama süresinin saniyeler aldığı belirtilmiştir. Ancak büyük ölçekli problemlerin çözümü için önerilen yaklaşımın uygun olmadığı ve çalışmada rotalama ve eşleştirme gibi alt problemler ele alınmadığından gerçek zamanlı problemlerin çözümü için önerilen yaklaşımın eksik kaldığı görülmüştür.

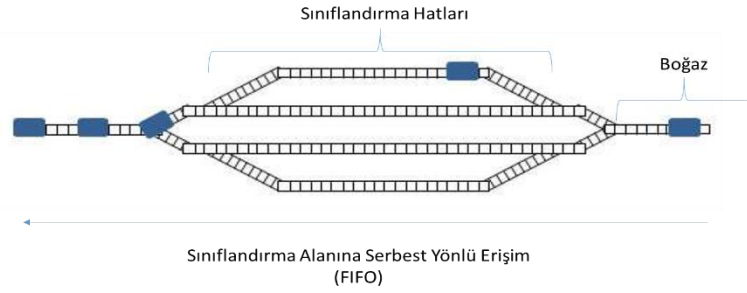
### 2.2.2. Yük Taşımacılığında Manevra Problemi

Demiryolu yük taşımacılığında manevra alanlarında gerçekleştirilen yük vagonlarının sıralanması problemini Gatto vd. (2009) işletme kısıtlarını ve manevra maliyetlerini göz önünde bulundurarak ele almışlardır. Zaman boyutunu göz ardı eden çalışmada; gelen vagonların paralel sınıflandırma hatlarına ataması, boğaz (hump) denilen yapıdan sıralı şekilde vagonların gönderimi ile yapılmaktadır. Ele alınan DAMP, istenen giden treni teşkil etmek üzere gelen vagonların nasıl sıralanacağı şeklinde tanımlanmıştır. Bu tanımlamada manevra alanına varış yapan bir trende bulunan yük vagonları boğaz öncesi ayrıştırılıp lokomotif kullanılmadan teker teker yer çekimi yardımıyla boğazdan hareket ettirilerek makaslar yardımıyla yön verilerek ilgili sınıflandırma hatlarına alınmaktadır. Şekil 2.2’de gösterildiği üzere sınıflandırma hattında tek yönlü erişim prensibine göre teşkil edilen tren lokomotif ile çekilerek boğazdan çıkış yapıp sevk edilmektedir. Tek yönlü erişim ile ilgili bilgi bölüm 3.1.2’de verilmiştir. Çalışmada manevra alanına varış yapan bir trende bulunan yük vagonlarının birden çok giden treni teşkil etmek üzere sınıflandırma alanlarına boğazdan yönlendirilmesi için çözüm araştırılmıştır. Manevra hatlarının ve yük vagonlarının uzunluklarını dikkate alan, lokomotif ile ilave manevra hareketlerine izin veren ve kullanılan manevra hat sayısı ve manevra sayısını en küçükleyecek çözüme odaklanılmıştır. Problem tanımlamalarında; manevra hatları, gelen vagonların hatlara atanması, teşkil edilen trenlerin hatlardan çekilmesi, sınıflandırma hatlarında vagonların sınıflandırılması adımları ele alınmıştır. Çalışmada giden trenlerin sıralanması, bu sırayı girdi olarak kullanan giden trenlerin sıralama adımının en küçüklenmesi ve sonsuz manevra hattı olması durumunda en az manevra hattının kullanılması problemlerinin çözümü için dizi kavramı kullanılmış olup temel algoritma yaklaşımları tartışılmıştır.



Şekil 2.2. Manevra Alanı ve Boğaz Yapısı (LIFO) (Gatto vd.den, 2009)

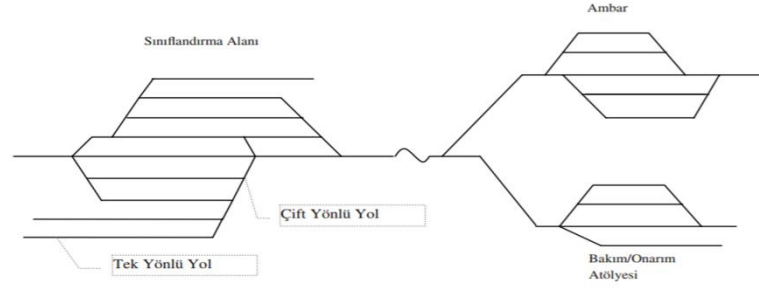
Beygang vd. (2010) yük taşımacılığında DAMP'ni; manevra alanına gelen vagonların aynı yöne gidecek olanlarının, giden trenleri teşkil etmek üzere en az sıralama hattı kullanılarak yeniden birleştirilmesi olarak çalışmışlardır. Bu çalışmada da Gatto vd.ne (2009) benzer şekilde önerilen çözüm yaklaşımında dizi kavramından yararlanılmıştır. Şekil 2.3'deki gibi serbest yönlü erişim prensibine göre çalışan en az manevra hattını kullanarak en az manevra sayısına ulaşmanın amaçlandığı çalışmada, en iyi amaç değeri için yeni bir alt sınır sunulmuştur. Serbest yönlü erişim ile ilgili detaylı bilgi bölüm 3.1.2'de verilmiştir. Alt ve üst sınır değerlerini tamsayıyla programlama ile elde eden yaklaşımda, en iyi çözümün elde edilmediği durumlar için de atanamayan gelen vagonu son vagonu atanmış yani teşkili tamamlanmış manevra hattına atamayı tercih eden ikinci bir algoritma olan bir sezgisel açgözlü algoritma önerilmiştir.



Şekil 2.3. Manevra Alanı ve Boğaz Yapısı (FIFO) (Beygang vd.den, 2010)

Alev vd. (2009) tarafından yük treni istasyonlarında hareket planlaması olarak ele alınan DAMP, gelen yük vagonlarının manevra hatlarına önceden belirlenen konumlara en az manevra sayısı ile atanması olarak çalışılmıştır. Manevra alanlarında gerçekleştirilen servis işlemlerini de modele dahil eden çalışmada; gelen vagonların yükleme/boşaltma, bakım/ onarım veya giden tren teşkili için manevra hatlarına park edilmesi gibi manevra hareketlerinin planlanması için modeller önerilmiştir. Bu çalışmada ele alınan manevra alanı Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Önceki her seviyede çözülmüş olan çizelgeleme probleminin çıktıları, geliştirilen modellerin girdilerini oluşturmuştur. Sınıflandırma alanında vagon konumlarını belirlemek üzere karma tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Modelin çözümünde dizi kavramına başvurulmuştur. Modelin çözüm süresini azaltmak amacıyla literatürde bulunan üç farklı sezgisel yöntem önerilmiş olup performans ölçümü haftalık toplam manevra sayısı ve kullanılan manevra hattı sayısı olarak ele alınmıştır.

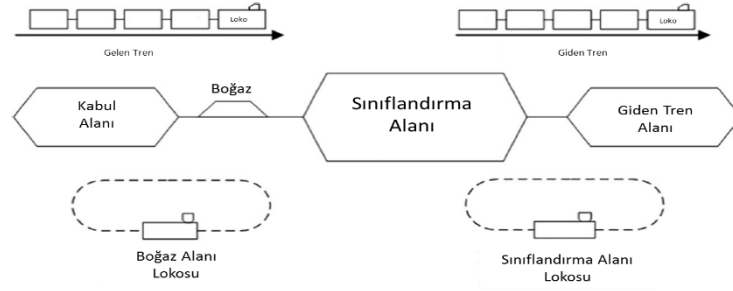




Şekil 2.4. Manevra Alanı (Alev vd.den, 2009)

Demiryolu yük taşımacılığında etkin ve etkili manevra planlamasının temel gereklilik olduğunu vurgulayan Gestrelus vd. (2013)'nin çalışmasında, farklı uzunlukta manevra hatları ve manevra alanına gelen ve giden trenlerin varış ve çıkış zamanları dikkate alınarak manevra planı oluşturulması hedeflenmiştir. Problem için tamsayı programlama modeli oluşturulmuş ve çözüm için sütun türetme ve dal-sınır algoritmaları önerilmiştir. Önerilen yaklaşımla, İsveç'te bulunan Hallsberg manevra alanına ait veriler kullanılarak örnek bir problem ele alınmıştır.

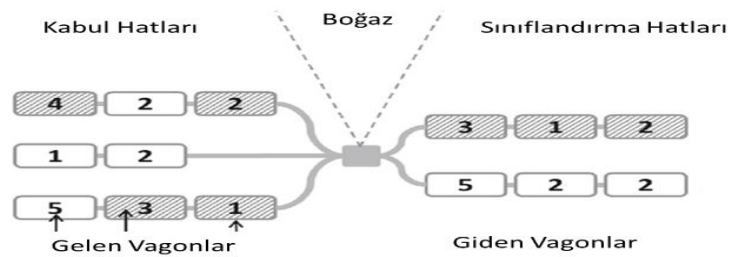
Shi ve Zhou (2015) tarafından manevra alanında gerçekleştirilen birçok planlama için bütünlük bir yaklaşım üzerinde çalışılmıştır. Ele alınan problem, manevra işlem planı problemi olarak tanımlanmıştır. Manevra alanı işlemleri arasındaki ilişkiyi tanımlamak üzere Şekil 2.5'te gösterilen boğazdan sınıflandırma alanına ve sınıflandırma alanından çıkış hattına vagonların taşınması için kullanılan lokomotifler için çizelgelemeyi de içeren zaman pencereli çok katmanlı şebeke akış modeli oluşturulmuştur. Karma tamsayı programlama modeli manevra alanı planının iyileştirilmesi için kullanılmıştır. Sınıflandırma alanlarındaki yük vagonu sayısına dayanan hacimsel kısıtları modellemek üzere birikimli akış gösteriminden faydalanılmıştır. Boğaz yapısı ile ayrıştırılan gelen vagonların sıralanması için de kümelenmiş akış atama modeli ve en erken teslim zamanlı sezgisel kurallara dayanan yaklaşım önerilmiştir.



Şekil 2.5. Manevra alanı (Shi ve Zhou'dan, 2015)

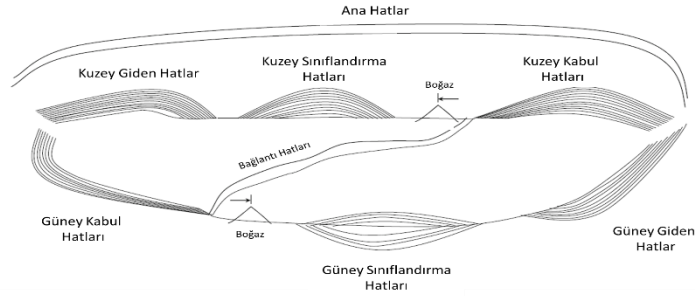
Literatürde genel olarak kabul alanı, boğaz, sınıflandırma alanı ve giden tren alanından oluşan manevra alanı planlamasında dört aşamadan söz edilmektedir. İlk aşama olarak manevra alanına gelen vagonların ayrıştırılarak, kabul hatlarına hatların uzunluğunu aşmayacak şekilde atanması problemi ele alınmıştır. Sonrasında giden tren teşkilini oluşturmak üzere gelen vagonların giden vagonlara eşleştirilerek atanması olan tren teşkil problemi çalışılmıştır. Üçüncü aşamada boğazdan hangi vagonun hangi sırada ve hangi lokomotif (loko) ile hangi sınıflandırma hattına atanacağı kararını içeren plan oluşturulmuştur. Son olarak teşkil edilen giden trenin sınıflandırma hattından giden tren alanındaki hangi hatta hangi lokomotif ile gönderileceği kararını içeren plan önerilmiştir.

Boysen vd.nin (2015) çalışmalarında ele alınan manevra alanı Shi ve Zhou'nun (2015) çalışmasındakine benzerdir. Ancak Boysen vd.nin (2016) çalışmasında Şekil 2.6'da gösterildiği üzere bütünlük yaklaşım yerine alt problem olan tren teşkil problemi yani gelen yük vagonlarının giden yük vagonlarına atanması çalışılmıştır. Alt problemin karmaşıklık düzeyini göstermek üzere ele alınan problem, üç farklı manevra durumuna göre çok düzeyli sırt çantası problemi olarak analiz edilmiştir. Problemin çözümünde dinamik programlama tabanlı sezgisel yaklaşımlar önerilmiştir. Önerilen yaklaşımlar türetilen örnek problemler üzerinden değerlendirilmiştir.



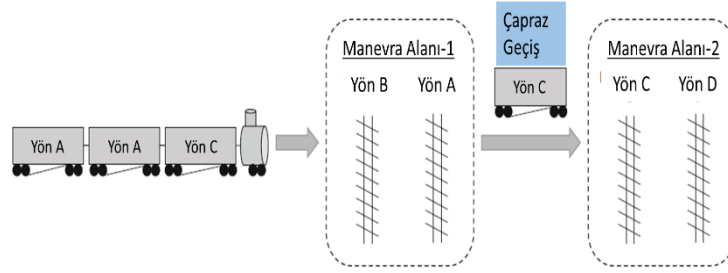
Şekil 2.6. Vagonların sınıflandırma alanına atanması (Boysen vd.den, 2015)

Otto ve Pesch (2016) ise birden fazla manevra alanından oluşan lojistik merkezler için çalışma yapmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada Şekil 2.7'deki gibi gelen yük vagonlarının hangi manevra sahasına atanacağı problemi ele alınmış ve problem türünün NP-Zor olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Kuzey ve güney yönlü çoklu manevra alanı (Otto ve Pesch'den, 2016)

Ele alınan problem yapı gereği diğer çalışmalardan farklı olarak manevra alt alanları (örnekte kuzey ve güney) arasında vagon taşınmasını Şekil 2.8'de gösterildiği gibi çapraz geçiş olarak tanımlamış ve önerilen modelde bu geçişleri en küçükleme amaçlanmıştır.



Şekil 2.8. Çoklu manevra alanı ve çapraz geçiş örneği (Otto ve Pesch'den, 2016)

Otto ve Pesch (2016) çalışmalarında hesaplamayı basitleştirmek ve hesaplama süresini azaltmak için tekli, ikili ve üçlü gelen tren senaryolarına göre üç farklı alt sınır önerilmiştir. Önerilen sınırları analiz etmek ve CPLEX'in alt sınırları ile karşılaştırmak üzere orta ve büyük ölçekli çoklu iki manevra alanı için örnek veriler türetilmiş ve yaklaşım değerlendirilmiştir. Karşılaştırma sonuçlarına göre; önerilen yaklaşımla elde edilen alt sınırlar için hesaplama süresinin örnek büyüdükçe CPLEX'in gerektirdiği süreye göre daha az olduğu görülmüştür.

### 3. DEMİRYOLU ARAÇLARI MANEVRA PROBLEMİ

Bu çalışma, manevra alanına gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi ve en az manevra hareketi ile manevra hatlarına atanması olarak tanımlanan DAMP'ne odaklanmaktadır. Önerilen yaklaşımda temel amaç manevra planlayıcılarına günlük karar vermelerinde destek olmak ve manevra planlamasına maliyet açısından temel oluşturmaktır.

Çalışmanın aşamaları şu şekilde özetlenebilir:

**DAMP'nin yük manevra taşımacılığı açısından analizi:** Özellikle yük taşımacılığı için trafiğin yoğunlaştığı manevra alanlarında gerçekleştirilen işlemlere ait problemler karmaşık yapılıdır. Çalışmada, bütünleşik manevra planlaması yerine alt problem olan gelen vagonların giden vagonlarla eşleştirilmesi ve manevra hatlarına atanması problemi ele alınmıştır. Ele alınan hali ile DAMP için problem tanımı alt başlığında temel gereksinimler ve varsayımlar detaylı olarak anlatılmıştır.

**Matematiksel model oluşturma:** Schijver (2003) tarafından önerilen manevra alanına gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi ve en az manevra hareketi (maliyeti) ile manevra hatlarına atanmasını amaçlayan tamsayılı doğrusal model tanımlanmıştır. Önerilen model, gelen vagonların bloklama olmadan manevra hatlarına giden vagonlar ile eşleştirilerek atanmasını sağlamaktadır. Önerilen model GAMS arayüzü kullanılarak kodlanmış olup CPLEX çözücüsü kullanılmıştır.

**Önerilen modelin doğrulanması:** Yük vagonlarının manevra alanındaki en düşük maliyetle hareketlerini planlama için önerilen modelin geçerliliği TCDD idaresinde ve Ankara ilinde bulunan Marşandiz Gar sahasında 2015 yılında trafik yoğunluğunun yaşandığı 24 saatte gerçekleştirilen işlemlere ait veriler kullanılarak elde edilen sonuçlar üzerinden değerlendirilmiştir.

### 3.1. Temel Tanımlar

Bu bölümde öncelikle DAMP için demiryolu yük taşımacılığında manevra alanı, manevra hattı, makas, manevra lokomotifi, yük vagonu gibi temel tanımlar; sonrasında ise çalışmada ele alınan DAMP için genel problem tanımını içeren çerçeve paylaşılacaktır.

Demiryolu araçları manevra problemi (DAMP) için öncelikle manevra tanımının doğru yapılması gerekmektedir. MEB'nın (2011) raylı sistemler teknolojisi ders notlarına göre manevra tanımı şöyledir:

“...trenlerin istasyonlardan gönderilmesi, istasyonlara kabulü veya durmadan geçişleri dışında lokomotif ve vagonlar ile diğer demiryolu çeken ve çekilen araçlarının tek tek veya birbirine bağlı olarak dağıtılması, toplanması veya birleştirilmesi veya tren teşkil edilmesi için yapılan tüm hareketlerdir.”

Tren teşkil planlamasında manevra sayısını azaltmak amacıyla dikkat edilen grup ve yön manevrası olmak üzere iki tip manevra söz konusudur.

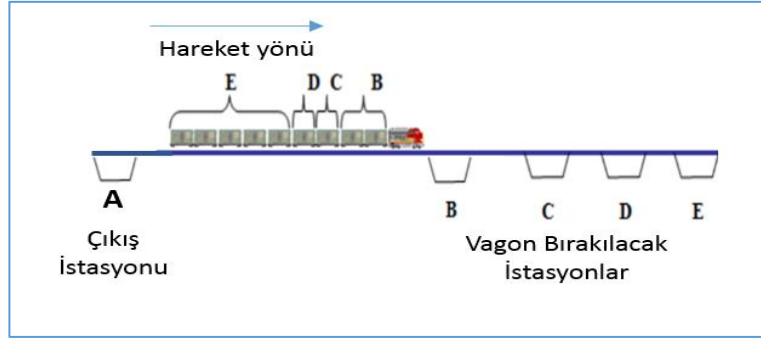
#### Grup Manevrası

Tren ilk çıkış istasyonundan gönderilirken, tren teşkili manevralarında aynı istasyona gidecek vagonların bir grup halinde birleştirilerek, trene verilmesidir. Bu şekilde teşkil edilen tren, çıkış istasyonundan varış istasyonuna kadar giderken manevra alanlarında ilgili trene vagon eklenecek ise tren dizisinde bulunan aynı yere ait vagonların olduğu gruba verilmesi sağlanır. Tren dizisinin bu biçimde gruplandırılmasında amaç, en az manevra yapılarak aynı varış yönüne ait vagonların tek seferde varış yerinde bırakılmasını sağlamaktır.

#### Yön Kavramı

Aynı istasyonlara ait olan vagonların bir grup halinde birleştirilmesinden sonra aynı yönde bulunan istasyonlara ait vagon gruplarının, bu yöne ve bu yöndeki istasyon sırasına göre bir tren dizisine sıra ile konulmasıdır. Bu işlem, manevranın bir sistem içinde en kısa sürede yapılmasını amaçlamaktadır.

Grup ve yön manevra türleri için örnek olarak Şekil 3.1’deki gibi teşkil edilmiş bir yük treni olduğunu varsayalım. Bu yük treni A istasyonundan E istasyonuna gitmektedir. A istasyonundan aldığı yükleri B, C, D ve E istasyonlarına bırakacaktır. Bu istasyonların yüklerinin trende yan yana bulunmasıyla grup manevra oluşturulmuş olur.



Şekil 3.1. Grup ve Yön Manevrası (MEB'den, 2011)

Tren teşkil edilirken ilk hangi istasyona varacak ise ilgili istasyonun vagonları lokomotifin hemen arkasında olacak şekilde gruplandırılır. İlgili istasyona varıldığı zaman istasyonun vagonları gruptan çıkarılır. Ayırıştırılan vagonlar manevra alanında bir hatta bırakıldıktan sonra tren yeni teşkil halinde kalan vagonlarla yoluna devam eder. Eğer bir kavşak noktasından geçiliyorsa ve diğer yöne gidecek vagonlar varsa bu vagonlar kavşak noktasında bırakılır. Böylece yön manevrası gerçekleştirilmiş olur. Örneğin; Şekil 3.1'deki gibi bir yük treninin çıkış istasyonu A, varış istasyonu ise E istasyonudur. Bu yük treninin A istasyonundan aldığı yükleri B, C, D ve E istasyonlarına bırakması gerektiği durumda, bu tren teşkil edilirken ilk önce hangi istasyona varış yapacak ise o istasyonun vagonları lokomotifin hemen arkasında olacak şekilde gruplandırılır. İstasyona varıldığı zaman bırakılması gereken vagonlar tren teşkilinden ayrılır.

Manevra tanımı sonrası ele alınan manevra alanının altyapısı, fiziksel kısıtları oluşturmaktadır. Manevra alanları boğaz kullanımının olup olmadığı, kabul ve sınıflandırma hatlarının konumu ve çoklu manevra alanlarından oluşma gibi altyapı koşullarına göre değişiklik gösterebilir. Farklı manevra alanlarına ait örneklere, literatür araştırması bölümünde değinilmiştir (Bkz. Şekil 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 ve 2.7). Manevra alanları, yük taşımacılığının yanı sıra yolcu taşımacılığı için de kullanıldığından konum olarak genellikle yolcu hizmetlerinin yürütüldüğü istasyon yakınında bulunur.

Yük taşımacılığında manevra hareketi Şekil 3.2’de örneği paylaşılan manevra lokomotiflerinin hareket kuvveti ile sağlanmakta olup vagonların kendi başlarına hareket etmeleri mümkün değildir. Ana demiryolu hattından ayrılan ve manevra alanına varış yapan trende bulunan gelen vagonlar, öncelikle birbirine paralel birden fazla hattan oluşan kabul alanlarına alınır ve bu hatlarda ayrıştırılır.



Şekil 3.2. Hibrit manevra lokomotifi (Aselsan, 2018)

Ayrıştırılan vagonlar; boğaz yapısı var ise yer çekimi yardımıyla, yok ise manevra lokomotifi yardımıyla sıralı olarak sınıflandırma hatlarına giden trenleri teşkil edecek şekilde gönderilir. Gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmek üzere hangi sınıflandırma hattına gönderileceği bir tür yönlendirmedir ve bu yönlendirme Şekil 3.3’de örneği gösterilen hat üzerindeki makaslar ile yapılmaktadır. Vagonların birbirlerine bağlanmasına örnek görsel Şekil 3.4’te ve manevra alanına örnek olarak yurtdışından bir görsel Şekil 3.5’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Manevra hattı makas örneği (TCDD Taşımacılık'tan, 2019)



Şekil 3.4. İki vagonun birbirine bağlanması



Şekil 3.5. Almanya Vorhalle manevra alanı (Boysen vd.den, 2015)

Manevra alanında planlayıcı için diğer bir fiziksel kısıt, manevra hatlarına erişim şeklindedir. Demiryolu araçları, demiryolu hatları üzerinde tekerlek ve ray arasındaki metal-metal ilişkisi ile tek yönlü serbest hareket eden araçlardır. Raylardan oluşan manevra hatlarına erişim türleri Şekil 3.6'da gösterilmektedir.





Şekil 3.6. Manevra hattı erişim türü (Broek'den, 2017)

Şekil 3.6'da gösterildiği üzere; 1 ve 2 numaralı vagonların manevra hattına alınması A ve B yönlerine göre hatta erişim olup olmadığına göre belirlenmektedir. LIFO manevra hattı, tek yönlü manevra yapılabilen manevra hattıdır. Serbest (FIFO) manevra hattı ise, her iki yönde de erişimin olduğu manevra hattıdır.

### 3.2. DAMP Tanımı

Bu çalışmada odaklanılan DAMP (Demiryolu Araçları Manevra Problemi - Train Unit Shunting Problem) manevra alanlarına gelen vagonların, giden treni teşkil edecek şekilde giden vagonlar ile eşleştirilmesi ve manevra hatlarına atanmasıdır. Manevra planlayıcısı genel olarak birden çok alt problemi içeren 24 saatlik manevra planını oluşturmaktadır. Planlayıcının karar alması gereken temel adımlar aşağıdaki gibidir:

- ✓ Manevra alanına varış yapan trenin kabul hatlarına atanması ve gelen vagonların ayrıştırılması.
- ✓ Ayrıştırılan gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi.
- ✓ Eşleştirilen vagonların sınıflandırma hatlarına uygun sırada atanması ve giden trenin teşkil edilmesi.
- ✓ Teşkilî tamamlanan trenlerin çıkış hatlarına atanması ve manevra alanını terk etmesi.

Bu kararlardan ikinci sırada yer alan eşleştirme ve atama esnasında planlayıcı; giden tren teşkiline uygun vagonların sıralanması, manevra sayısını arttırmak anlamına gelen bloklamaların engellenmesi ve manevra hattı uzunluğunun aşılmaması kısıtlarını da göz önünde bulundurmalıdır. Gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi ve manevra hatlarına atanmasının yanı sıra planlayıcı; vagonlar için temizlik, bakım ve onarım gibi servis işlemlerini de planlamak durumundadır. Bu tür servis hizmetlerinin planlanması için

gerekli süre ve maliyet verilerinin eksikliği nedeniyle servis hizmetleri bu çalışma kapsamına dahil edilmemiştir. Manevra planlayıcısının bu çalışmada ele alınan DAMP için göz önünde bulundurması gereken girdiler;

- önceden belirli olan ve değişmeyen trenlerin manevra alanına varış ve alandan çıkış zamanlarını ve tren teşkilleri (vagonların sayısı ve trendeki sırasını) gösterir zaman çizelgesi,
- manevra kabul hatlarının erişim şekli, sayısı ve uzunluğu,
- gelen ve giden vagonların uzunlukları ve gidiş yönleri şeklindedir.

DAMP için Lentink vd. (2006) eşleştirme, park etme, rotalama ve servis işlemleri (temizlik, bakım, onarım vd.) başlıklarında dört farklı alt problem tanımlamıştır. Öncelikle DAMP'nin daha anlaşılır olması adına bu alt problemlerden ele alınan eşleştirme ve park etme alt problemleri detaylı olarak paylaşılmaktadır.

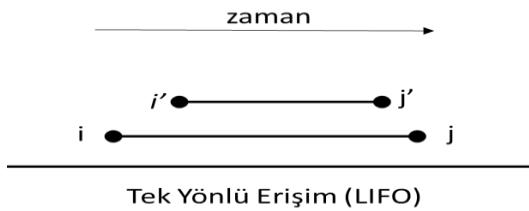
### **3.2.1. Eşleştirme ve manevra hatlarına atama**

Manevra alanına gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi ve uygun manevra hatlarına atanması olarak ele alınan DAMP'ni kapsamlı açıklaması için manevra alanında işlem yapılan gelen vagon, giden vagon, manevra lokomotifi, grup ve yön manevrası gibi tanımlar ikinci bölümde paylaşılmıştır. Bu tanımlar ışığında yük taşımacılığında DAMP'ne özgü nitelikler açıklanacaktır.

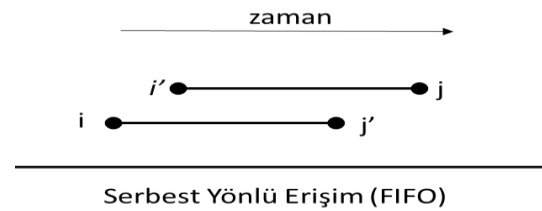
Demiryolu yük taşımacılığında yük tren teşkilleri farklı türde ve farklı varış noktalarına ait vagonlardan oluşmaktadır. Yük trenlerini çeken bir veya birden fazla lokomotif olabilmektedir. Yük taşımacılığında manevra alanlarında yolcu taşımacılığından farklı olarak vagon türü yerine vagonların varış noktalarına göre gruplar belirlenmektedir. Özetle, aynı yöne gidecek farklı türde yük vagonları aynı trende teşkil edilebilirken yolcu trenleri için bu mümkün olmamaktadır. Buradaki grup kavramı yolcu taşımacılığı manevra planlamasında geçen dizi kavramından farklıdır. Manevra hattına atanan gelen vagonlar, bu hatlarda giden vagonlar ile eşleştirildiğinde her bir manevra hattında teşkil edilen giden trenin varış rotası da belirlenmiş olur. Yük taşımacılığındaki DAMP için elde edilen sonuç giden tren teşkilindeki vagon sıralamasının yanı sıra trenin rotasını da içermektedir. Bu

bölümde paylaşılan eşleştirme ve manevra hatlarına atama problemi, tren zaman çizelgelerine göre tren teşkilinin ve manevra alanına varış ve çıkış zamanlarının bilinmesi durumunda planlayıcının gelen vagonlar ile giden vagonları eşleştirmesi olarak tanımlanmıştır. Manevra alanına gelen vagonların giden vagonlarla eşleştirilerek uygun manevra hatlarına atanması için alana varış ve çıkış zamanları arasındaki sürenin uygun olması gerekmektedir. Bu çalışmada bu sürelerin yeterli olduğu varsayımıyla hareket edilmiştir. Planlayıcının gelen vagonları giden vagonlar ile eşleştirmesinin yanı sıra manevra hatlarına vagonların atanması aşamasında fiziksel kısıt olan manevra hattının erişim türü ve hattın uzunluğu şeklindeki kapasite kısıdının da göz önünde bulundurulması demiryolu emniyeti açısından zorunludur. Manevra hatlarına atanan vagonların toplam uzunluğunun hat uzunluğunu aşması durumunda diğer paralel hatlardaki demiryolu araçları ile çarpışma meydana gelebilmektedir. Demiryolu emniyeti açısından çarpışma kazalarını önlemek amacıyla hat uzunluklarını aşmayacak şekilde vagon atamalarının yapılması bu nedenle esastır.

Manevra hattına erişim şeklinin, eşleştirilen vagonların manevra hatlarına atanması alt problemini nasıl etkilediği küçük bir örnekle Lentink (2006) tarafından açıklanmıştır. Manevra alanına gelen aynı türdeki  $i$  ve  $i'$  vagonlarının, yine aynı türdeki  $j$  ve  $j'$  olarak giden vagonlar ile eşleştirilmesi gerektiğini varsayalım. Manevra alanına vagonların geliş ve gidiş zaman sıralamasının bilindiği ve bu sıralamanın  $i$  (geliş)  $<$   $j$  (çıkış)  $<$   $i'$  (geliş)  $<$   $j'$  (çıkış) şeklinde olduğu durumda tek yönlü ve serbest erişimli manevra hatlarında yapılacak olası eşleştirmenin nasıl olacağı Şekil 3.7 ve 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Tek yönlü manevra hattında eşleştirme (Lentink'den, 2006)



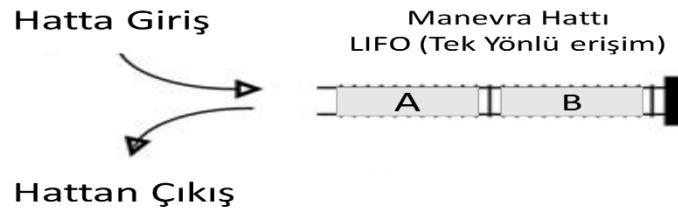
Şekil 3.8. Serbest yönlü manevra hattında eşleştirme (Lentink'den, 2006)

Şekil 3.7’de;  $i$  vagonu, manevra alanına  $i'$  vagonundan önce varış yapmaktadır ve  $j$  vagonunun manevra alanını,  $j'$  vagonundan önce terk etmesi gerekmektedir. Eğer Şekil 3.8’deki serbest hatta gerçekleşen eşleştirme, tek yönlü hatta yapılırsa alandan önce çıkış yapması gereken  $j$  vagonunun,  $j'$  vagonu hattın alınmadan çıkış yapamayacağı görülmektedir. Bu durumda,  $j'$  vagonu  $j$  vagonunu bloke etmiş olacaktır.

### 3.2.2. Manevra alanında bloklama

DAMP için temel amaç olan manevra maliyetini en küçükleme üzere önemli diğer bir kavram da bloklama değildir. Bu kavram, Gallo ve Di Miele (2001) tarafından, faaliyetini tamamlayan otobüslerin; park alanlarındaki pozisyonlara, ertesi günün sabahında en az manevra hareketi gerektirecek şekilde atamasını ele alan çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada bloklama, park alanından çıkış yapacak her otobüs için yolu açmak üzere diğer araçların hareket ettirilmesi olarak tanımlanmış olup modelde manevra hareketinin en küçülenmesi amaçlandığından bu tür bloklamalara izin verilmemiştir.

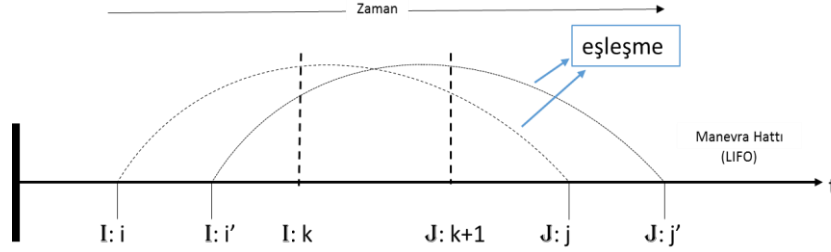
DAMP için istenmeyen ve engellenmeye çalışılan durum, manevra hatlarında herhangi bir vagonun manevra alanına kabul veya alandan çıkışı sırasında diğer bir vagonun bu harekete izin vermemesi olarak tanımlanır. Tek yönlü manevra hattındaki bloklama Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Tek yönlü manevra hattında bloklama örneği

Şekil 3.9.’da örneklendiği üzere tek yönlü manevra hattına atanmış B vagonunun, A vagonundan önce bulunduğu hattın hareket ettirilmesi gerektiğinde A vagonu hattın alınmadan B vagonu hareket edemeyecektir. Bu durumda bloklama kaçınılmaz olacaktır. Bu tür bloklamaların olduğu manevra planları manevra sayısını arttıracığından bloklamanın engellendiği modeller DAMP için uygun çözümler verecektir.

Demiryolu manevra alanlarında yaşanan bloklama durumuna zaman penceresinden bakan diğer bir örnek ise Şekil 3.10'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.10. Tek yönlü manevra hattında bloklama örneği (Lentink'den, 2006)

Örneği Şekil 3.10'da gösterilen gelen vagon kümesinde bulunan  $i$  ve  $i'$  vagonları, giden vagon kümesindeki  $j$  ve  $j'$  vagonları ile sırasıyla eşleşmiş ve tek yönlü manevra hattına atanmış ise giden  $j$  vagonunun hattan çıkışı  $j'$  den önce gerçekleşeceğinden gelen  $i'$  vagonu giden  $j$  vagonunun hareketini engellemiş olacaktır. Bu eşleştirme ve manevra hattına atama durumunda bloklama meydana gelmiş demektir.

Bloklamaya diğer bir örnek Haahr vd.nin (2015) yolcu taşımacılığı için yaptıkları çalışmadan verilebilir. Manevra alanına varış ve alandan çıkış yapan vagonlara ait girdiler Çizelge 3.1'deki gibidir. Her bir durum belirli bir zamanda geliş veya gidiş şeklinde ve vagon türüne göre gerçekleşmektedir. Vagonların uzunlukları türlerine göre sırasıyla a: 200 metre, b: 100 metre ve c: 100 metre olarak verilmektedir. Alana gelen her vagon giden bir vagonla eşleşmelidir, eşleşmez ise bu vagon hatta park edilmelidir.

Çizelge 3.1 Bloklama örneği için girdiler (Haahr vd.den, 2015)

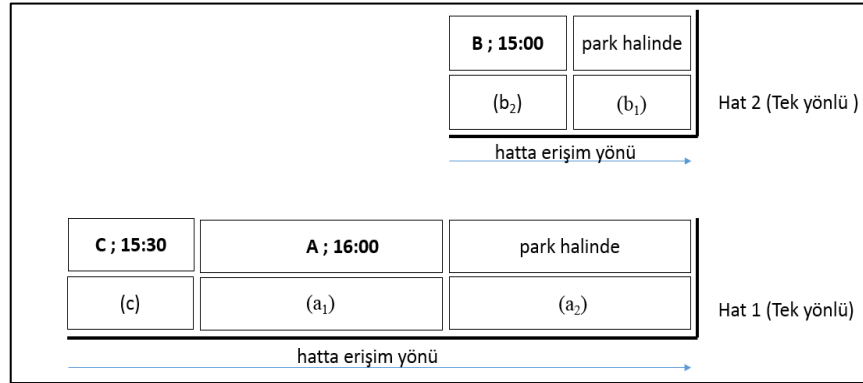
| Durum        | Vagon Türü | Vagon Uzunluğu (m) | Zaman        |
|--------------|------------|--------------------|--------------|
| Gelen        | $a_1$      | 200                | 12:00        |
| Gelen        | $a_2$      | 200                | 12:30        |
| Gelen        | $b_1$      | 100                | 13:00        |
| Gelen        | $c$        | 100                | 13:30        |
| Gelen        | $b_2$      | 100                | 14:00        |
| <b>Giden</b> | <b>B</b>   | <b>100</b>         | <b>15:00</b> |
| <b>Giden</b> | <b>C</b>   | <b>100</b>         | <b>15:30</b> |
| <b>Giden</b> | <b>A</b>   | <b>200</b>         | <b>16:00</b> |

Çizelge 3.1’de girdileri paylaşılan problem için 550 m. ve 200 m. uzunluğunda iki farklı manevra hattında gerçekleştirilen 1 ve 2 numaralı eşleştirmeler Çizelge 3.2’de gösterilmektedir. Eşleştirmelerin bulunduğu Çizelge 3.2’de 1 numaralı eşleştirme örneği uygun değildir. Çünkü hatta park edilen (\*)  $b_2$  vagonu giden herhangi bir vagonla eşleştirilmemiş olup  $b_1$  vagonunun saat 15:00’de b vagonu olarak hattan çıkışını engellemektedir.

Çizelge 3.2. Eşleştirme örnekleri (Haahr vd.den, 2015)

| Eşleştirme 1                   | Eşleştirme 2                   |
|--------------------------------|--------------------------------|
| ( $b_1$ ile B)                 | ( $b_2$ ile B)                 |
| (c ile C)                      | (c ile C)                      |
| ( $a_1$ ile A)                 | ( $a_1$ ile A)                 |
| ( $a_2$ park halinde / $p^*$ ) | ( $a_2$ park halinde / $p^*$ ) |
| ( $b_2$ park halinde / $p^*$ ) | ( $b_1$ park halinde / $p^*$ ) |

Ele alınan eşleştirmelerden, Çizelge 3.2.’deki 2 numaralı eşleştirme herhangi bir bloklama oluşmadığı için uygundur. Hat 1 (550 m) ve hat 2 (200 m) manevra hatları kullanılarak oluşturulabilecek uygun eşleştirmenin manevra hatlarında nasıl gerçekleştirildiği Şekil 3.11.’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Eşleştirme 2'nin manevra hatlarında gösterimi (Haahr vd.den, 2015)

Haahr vd.nin (2015) çalışmasında ele alınan eşleştirme örneğinde tren zaman çizelgesine göre manevra hattından çıkış sırasıyla c, b ve a vagonları şeklindedir. Manevra hat uzunlukları, vagon türleri ve manevra alanından çıkış zamanları göz önünde bulundurularak bloklamayı engelleyecek eşleştirme 2 numaralı eşleştirme olup;

- gelen  $b_2$  vagonu hat 2’de, saat 15:00’da gidecek b vagonu ile,
- gelen c vagonu hat 1’de, saat 15:30’da gidecek c vagonu ile,

- gelen  $a_1$  vagonu hat 1'de, saat 16:00'da gidecek a vagonu ile eşleştirilmiştir.

Gelen  $a_2$  ve  $b_1$  vagonları ise giden herhangi bir vagonla eşleştirilmeden atandıkları hatlara park edilmiştir.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde öncelikle ele alınan Demiryolu Araçları Manevra Problemi (DAMP) için önerilen Tamsayı Doğrusal Programlama (TDP) modeli açıklanmış olup modele ait gösterimler, amaç fonksiyonu, kısıtlar ve kabuller hakkında detaylara yer verilmiştir. Demiryolu yük taşımacılığında ele alınan DAMP için manevra hatlarına gelen vagonların, manevra alanından sevk edilecek tren teşkilini oluşturmak üzere giden vagonlar ile eşleştirilmesinin ve manevra hatlarına atanmasının en az manevra maliyeti ile sağlanması amaçlanmaktadır. Amacı manevra maliyetini en küçükleme olan DAMP için aşağıdaki girdilere ihtiyaç duyulmaktadır.

1. Manevra alanının altyapısı: Manevra hatlarının sayısı, uzunluğu ve bu hatların erişim türünü (tek veya çift yönlü) içeren bilgiyi ifade eder.
2. Tren zaman çizelgesi: Manevra alanına varış yapan ve alandan çıkış yapan trenlerin zamanları ile tren teşkillerini (gelen ve giden vagonların dizilimi ve gidecekleri yönleri) gösterir sıralamadır.
3. Manevra maliyeti: Manevra hatlarına alınan veya bu hatlardan sevk edilen vagon başına birim maliyeti ifade eder.

### 4.1. DAMP İçin Varsayımlar

Bu çalışmada ele alınan DAMP için varsayımlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- ✓ Belli bir manevra alanında bulunan manevra hatlarının sayısı ve uzunlukları bellidir. Manevra hatları tek yönlü erişilebilir hatlar olup bu hatlara vagon atanması LIFO prensibine göre yapılmaktadır.
- ✓ Planlama süresi 24 saat olarak belirlenmiştir. Planlama döneminde trenlerin manevra alanına varış ve alandan çıkış sıraları belli ve değişmemektedir.
- ✓ Manevra alanına gelen ve alandan sevk edilen vagonların türleri farklı olmakla birlikte aynı yöne gidecek vagonlar, türlerine bakılmaksızın aynı manevra hattına atanarak giden tren teşkilini oluşturmak üzere birleştirilir.



- ✓ Manevra alanına gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi aşamasında bloklamaya ve manevra hattı uzunluğunun aşılmasına izin verilmemektedir.
- ✓ Manevra alanından bakım, onarım, temizlik ve diğer servis işlemleri için gönderilen vagonların rotalama maliyetleri manevra maliyetine dahil edilmemiştir. Manevra alanına gelen vagonların manevra hatlarına atanamaması durumu için ceza maliyeti söz konusu değildir.

## 4.2. TDP Modeli

DAMP'nin çözümü için Schrijver (2003) tarafından önerilen yolcu vagonlarının manevra hatlarına bloklama olmadan uygun şekilde atanmasını amaçlayan karma tamsayılı doğrusal programlama modeli bu çalışmada araştırılmıştır. Önerilen model bloklamayı engelleyecek şekilde gelen vagonların giden vagonlarla eşleştirilerek minimum manevra maliyeti ile manevra hatlarına hat uzunluklarını aşmayacak şekilde atanmasına odaklanmaktadır. Schrijver'in önerdiği yolcu taşımacılığı için geçerli modelde, tek tür gelen veya giden vagonlar söz konusudur ve manevra hattına vagon atama ve hatlardan istasyonlara vagon gönderme maliyeti hatlara göre değişmemektedir. Bu çalışmada ise yük taşımacılığında DAMP'nin çözümü; aynı yöne giden farklı türde vagonların, vagon başına birim manevra maliyetinin farklı olduğu manevra hatlarına bloklama olmadan ve hat uzunluğu aşılmadan atanması şeklinde araştırılmıştır. Bu bölümde çalışılan TDP modelinin kümeler, indisler, parametreler ve karar değişkenlerini içeren matematiksel gösterimleri, amaç fonksiyonu ve kısıtları alt başlıklar halinde açıklanmaktadır.

### 4.2.1. Matematiksel gösterim

TDP modeli için kullanılan kümeler, indisler, parametreler ve karar değişkenleri izleyen şekilde tanımlanmıştır. Modelin girdilerinden olan gelen ve giden vagonların manevra alanına varış ve manevra alanından çıkış zamanları yerine sıralamaları önemlidir. Örneğin  $I = \{i_1, i_2, i_3, i_4, i_5\}$  gelen vagon kümesindeki sıralama ile vagonlar manevra hatlarına atanabilir. Benzer şekilde  $J = \{j_1, j_2, j_3, j_4, j_5\}$  giden vagon kümesinde de manevra alanından gönderilecek giden vagonlar bu sıralamada işlem görebilir. Örnek olarak, gelen ve giden vagonların manevra hattına atanma veya hattan gönderilme işlem sıralaması ise Genel Sıralama Kümesi =  $\{i_1, i_2, i_3, j_1, i_4, j_2, j_3, i_5, j_4, j_5\}$  şeklinde gösterilebilir.

Kümeler:

$I = \{1, 2, \dots, n\}$  gelen vagonların kümesi

$J = \{1, 2, \dots, m\}$  giden vagonların kümesi

$T = \{1, 2, \dots, t\}$  manevra hattı kümesi

$L_* = \{1, 2, \dots, l\}$

$L_i$ : gelen  $i$ . vagon uzunluğu;  $L_j$ : giden  $j$ . vagon uzunluğu;  $L_t$ :  $t$ . hat uzunluğu

İndisler:

$i \in I$  Gelen vagon indisi

$j \in J$  Giden vagon indisi

$t \in T$  Manevra hattı indisi

$l_* \in N$  Uzunluk indisi

Parametreler:

$n = |I|$  Gelen vagon sayısı

$m = |J|$  Giden vagon sayısı

$p = |T|$  Manevra hattı sayısı

$l_i$  Gelen  $i$ . vagon uzunluğu  $i \in I$

$l_j$  Giden  $j$ . vagon uzunluğu  $j \in J$

$l_t$   $t$ . manevra hattı uzunluğu  $t \in T$

$c_t$  Gelen/giden her vagon için  $t$ . manevra hattına atanma maliyeti  $t \in T$

$\tau_i$  Gelen  $i$ . vagon türü (varış yönü  $i \in I$ )

$\tau_j$  Giden  $j$ . vagon türü (varış yönü  $j \in J$ )

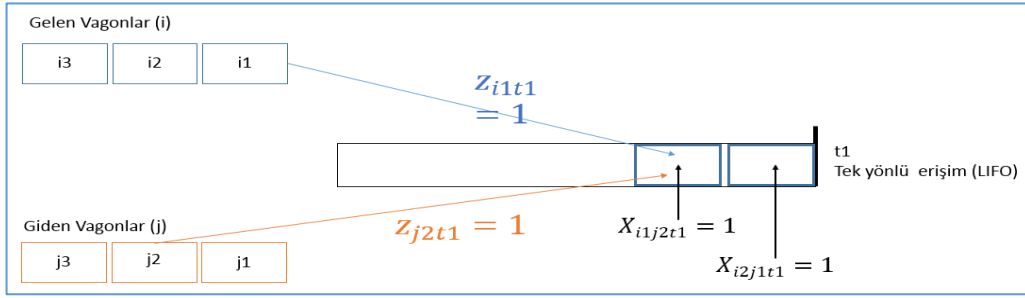
Karar Değişkenleri:

$$Z_{it} = \begin{cases} 1, & \text{gelen } i. \text{ vagon } t. \text{ manevra hattına atanıyor ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$Z_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{giden } j. \text{ vagon } t. \text{ manevra hattına atanıyor ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$X_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{gelen } i. \text{ vagonun giden } j. \text{ vagon ile } t. \text{ manevra hattında eşleşmiş ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$I$  ve  $J$ , sırasıyla gelen ve giden vagonların sıralı kümesini göstermektedir. Gelen ve giden vagonlar varış ve çıkış zamanlarına göre sıralanmıştır. Her bir vagon gelen  $\tau_i$  veya giden  $\tau_j$  olarak belli bir türe (varış yönüne) sahiptir. Gelen bir vagon giden bir vagon ile ancak aynı yöne gidecek ise yani ( $\tau_i = \tau_j$ ) ise eşleştirilebilir. Yön ve varış/çıkış zamanlarına göre  $I$  kümesine ait gelen her  $i$  ( $i \in I$ ) vagonunun eşleştirildiği  $J$  kümesine ait giden  $J_i$  ( $J_i \subseteq J$ ) vagon kümesi vardır. Örneğin,  $J_{i_1}$  alt kümesi gelen  $i_1$  vagonundan sonra gidecek ve  $i_1$  gelen vagonu ile aynı türden olan giden vagonların kümesini gösterir. Benzer şekilde  $J$  kümesine ait giden her  $j$  ( $j \in J$ ) vagonunun eşleştirildiği gelen  $I_j$  ( $I_j \subseteq I$ ) vagon kümesi bulunmaktadır. Örneğin,  $I_{j_1}$  alt kümesi giden  $j_1$  vagonundan önce varış yapan ve  $j_1$  giden vagonu ile aynı türden olan gelen vagonların kümesini gösterir. Her gelen vagonun uzunluğu  $l_i$  ( $i \in I$ ) ve giden her vagonun uzunluğu ise  $l_j$  ( $j \in J$ ) olarak gösterilmiştir. Manevra hatlarının kümesi ( $T$ ) ve  $t$ . Manevra hattının uzunluğu  $l_t$  olarak gösterilmiştir. Gelen veya giden bir vagonun  $t$ . manevra hattına atanmasının maliyeti ise  $c_t$  olarak gösterilmiştir. Karar değişkenlerinin modeldeki eşleştirme ve atama yapısı özetle Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 TDP modeli eşleştirme ve atama yapısı

Şekil 4.1’de anlatıldığı üzere modelde; ikili değişken olan  $Z_{it}$ , ancak ve ancak gelen vagon  $i$  ( $i \in I$ ), manevra hattı olan  $t$ ’ye ( $t \in T$ ) atanmış ise 1 değerini alır. Benzer şekilde  $Z_{jt}$ , ancak ve ancak giden vagon  $j$  ( $j \in J$ ), manevra hattı olan  $t$ ’ye ( $t \in T$ ) atanmış ise 1 değerini alır. Ayrıca, diğer bir ikili değişken olan  $X_{ijt}$ , ancak ve ancak gelen vagon  $i$  ( $i \in I$ ),  $t$ . manevra hattında ( $t \in T$ ) giden vagon  $j$  ( $j \in J$ ) ile eşleşmiş ise 1 değerini alır.

#### 4.2.2. Amaç fonksiyonu

Manevra alanına gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi ve en az manevra hareketi ile manevra hatlarına atanması için önerilen modelde (4.1) numaralı amaç fonksiyonu, doğrudan manevra sayısı ile bağlantılı olan manevra maliyetini en küçüklemektedir.

$$\text{enk} \sum_{t \in T} c_t \left( \sum_{i \in I} z_{it} + \sum_{j \in J} z_{jt} \right) \quad (4.1)$$

Amaç fonksiyonu eşitliği; gelen ve giden vagonların manevra hatlarına atanma sayısı olarak ulaşılan toplam manevra sayısı ile manevra hatlarındaki birim manevra maliyetinin çarpımı şeklindedir. Gelen veya giden vagonun bir manevra hattına atanmaması durumu için ceza maliyeti toplam manevra maliyetine dahil edilmemiştir.

### 4.2.3. Kısıtlar

Önerilen TDP modelinde ele alınan; manevra alanına gelen ve alandan tren teşkili ile giden vagonların manevra hattına mutlaka atanması, manevra hattına atanan gelen vagonun giden bir vagonla mutlaka eşleştirilmesi, bloklamanın engellenmesi ve manevra hat uzunluğunun aşılması kısıtları bu bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

#### Vagonların manevra hatlarına atanma kısıtları:

$$\sum_{t \in T} z_{it} = 1, \quad i \in I, \quad (4.2)$$

$$\sum_{t \in T} z_{jt} = 1, \quad j \in J, \quad (4.3)$$

Manevra alanına gelen her bir vagonun belli bir manevra hattına atanmasını (4.2) numaralı kısıt sağlamaktadır. Benzer biçimde (4.3) numaralı kısıt, manevra alanından giden her vagonun belli bir manevra hattına atanması için kullanılmıştır.

#### Eşleştirme kısıtları:

$$z_{it} = \sum_{j \in J_i} X_{ijt}, \quad t \in T, \quad i \in I, \quad (4.4)$$

$$z_{jt} = \sum_{i \in I_j} X_{ijt}, \quad t \in T, \quad j \in J, \quad (4.5)$$

Manevra alanına gelen  $i$  vagonunun eğer manevra hattı  $t$ 'ye atanır ise burada uygun bir giden  $j$  vagonu ile eşleştirilmesini (4.4) numaralı kısıt sağlamaktadır. Benzer biçimde (4.5) numaralı kısıt, giden  $j$  vagonunun manevra hattı  $t$ 'ye atanır ise burada uygun olan gelen  $i$  vagonu ile eşleştirilmesi için modele dahil edilmiştir.

**Bloklama engelleme kısıtı:**

$$\sum_{j' \in J: j' > j} X_{ij't} + \sum_{i' \in I: i' < i} X_{i'jt} \leq 1,$$

$$t \in T, i \in I, j \in J, i < j, \tau_i \neq \tau_j, \quad (4.6)$$

Önerilen modelde bloklamanın engellenmesi (4.6) numaralı kısıt ile sağlanmaktadır. Manevra hatlarında gelen ve giden vagonların eşleştirilmesi ancak vagon yönleri aynı ise mümkündür. Her gelen vagon  $\tau_i$  veya giden her vagon  $\tau_j$  olarak belli bir yöne sahiptir. Gelen bir vagon ancak aynı yöne gidecek ise giden bir vagon ile eşleştirilebilir. Yön ve varış/çıkış zamanlarına göre  $I$  kümesine ait gelen her  $i$  ( $i \in I$ ) vagonunun eşleştirildiği  $J$  kümesine ait giden  $J_i$  ( $J_i \subseteq J$ ) vagon kümesi vardır. Benzer şekilde  $J$  kümesine ait giden her  $j$  ( $j \in J$ ) vagonunun eşleştirildiği gelen  $I_j$  ( $I_j \subseteq I$ ) vagon kümesi bulunmaktadır.

Özetle, (4.6) numaralı kısıt farklı yönlerde sahip vagonların manevra hattına atanmasını önlemeyi garanti etmektedir. Eğer giden  $j$  vagonunun, atanmış olduğu manevra hattı  $t$ 'den çıkış yapması gerektiğinde  $t$  manevra hattında başka vagonlar ( $j'$ ) var ise bu vagonların  $t$  manevra hattına giden  $j$  vagonundan önce çıkış yapacak şekilde atanmış olmaları gerekmektedir. Böylelikle bloklama olmadan, giden  $j$  vagonu manevra hattı  $t$ 'yi terk edebilecek ilk vagon olacaktır.

**Hat uzunluğu kısıtı:**

$$\sum_{i' \in I: i' \leq i} l_{i'} \cdot z_{i't} - \sum_{j' \in J: j' < i} l_{j'} \cdot z_{j't} \leq l_t,$$

$$t \in T, i \in I, \quad (4.7)$$

Manevra alanına gelen vagonların alandan çıkış yapacak giden vagonlar ile manevra hatlarında eşleştirilmesinde manevra hat uzunluğunun aşılmaması ise (4.7) numaralı kısıt ile kontrol edilmektedir. Bu eşitsizliğin ilk bölümü manevra hattı  $t$ 'ye atanacak gelen  $i$  vagonu öncesi atanmış olan gelen vagonların ve atanacak olan gelen  $i$  vagonunun toplam uzunluğunu; ikinci bölüm ise gelen  $i$  vagonundan önce manevra hattı  $t$ 'den ayrılan giden

wagonların toplam uzunluğunu ifade etmektedir. Bu iki terim arasındaki fark manevra hattı  $t'$ 'ye atanan gelen  $i$  vagonu sonrası manevra hattı  $t$ 'deki mevcut wagonların toplam uzunluğudur.

**Karar değişkenleri:**

$$z_{it} \in \{0,1\}, i \in I, t \in T, \quad (4.8)$$

$$z_{jt} \in \{0,1\}, j \in J, t \in T, \quad (4.9)$$

$$X_{ijt} \in \{0,1\}, i \in I, j \in J, t \in T, \quad (4.10)$$

Son olarak (4.8) – (4.10) numaralı kısıtlar (0,1) değerini alabilen ikili değişkenlere ait gösterimlerdir. Yapılan tanımlamalar ve açıklamalar ışığında önerilen modelin genel gösterimi ise izleyen şekildedir.

**Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli (Schrijver, 2003):**

$$\min \sum_{t \in T} c_t \left( \sum_{i \in I} z_{it} + \sum_{j \in J} z_{jt} \right) \quad (4.1)$$

$$\sum_{t \in T} z_{it} = 1, \quad i \in I, \quad (4.2)$$

$$\sum_{t \in T} z_{jt} = 1, \quad j \in J, \quad (4.3)$$

$$z_{it} = \sum_{j \in J_i} X_{ijt}, \quad t \in T, \quad i \in I, \quad (4.4)$$

$$z_{jt} = \sum_{i \in I_j} X_{ijt}, \quad t \in T, \quad j \in J, \quad (4.5)$$

$$\sum_{j' \in I: j' > j} X_{ij't} + \sum_{i' \in I_j: i' < i} X_{i'jt} \leq 1, \\ t \in T, i \in I, j \in J, i < j, \tau_i \neq \tau_j, \quad (4.6)$$

$$\sum_{i' \in I: i' \leq i} l_{i'} \cdot z_{i't} - \sum_{j' \in J: j' < i} l_{j'} \cdot z_{j't} \leq l_t, \\ t \in T, i \in I, \quad (4.7)$$

$$z_{it} \in \{0,1\}, \quad i \in I, \quad t \in T, \quad (4.8)$$

$$z_{jt} \in \{0,1\}, \quad j \in J, \quad t \in T, \quad (4.9)$$

$$X_{ijt} \in \{0,1\}, \quad i \in I, \quad j \in J, \quad t \in T, \quad (4.10)$$

DAMP için önerilen tamsayılı doğrusal programlama modelinin yapısı; problem girdileri, amaç fonksiyonu, değişkenler ve kısıtlar önceki başlıklarda anlatılmaktadır. Tamsayılı modelin nasıl çalıştığı küçük boyutlu bir problem ile bu alt başlıkta ve örnek problem GAMS kodu ve çıktısı da sırasıyla Ek 1 ve Ek 2'de paylaşılmaktadır. Ele alınan problemde manevra hattına gelen vagonların türleri, uzunlukları, hangi yöne gidecekleri, manevra hat sayısı, manevra hattı erişim türü ve uzunluğu önceden bellidir ve bunlar problem girdilerini oluşturmaktadır. Ayrıca her bir manevra hattına atama ve manevra hattından vagon çekme maliyeti birbirinden farklıdır ve bu maliyetler bilinmektedir. Önerilen TDP modelinde vagonların manevra alanına geliş ve manevra alanından çıkış zamanları önemli olmayıp vagonların geliş ve gidiş sıralamaları önemlidir. Modelin nasıl çalıştığı üç manevra hattında, manevra alanına gelen ve alandan giden beş vagon için izleyen bölümde anlatılmaktadır.



Sadece tek yönlü erişime sahip üç manevra hattına ( $t_1, t_2, t_3$ ), varış yönü  $\pi (A, B, C)$  olarak gelen beş vagonun ( $i_1, i_2, i_3, i_4, i_5$ ) giden beş vagon ( $j_1, j_2, j_3, j_4, j_5$ ) ile bloklama olmadan ve manevra hat uzunluğu aşılmadan eşleştirilerek atanabilmesi için TDP modelindeki olası iki eşleştirme senaryosu aşağıda incelenmektedir. Önerilen TDP modelinde gelen bir vagon ancak ve ancak gidecekleri yönler ( $\pi$ ) aynı ise giden bir vagonla eşleşebilir. Çalışılan küçük problemde gelen ve giden vagonların sıralamaları ile vagon yönleri Çizelge 4.1’de, manevra hat uzunlukları ise Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 Örnek problem vagon bilgileri

| Gelen veya giden vagon ( $i / j$ ) sıralaması | $i_1$ | $i_2$ | $j_1$ | $i_3$ | $i_4$ | $j_2$ | $i_5$ | $j_3$ | $j_4$ | $j_5$ |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vagon yönü ( $\pi_{ij}$ )                     | A     | B     | B     | C     | A     | A     | C     | A     | C     | C     |
| Vagon uzunluğu ( $l_{ij}$ ) (m)               | 5     | 10    | 10    | 20    | 5     | 5     | 20    | 5     | 20    | 20    |

Çizelge 4.1’de manevra alanına gelen veya giden 10 adet vagonun sıralamaları ilk satırdaki gibi  $\{i_1, i_2, j_1, i_3, i_4, j_2, i_5, j_3, j_4, j_5\}$  şeklindedir. Örneğin manevra alanına ilk gelen  $i_1$  vagonunun gideceği yön A, vagon uzunluğu 5 m. iken alandan ilk gönderilecek giden  $j_1$  vagonunun gideceği yön B ve vagon uzunluğu 10 metredir. Manevra alanına geliş ve alandan gidiş sırasına göre diğer vagonların varış yönleri ve uzunlukları da aynı çizelgede gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 Örnek problem manevra hattı bilgileri

| Manevra hattı ( $t$ )              | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| Manevra hat uzunluğu ( $l_t$ ) (m) | 50    | 50    | 100   |
| Manevra maliyeti ( $c_t$ ) (birim) | 100   | 100   | 200   |

Manevra alanında, gelen vagonların giden vagonlarla en az manevra hareketi ile eşleştirilmesinde kullanılan uzunlukları sırasıyla 50, 50 ve 100 m olan üç manevra hattı ve birim manevra maliyeti sırasıyla 100, 100 ve 200 birim olarak Çizelge 4.2’deki gibidir. Bloklamanın engellenmesini sağlayan TDP modelinin (4.6) kısıtı için önemli olan alt kümeler ise Çizelge 4.3’te paylaşılmıştır. Manevra hatlarında gelen ve giden vagonların eşleştirilmesi

ancak varış yönleri aynı ise mümkündür. Her gelen vagon  $\tau_i$  veya giden her vagon  $\tau_j$  olarak belli bir yöne sahiptir. Gelen bir vagon ancak varış yönleri aynı ise giden bir vagon ile eşleştirilebilir. Yön ve varış/çıkış zamanlarına göre  $I$  kümesine ait gelen her  $i$  ( $i \in I$ ) vagonunun eşleştirildiği  $J$  kümesine ait giden  $J_i$  ( $J_i \subseteq J$ ) vagon kümesi vardır. Benzer şekilde  $J$  kümesine ait giden her  $j$  ( $j \in J$ ) vagonunun eşleştirildiği gelen  $I_j$  ( $I_j \subseteq I$ ) vagon kümesi bulunmaktadır. Çizelge 4.3'teki gibi örneğin; giden  $j_3$  vagonundan önce genel sıralamada varış yapmış olan ve  $j_3$  giden vagonu ile aynı türde olan  $i_1$  ve  $i_4$  gelen vagonları,  $I_{j_3}$  alt kümesini oluşturmaktadır.

Çizelge 4.3 Örnek probleme ait alt kümeler

| Gelen Vagon<br>Alt Küme | Varış Yönü<br>( $\pi_i$ ) | Giden Vagon<br>Alt Küme | Varış Yönü<br>( $\pi_j$ ) |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| $I_{j_1}=\{i_2\}$       | B                         | $J_{i_1}=\{j_2,j_3\}$   | A                         |
| $I_{j_2}=\{i_1,i_4\}$   | A                         | $J_{i_2}=\{j_1\}$       | B                         |
| $I_{j_3}=\{i_1,i_4\}$   | A                         | $J_{i_3}=\{j_4,j_5\}$   | C                         |
| $I_{j_4}=\{i_3,i_5\}$   | C                         | $J_{i_4}=\{j_2,j_3\}$   | A                         |
| $I_{j_5}=\{i_3,i_5\}$   | C                         | $J_{i_5}=\{j_4,j_5\}$   | C                         |

Çizelge 4.3'teki gibi manevra alanından gönderilecek ilk giden vagon varış yönü B olan  $j_1$  vagonudur ve gelen vagon kümesinden manevra alanına kendinden önce varış yapmış olan aynı yöne sahip gelen  $i_2$  vagonu ile eşleştirilebilir. Alandan gönderilecek ikinci vagon  $j_2$  vagonunun varış yönü A'dir ve kendinden önce alana varışı gerçekleşmiş olan  $i_1$  veya  $i_4$  gelen vagonları ile eşleştirilebilir. Varış yönü A olan ve alandan üçüncü sırada gönderilecek  $j_3$  giden vagonu  $i_1$  veya  $i_4$  gelen vagonları ile eşleştirilebilir. Dördüncü sırada alandan gönderilecek C varış yönündeki  $j_4$  giden vagonu kendinden önce alana varışı gerçekleşmiş olan  $i_3$  veya  $i_5$  gelen vagonları ile eşleştirilebilir. Manevra alanından son gönderilecek varış yönü C olan  $j_5$  giden vagonu ise kendinden önce alana varış yapmış olan  $i_3$  veya  $i_5$  gelen vagonlarından biriyle eşleştirilebilir.

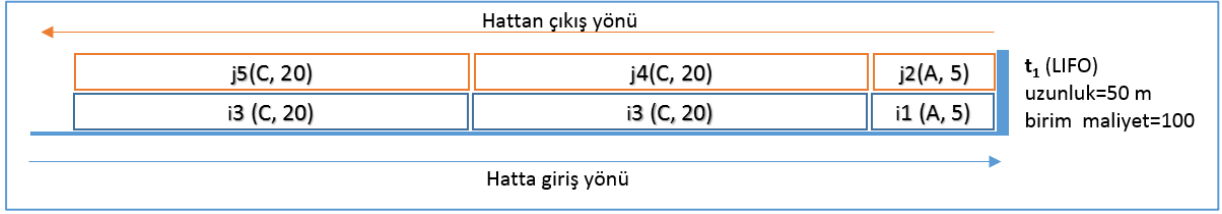
Beş gelen vagon ve beş giden vagon örnek problemi için alt kümelerin tanımlanmasından sonra modelde bloklamayı önleyen (4.6) kısıtı iki eşleştirme senaryosu ve manevra hat uzunluğunun aşılmasını önleyen (4.7) kısıtı ise bir senaryo ile anlatılmaktadır. Çalışılan senaryolar için seçilen gelen ve giden vagonlar için özellikle bloklama kısıtının çalışabileceği varış yönleri farklı ( $\pi_i \neq \pi_j$ ) ve sıralamada gelen vagonun giden vagonundan önce olduğu ( $i < j \mid i_3, j_2$ ) vagonlar tercih edilmiştir. Eşleştirme senaryolarının ilki için seçilen vagonlar, örnekte varış yönleri sırasıyla C ve A olan  $i_3$  gelen vagonu ile  $j_2$  giden vagonudur. Manevra alanına  $i_3$  vagonu, alandan gönderilecek  $j_2$  vagonundan önce varış yapmıştır.

$$\begin{array}{cc}
 \text{İlk Bölüm} & \text{İkinci Bölüm} \\
 \boxed{\sum_{j' \in I_i: j' > j} X_{ij't}} & + \boxed{\sum_{i' \in I_j: i' < i} X_{i'jt}} \leq 1, \\
 t \in T, i \in I, j \in J, i < j, \tau_i \neq \tau_j, & (4.6)
 \end{array}$$

Bloklamayı engelleyen (4.6) kısıtı varış yönleri farklı ve gelen vagonun giden vagonundan önce işlem gördüğü  $i$  ve  $j$  vagonları için çalışmaktadır. Eşitsizliğin ilk bölümünde  $J_{i_3} = \{j_4, j_5\}$  alt kümesinin elemanlarından, seçilen  $j=j_2$  giden vagonundan sonra gönderilecek  $j'$  elemanları ( $j' > j_2 \mid j_4, j_5$ ) için işlem yapılmaktadır. Bu durumda  $J_{i_3} = \{j_4, j_5\}$  için  $X_{i_3j_4t_1} + X_{i_3j_5t_1}$  kısıtın ilk bölümünü oluşturmaktadır. Eşitsizliğin ikinci bölümü için de  $I_{j_2} = \{i_1, i_4\}$  alt kümesinin elemanlarından, seçilen  $i_3$  gelen vagonundan önce varış yapmış  $i'$  elemanları ( $i' < i_3 \mid i_1$ ) işlem görmektedir.  $I_{j_2}$  alt kümesinin elemanlarından sadece  $i_1$  gelen vagonu, sıralamada  $i_3$  gelen vagonundan önce alana varış yaptığından eşitsizliğin ikinci bölümü  $i_1$  gelen vagonu için çalışmaktadır ve  $I_{j_2} = \{i_1, i_4\}$  için  $X_{i_1j_2t_1}$  eşitsizliğin ikinci bölümünü oluşturmaktadır. Dolayısıyla ele alınan  $i_3$  ve  $j_2$  vagonları için  $\pi_{i_3} \neq \pi_{j_2}$  (C, A) ve  $J_{i_3} = \{j_4, j_5\}$  ile  $I_{j_2} = \{i_1, i_4\}$  alt kümelerinde (4.6) bloklamayı engelleyen kısıt;

$$X_{i_3j_4t_1} + X_{i_3j_5t_1} + X_{i_1j_2t_1} \leq 1$$

şeklindedir. Bu eşitsizlikte  $t_1$  hattında olabilecek üç farklı eşleştirme Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Örnek problem için bloklama senaryosu-1

Seçilen  $i=i_3$  gelen vagonu ve  $j=j_2$  giden vagonu ve  $t=t_1$  manevra hattı için TDP modelinin (4.6) kısıtında  $t_1$  hattında olabilecek üç farklı eşleştirme Şekil 4.1’de gösterildiği şekilde gerçekleşirse manevra hattına ilk gelen  $i_1$  vagonu giden  $j_2$  vagonu ile, gelen  $i_3$  vagonu giden  $j_4$  veya  $j_5$  vagonu ile eşleşirse  $j_2$  vagonu hattan çıkış yapmak istediğinde çıkış sırası henüz gelmemiş olan giden  $j_4$  veya  $j_5$  vagonu ile eşleşen  $i_3$  gelen vagonu tarafından engellenmiş olacaktır. Bloklamayı engelleyen kısıt sayesinde üç farklı eşleştirmeden sadece biri gerçekleşeceğinden bloklama böylelikle engellenmiş olacaktır.

Aynı örnek için diğer bir eşleştirme senaryosu, varış yönleri sırasıyla C ve A olan  $i_3$  gelen vagonu ve  $j_3$  giden vagonu ( $i_3 < j_3$ ) üzerinden çalışılmaktadır. Manevra alanına  $i_3$  vagonu, alandan gönderilecek  $j_3$  vagonundan önce varış yapmıştır. Eşitsizliğin ilk bölümünde  $J_{i_3} = \{j_4, j_5\}$  alt kümesinin elemanlarından, seçilen  $j_3$  giden vagonundan sonra gönderilecek  $j'$  elemanları ( $j' > j_3 \mid j_4, j_5$ ) için işlem yapılmaktadır. Bu durumda  $J_{i_3} = \{j_4, j_5\}$  için  $X_{i_3 j_4 t_1} + X_{i_3 j_5 t_1}$  kısıtın ilk bölümünü oluşturmaktadır. Eşitsizliğin ikinci bölümü için de  $I_{j_3} = \{i_1, i_4\}$  alt kümesinin elemanlarından, seçilen  $i_3$  gelen vagonundan önce varış yapmış  $i'$  elemanları ( $i' < i_3 \mid i_1$ ) işlem görmektedir.  $I_{j_3}$  alt kümesinin elemanlarından sadece  $i_1$  gelen vagonu, sıralamada  $i_3$  gelen vagonundan önce alana varış yaptığından eşitsizliğin ikinci bölümü  $i_1$  gelen vagonu için çalışmaktadır ve  $I_{j_3} = \{i_1, i_4\}$  için  $X_{i_1 j_3 t_1}$  eşitsizliğin ikinci bölümünü oluşturmaktadır. Dolayısıyla ele alınan  $i_3$  ve  $j_3$  vagonları için  $\pi_{i_3} \neq \pi_{j_3}$  (C, A) ve  $J_{i_3} = \{j_4, j_5\}$  ile  $I_{j_3} = \{i_1, i_4\}$  alt kümelerinde (4.6) bloklamayı engelleyen kısıt;

$$X_{i_3 j_4 t_1} + X_{i_3 j_5 t_1} + X_{i_1 j_3 t_1} \leq 1$$

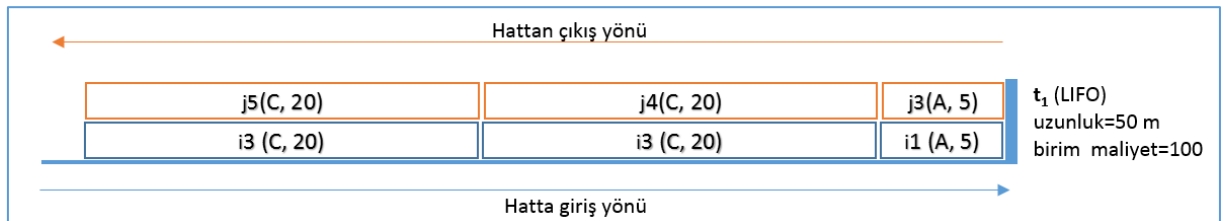
şeklindedir. Bu eşitsizlikte  $t_1$  hattında olabilecek üç farklı eşleştirme Şekil 4.3’te gösterilmektedir.

Örnek için ikinci bloklama senaryosunda seçilen  $i_3$  gelen vagonu ve  $j_3$  giden vagonu için TDP modelinin (4.6) kısıtında  $t_1$  hattında olabilecek üç farklı eşleştirme Şekil 4.3'te gösterildiği şekilde gerçekleşirse manevra hattına ilk gelen  $i_1$  vagonu giden  $j_3$  vagonu ile, gelen  $i_3$  vagonu giden  $j_4$  veya  $j_5$  vagonu ile eşleşirse  $j_3$  vagonu hattın çıkış yapmak istediğinde çıkış sırası henüz gelmemiş olan giden  $j_4$  veya  $j_5$  vagonu ile eşleşen  $i_3$  gelen vagonu tarafından engellenmiş olacaktır. Modelin (4.6) kısıtı sayesinde üç farklı eşleştirmeden sadece biri gerçekleşeceğinden bloklama böylelikle engellenmiş olacaktır.

TDP modelinin bloklamayı engelleyen (4.6) kısıtının yanı sıra atama yapılan manevra hat uzunluğunun aşılmasını engelleyen (4.7) kısıtının nasıl çalıştığı  $i_5$  gelen vagonu için incelenmektedir. Eşitsizliğin ilk bölümü seçilen  $i$  gelen vagonu dahil olmak üzere,  $i$  vagonundan önce seçilen manevra hattına atanan gelen vagonların toplam uzunluğunu hesaplamaktadır. Kısıtın ikinci bölümü ile seçilen  $i$  gelen vagonundan önce seçilen manevra hattından gönderilmiş olan  $j$  giden vagonlarının toplam uzunluğu bulunmaktadır. Sonuç olarak, seçilen manevra hattına  $i$  gelen vagonundan önce atanan ve atanması söz konusu olan  $i$  gelen vagonunun toplam uzunluğundan, gelen  $i$  vagonundan önce hattın gönderilen  $j$  giden vagonlarının toplam uzunluğu çıkarıldığında kalan uzunluk değeri manevra hattının uzunluğundan küçük olmalıdır.

$$\begin{array}{ccc} \text{İlk Bölüm} & & \text{İkinci Bölüm} \\ \sum_{i' \in I: i' \leq i} l_{i'} \cdot z_{i't} & - & \sum_{j' \in J: j' < i} l_{j'} \cdot z_{j't} \leq l_t, \\ t \in T, i \in I, & & \end{array} \quad (4.7)$$

Örnek problemde manevra alanına en son varış yapan  $i_5$  gelen vagonu için (4.7) eşitsizliğinde,  $t_1$  manevra hattına  $i=i_5$  gelen vagonu ve kendinden önce gelen tüm gelen vagonların ( $i' \leq i \mid i_1, i_2, i_3, i_4, i_5$ ) uzunlukları dikkate alınmaktadır ve eşitsizliğin ilk bölümü



Şekil 4.3 Örnek problem için bloklama senaryosu-2

$5. z_{i1t1} + 10. z_{i2t1} + 20. z_{i3t1} + 5. z_{i4t1} + 20. z_{i5t1}$  şeklindedir. İkinci bölümde ise  $i=5$  gelen vagonundan önce giden vagonların ( $j' < i5 \mid j_1, j_2$ ) toplam uzunlukları hesaplanmaktadır ve bu bölüm  $10. z_{j1t1} + 5. z_{j2t1}$  şeklindedir. Sonuç olarak TDP modelinin (4.7) kısıtı örnek senaryo için;

$$5. z_{i1t1} + 10. z_{i2t1} + 20. z_{i3t1} + 5. z_{i4t1} + 20. z_{i5t1} - 10. z_{j1t1} - 5. z_{j2t1} \leq 20$$

olarak yazılmaktadır.

Bloklamanın engellenmesi ve hat uzunluğu kısıtlarının açıklanmasında kullanılan küçük boyutlu örnek problemin çözümü için GAMS modeli Ek 1'de, sonuç çıktısı ise Ek 2'de verilmiştir.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, TCDD işletmesi idaresinde olan ve Ankara ilinde bulunan Marşandiz Gar manevra alanında 2015 yılı Mayıs ayında manevra hareketinin yoğun olduğu bir iş gününe ait veriler DAMP için kullanılmıştır. 15 Mayıs 2015 tarihinde saat 08:00 ila ertesi sabah saat 08:00 aralığında 24 saatte gerçekleştirilen 6 farklı tipte ve 5 farklı varış yönünde 36 gelen vagonun 36 giden vagon olarak manevra alanından gönderilmesini içeren gerçek hayat probleminin uygulaması çalışılmıştır.

### 5.1. Marşandiz Gar Manevra Alanı Uygulaması

Marşandiz manevra alanına 24 saatlik planlama periyodu içerisinde 36 vagon, varış yapmakta ve yine planlama periyodu içinde alandan gönderilmektedir. Uygulama probleminde tek yönlü erişime sahip 9 manevra hattı bulunmakta olup bunlardan 3'ü gelen trenlerin alana kabulünde, 6'sı eşleştirme ve atamada (sınıflandırmada) kullanılmaktadır. Önerilen TDP modeli "GAMS 23.7.3" yazılımı ile kodlanmış olup CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. İlgili GAMS kodu ve sonuç çıktısı Ek 3 ve Ek 4'te verilmiştir. GAMS ara yüzü ile modelin kodlanmasında Aksen'e (1998) göre özellikle ulaştırma ve dağıtım modellerinde sıklıkla kullanılan çoklu eşleştirme, kontrollü alt indis ve alt küme tanımlamalarına başvurulmuştur.

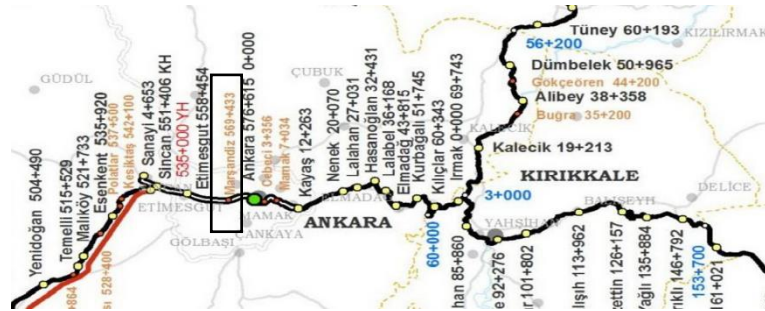
DAMP için önerilen TDP modelinin geçerliliği Marşandiz Gar manevra alanına ait bilgiler kullanılarak değerlendirilmiştir. Marşandiz Gar'da bulunan manevra alanının altyapı ve işletmecilik özellikleri, örnek uygulama parametreleri ve model sonuçları bu bölümde paylaşılmaktadır. 2017 TCDD Faaliyet Raporu'na (2018) göre işletme idaresindeki 12 639 km uzunluğundaki ulusal demiryolu ağı haritasında, Ankara il sınırları içinde bulunan Marşandiz Gar manevra alanının demiryolu ağı haritasındaki yeri Şekil 5.1'de ve manevra alanı görseli ise Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Marşandiz Gar manevra alanı yük taşımacılığı için gerçekleştirilen manevra işlemlerinin yürütüldüğü alandır.

Marşandiz manevra alanında manevra hareketleri, manevra planlayıcısı tarafından önceden belirli ve değişmeyen Çizelge 5.1’de örneği paylaşılan tren zaman çizelgesine göre günlük olarak planlanmaktadır. Marşandiz Gar manevra alanına ait manevra alanı görseli, manevra hat sayısı ve manevra hattı erişim türü gibi altyapı kısıtları bu başlıkta paylaşılmaktadır.

Çizelge 5.1. Tren zaman çizelge örneği

| Tren No | Marşandiz'e Gelen/<br>Marşandiz'den Giden | Çıkış / Varış Yönü | Marşandiz'e Varış /<br>Marşandiz'den Çıkış<br>Sırası | Yük            |
|---------|---|--------------------|--|----------------|
| 100     | Gelen                                     | A                  | 1  | Muhtelif       |
| 200     | Gelen                                     | B                  | 2  | Konteyner      |
| 300     | Gelen                                     | C                  | 3  | Konteyner      |
| 400     | Gelen                                     | D                  | 4  | Konteyner      |
| 500     | Gelen                                     | E                  | 5  | Dolu akaryakıt |
| 1000    | Giden                                     | D                  | 1  | Muhtelif       |
| 2000    | Giden                                     | E                  | 2  | Konteyner      |
| 3000    | Giden                                     | A                  | 3  | Konteyner      |
| 4000    | Giden                                     | B                  | 4  | Konteyner      |
| 5000    | Giden                                     | C                  | 5  | Dolu akaryakıt |

Tren zaman çizelge örneği Çizelge 5.1’deki gibi muhtelif yüklü ve A yönünden çıkış yapan ilk sıradaki 100 numaralı tren teşkilinde gelen vagonlar Marşandiz Gar manevra alanına gün içinde ilk varış yapan vagonlardır. Bu vagonlar ile gün içinde farklı zamanlarda alana varış yapan ve aynı yöne gidecek diğer vagonlar manevra alanında uygun hatlara bloklama olmadan ve hat uzunluğu aşılmadan atanarak alandan giden vagonlar olarak gönderilecektir.



Şekil 5.1. Marşandiz Gar'ın demiryolu haritasında yeri (TCDD, 2019)

Şekil 5.1’de harita kesiti paylaşılan Marşandiz Gar yük taşımacılığının yoğunlukta olduğu manevra istasyonlarıdır. Marşandiz, ülkemizin demiryolu ile yük taşımacılığında



merkez noktalarından olduğundan doğu-batı ve kuzey-güney yönlü yük trenlerinin yoğunlukla manevra işlemi burada gerçekleştirilir. Marşandiz Gar alanına ait örnek görseller Şekil 5.2 ve 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Marşandiz Gar manevra alanı-1



Şekil 5.3. Marşandiz Gar manevra alanı-2

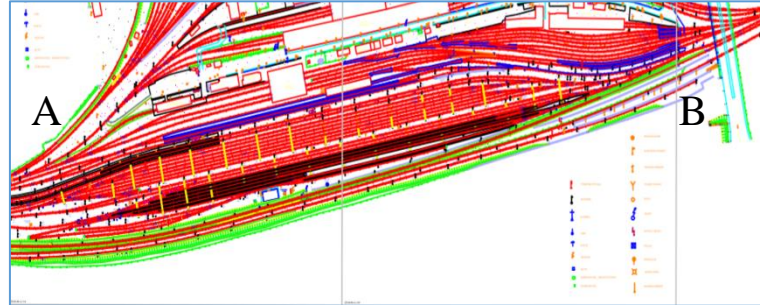
Demiryolu ile taşınan yük grupları Çizelge 5.2'de gösterildiği gibidir. Taşınan yük gruplarına göre kullanılan vagon tipi, vagonlara yükleme-boşaltma şekli ve uygulanacak demiryolu emniyet kuralları farklılık göstermektedir. Demiryolu ile yük taşımacılığında taşınan yüke göre vagon tipi ve yükleme yöntemleri farklılık göstermektedir. Farklı türde vagonlardan oluşan yük trenlerinin; manevra alanlarında hatlara kabulü, gelen vagonların ayrıştırılarak giden trenleri oluşturmak üzere yeniden birleştirilmesi ve giden trenlerin

manevra alanından gönderilmesi sırasında belirlenen hız kısıtlarına uymaları demiryolu emniyeti açısından zorunludur.

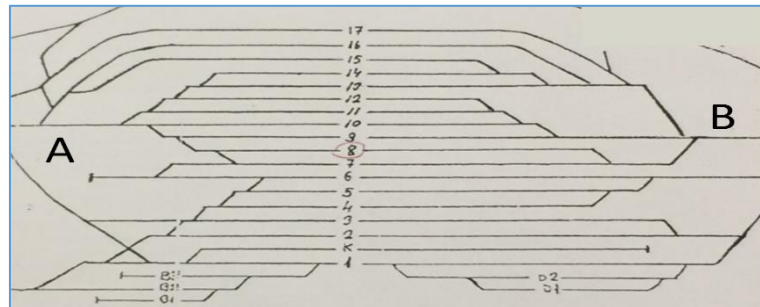
Çizelge 5.2. Yük grupları ve yük türleri (TCDD Taşımacılık'tan, 2019)

| Yük Grubu             | Yük İçeriği   |
|-----------------------|---|
| Dökme Eşyalar         | Demir Cevheri, Boraks, Çakıl, Hurda, Tahıl, Klinker, Alçıtaşı, Kum, Kömür Vb. |
| Tekil Eşyalar         | Kasa, Makine, Araç, Taş, Levha Vb.  |
| Tekil Hale Getirilene | Konteyner, Palet, Paket, Sandık, Torba, Demet Vb.                             |
| Silindirik Eşya       | Boru, Rulo Sac, Fıçı Vb.  |
| Kağıt                 | Balya, Rulo, Tomar Vb.  |
| Ağaç                  | Tomruk, Kereste, İşlenmiş Ürünler Vb.   |
| İnşaat Malzemesi      | Kilit Taşı, Tuğla, Demir, Seramik, Alçıtaşı Vb.                               |
| İdari Eşyalar         | Demiryolu İşleri İçin Kullanılan Dingil/Boji, Ray, Travers, Makas Gibi        |

Bu gerçek hayat uygulamasında manevra planlamasında kullanılan vagon türü ve vagon uzunlukları taşıdıkları yüklere bakılmaksızın Çizelge 5.4'de paylaşılmaktadır. Vagon türü vagonların fiziksel şekillerine göre isimlendirilmekte olup vagon yükleme türlerini etkilemektedir. Marşandiz manevra alanını gösterir çizim Şekil 5.4 ve 5.5'teki gibidir.



Şekil 5.4 Marşandiz Gar manevra alanı kroki



Şekil 5.5. Marşandiz manevra alanındaki manevra hatları

Manevra alanına gelen trenlerin girişi ve alandan sevk edilen trenlerin alandan çıkış yönleri sırasıyla A ve B yönleridir. Manevra alanında 9 adet tek yönlü erişime sahip manevra hattı bulunmakta olup bunlardan 3'ü manevra alanına gelen trenlerin kabul edildiği hatlardır.

## 5.2. Model Girdileri

Bu bölümde geçek hayat uygulamasındaki manevra planlama verilerinden model girdilerini oluşturan manevra hat sayısı ve uzunlukları, vagon sıralamaları, vagon türleri (varış yönleri) ve uzunlukları ile birim manevra maliyetleri sırasıyla verilmektedir.

### Hat sayısı ve uzunluğu:

Manevra alanındaki manevra hatları tek yönlü erişilebilir hatlardır. Şekil 5.5'teki manevra hatlarına vagonlar A yönünden alınır benzer şekilde ilgili hattan sevk edilecek vagon yine A yönünden manevra hattını terk eder. Marşandiz manevra alanında yük taşımacılığı için tanımlanan 9 adet manevra hattından 4, 5 ve 6 numaralı hatlar alana gelen trenlerin kabul alanı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ele alınan DAMP için kullanılabilir manevra hat sayısı 6 adet olup bunlar 1, 2, 3, 7, 8 ve 9 numaralı hatlardır. Demiryolu yük taşımacılığında ele alınan DAMP için önemli parametrelerden olan manevra hattı uzunlukları ve hat erişim türleri ise Çizelge 5.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. Marşandiz Gar manevra hattı özellikleri

| Manevra Hattı Numarası | Kullanım Türü      | Hatta Erişim Şekli | Hat Uzunluğu (m) |
|------------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 1                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 411              |
| 2                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 611              |
| 3                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 611              |
| 4                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 573              |
| 5                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 579              |
| 6                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 592              |
| 7                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 800              |
| 8                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 692              |
| 9                      | Yük Taşımacılığı   | Tek Yönlü          | 690              |
| 10                     | Yolcu Taşımacılığı | Serbest Yönlü      | 650              |
| 11                     | Yolcu Taşımacılığı | Serbest Yönlü      | 603              |
| 12                     | Yolcu Taşımacılığı | Serbest Yönlü      | 573              |
| 13                     | Yolcu Taşımacılığı | Serbest Yönlü      | 531              |
| 14                     | Yolcu Taşımacılığı | Serbest Yönlü      | 667              |
| 15                     | Yolcu Taşımacılığı | Serbest Yönlü      | 582              |
| 16                     | Yolcu Taşımacılığı | Serbest Yönlü      | 654              |

Marşandiz manevra alanında yük ve yolcu taşımacılığı hizmetlerinde kullanılan Çizelge 5.3'te verildiği üzere toplam 16 manevra hattı bulunmaktadır. Bunlardan 9 adedi yük, 7 adedi ise yolcu taşımacılığı manevra işlemlerinde kullanılmaktadır. Yük taşımacılığı için kullanılan manevra hatları tek yönlü erişime sahip hatlardır.

### Sıralama:

Bu uygulama için önerilen TDP modelinde kullanılmak üzere 2015 yılında planlama periyodu 24 saat olan örnek manevradaki girdiler, manevra alanına geliş sırasına göre vagon yönü, tipi ve uzunlukları şeklinde Çizelge 5.4'te paylaşılmaktadır. Gelen 36 vagon ile giden 36 vagonun Genel Sıralama Kümesi  $=\{i_1, i_2, \dots, i_{36}, j_1, j_2, \dots, j_{36}\}$  şeklinde yazılabilir. Giden vagonlardan önce gelen vagonların tümü manevra alanına varış yapmıştır.

Çizelge 5.4. Marşandiz manevra örneği gelen vagon bilgileri

| Vagon Sırası (i) | Vagon Varış Yönü | Vagon Türü (Yön) ( $\pi_i$ ) | Vagon Uzunluğu ( $l_i$ ) |
|------------------|------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 2                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 3                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 4                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 5                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 6                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 7                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 8                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 9                | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 10               | Değirmenözü      | A                            | 21                       |
| 11               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 12               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 13               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 14               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 15               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 16               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 17               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 18               | Marşandiz        | B                            | 21                       |

| Vagon Sırası (i) | Vagon Varış Yönü | Vagon Türü (Yön) ( $\pi_i$ ) | Vagon Uzunluğu ( $l_i$ ) |
|------------------|------------------|------------------------------|--------------------------|
| 19               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 20               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 21               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 22               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 23               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 24               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 25               | Marşandiz        | B                            | 21                       |
| 26               | Elazığ           | C                            | 15                       |
| 27               | Diyarbakır       | C                            | 16                       |
| 28               | Mersin           | C                            | 16                       |
| 29               | Ilıca            | C                            | 22                       |
| 30               | Gaziantep        | C                            | 16                       |
| 31               | Burdur           | D                            | 16                       |
| 32               | Afyon            | D                            | 19                       |
| 33               | Konya            | D                            | 19                       |
| 34               | Arifiye          | E                            | 16                       |
| 35               | Balıkesir        | E                            | 16                       |
| 36               | Biçerova         | E                            | 16                       |

Gelen vagon bilgileri Çizelge 5.4'te paylaşılan manevrada örneğin, sıralamada ilk olan  $i_1$  gelen vagonun yönü A ve vagon uzunluğu 21 m'dir. Gelen  $i_1$  vagonu ile aynı uzunlukta olan

$i_{11}$  gelen vagonunun vagon türü ise B'dir yani gidecekleri yönler farklıdır. Marşandiz manevra örneğine ait gelen ve giden vagon sıralaması ise Çizelge 5.5'te verilmektedir.

Çizelge 5.5. Marşandiz manevra örneği sıralaması

|             |                       |                              |                                 |                                 |                                 |                                 |
|-------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Gelen Vagon | Uzunluk ( $l_i$ )     | 21                           | 21                              | 22                              | 19                              | 16                              |
|             | Tür (Yön) ( $\pi_i$ ) | A                            | B                               | C                               | D                               | E                               |
|             | Sıra ( $i$ )          | $\{i_1 \rightarrow i_{10}\}$ | $\{i_{11} \rightarrow i_{25}\}$ | $\{i_{26} \rightarrow i_{30}\}$ | $\{i_{30} \rightarrow i_{33}\}$ | $\{i_{34} \rightarrow i_{36}\}$ |
| Giden Vagon | Uzunluk ( $l_j$ )     | 16                           | 19                              | 22                              | 21                              | 21                              |
|             | Tür (Yön) ( $\pi_j$ ) | E                            | D                               | C                               | B                               | A                               |
|             | Sıra ( $j$ )          | $\{j_1 \rightarrow j_3\}$    | $\{j_4 \rightarrow j_6\}$       | $\{j_7 \rightarrow j_{11}\}$    | $\{j_{12} \rightarrow j_{26}\}$ | $\{j_{27} \rightarrow j_{36}\}$ |

Çizelge 5.5'te gösterildiği üzere, genel sıralama kümesine göre manevra alanına giden vagonlardan önce gelen tüm vagonlar varış yapmıştır ve vagon yönü A olan  $\{i_1 \rightarrow i_{10}\}$  gelen vagonları, alandan en son çıkış yapacak ve vagon yönü aynı olan  $\{j_{27} \rightarrow j_{36}\}$  giden vagonları ile eşleşebilmektedir.

### Birim manevra maliyeti:

Manevra alanındaki hatlara bir vagonun atanması veya hattan bir vagonun çekilmesi maliyeti hatlara göre değişkenlik göstermektedir. Manevrayı gerçekleştiren personelin sabit ücreti ile ilgili hatta erişim için kat edilen süreye göre değişen maliyet göz önünde bulundurularak vagon başına birim manevra maliyeti hesaplanmıştır. Uyarlanan birim manevra maliyetleri Çizelge 5.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.6. Birim manevra maliyetleri

|  |    |     |     |     |     |     |
|--|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Manevra Hattı (t)                        | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| Birim Manevra Maliyeti ( $c_t$ ) (birim) | 96 | 120 | 144 | 168 | 192 | 216 |

Manevra hatlarına erişim tek yönlü olduğundan manevra alanına varış noktasından ilgili hatta ulaşmak için kat edilen mesafe farklılık göstermektedir. Çizelge 5.6'da gösterildiği üzere örneğin, birim manevra maliyeti 6 numaralı hatta en yüksek iken 1 numaralı hatta

ulaşım diğerlerine göre daha kısa olduğundan bu hattaki birim manevra maliyeti en düşük olarak hesaplanmıştır.

Model girdileri 4. Bölümde paylaşılan küçük boyutlu problem ve bu bölümde paylaşılan Marşandiz Gar manevra problemi için TDP modeli GAMS 23.7.3. yazılımı ile kodlanmış ve CPLEX 12.3. ozcs kullanılarak optimal ozmler elde edilmiştir. Küçük boyutlu manevra problemi ve Marşandiz Gar manevra rneği için GAMS modellerinde kullanılan kısıt, ikili karar değişkeni sayısı, amaç fonksiyon değeri ve ozm süresi izelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Örnekler için model çalışma bilgileri

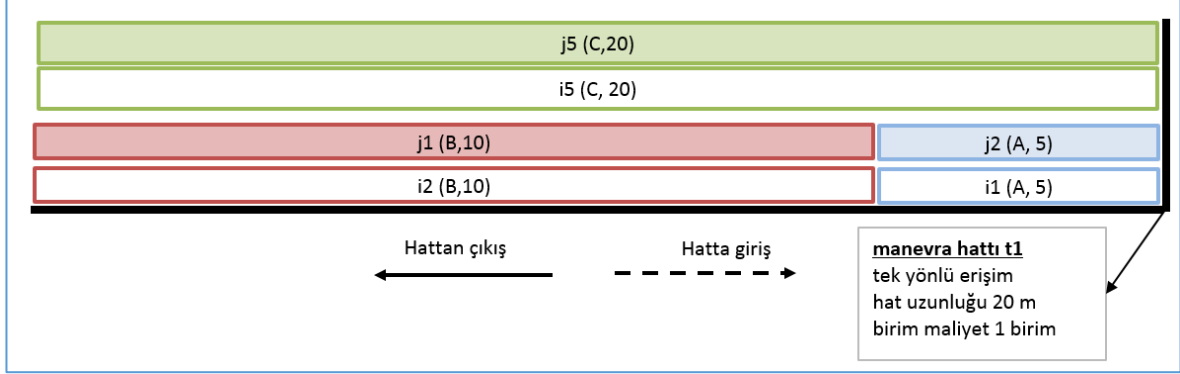
| Problem                       | Küçük Boyutlu rnek<br>(5 Vagon) | Marşandiz Manevra<br>rneği<br>(36 Vagon) |
|-------------------------------|----------------------------------|---|
| Kısıt Sayısı                  | 130                              | 8 496                                     |
| İkili Karar Değişkeni Sayısı  | 105                              | 8 208                                     |
| Amaç Fonksiyon Değeri (birim) | 26                               | 7 680                                     |
| ozm Süresi (dakika)         | 0,03                             | 0,34                                      |

Mevcut durumda Marşandiz Gar manevra rneği için manuel planlama süresinin bir saatten fazla olduğu manevra planlayıcısı tarafından belirtilmiştir. Çizelge 5.7’de gösterildiği üzere her iki örnek problem için ozm süresi bir dakikadan kısa sürmüştür.

### 5.3. Model ıktıları

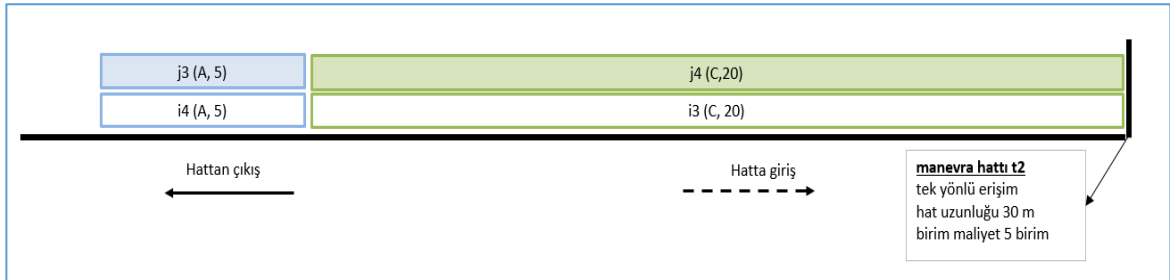
DAMP’nin araştırıldığı bu çalışmada küçük boyutlu örnek ve Marşandiz Manevra rnekleri için gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilerek bloklamaya izin verilmeden ve hat uzunluğu aşılmadan uygun manevra hatlarına atanması için ilk durumda manevra hatlarının boş durumda ve kullanılabilir olduğu varsayılmaktadır. İki rnek problem için GAMS/CPLEX ozmlerinden hareketle ulaşılan GAMS sonuç ıktıları sırasıyla Ek 2 ve Ek 4’te verilmektedir. Ek 2’de GAMS modeli sonucu paylaşılan küçük boyutlu problem için manevra atamaları Şekil 5.6’da ve Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Tek yönlü erişime sahip  $t_1$

ve  $t_2$  manevra hatlarına genel sıralama kümesine göre gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilerek ataması yapılmıştır.



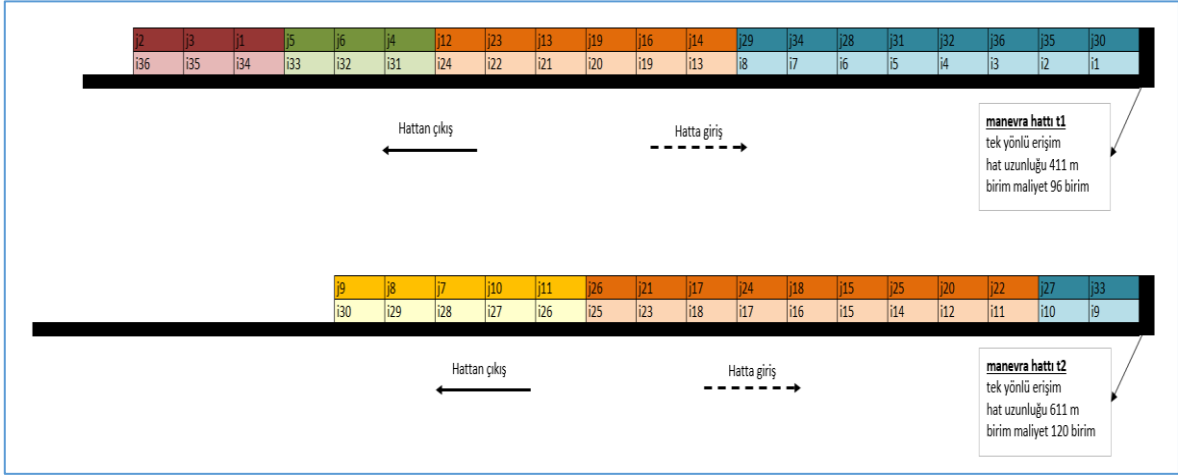
Şekil 5.6. Küçük boyutlu problem için  $t_1$  manevra hattına atama

Şekil 5.6’da gösterildiği üzere; genel sıralama kümesine göre ilk sıradaki  $i_1$  vagonu, giden  $j_2$  vagonu ile eşleştirilerek  $t_1$  hattına atanmıştır. Sonra ikinci sıradaki gelen  $i_2$  vagonu, giden  $j_1$  vagonu ile eşleştirilerek atanmıştır. Giden vagonlar arasında ilk ve ikinci çıkış yapacak olan  $j_1$  ve  $j_2$  giden vagonları  $t_1$  hattından gönderildikten sonra manevra alanına gelen  $i_5$  vagonu, giden  $j_5$  vagonu ile eşleştirilerek  $t_1$  hattına atanmıştır.



Şekil 5.7 Küçük boyutlu problem için  $t_2$  manevra hattına atama

Şekil 5.7’de gösterildiği üzere; genel sıralama kümesine göre gelen  $i_3$  vagonu, giden  $j_4$  vagonu ile eşleştirilerek  $t_2$  hattına atanmıştır. Sonrasında, gelen  $i_4$  vagonu, giden  $j_3$  vagonu ile eşleştirilerek  $t_2$  hattına atanmıştır. Genel sıralamada giden  $j_3$  vagonundan sonra giden  $j_4$  vagonu  $t_2$  hattına atandığından giden  $j_3$  vagonunun çıkışını engellememiştir. Ulaşılan çözümde bloklama oluşmadığı gibi hat uzunlukları da aşılmamıştır. Marşandiz manevra örneği içinse atamalar Şekil 5.8’de verilmektedir.



Şekil 5.8 Marşandiz manevra örneği t1 ve t2 hatlarına atama

Marşandiz manevra problemi için gelen 36 vagonun giden 36 vagon ile bloklama olmadan ve hat uzunlukları aşılmadan t<sub>1</sub> ve t<sub>2</sub> manevra hatlarına atamalarının gerçekleşmiş olduğu Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Hat uzunluğu 411 m olan t<sub>1</sub> manevra hattının % 97’si, uzunluğu 611 m olan t<sub>2</sub> manevra hattının ise % 56’sı manevrada kullanılmıştır.

Çalışılan küçük boyutlu probleminin amaç fonksiyonu değeri olan minimum toplam manevra maliyeti 26 birim, Marşandiz manevra örneği için ise bu değer 7 680 birim olarak gerçekleşmiştir. Mevcut durumda Marşandiz manevra örneğinin gerçek hayat vagon-manevra hattı atamalarına ulaşamadığından önerilen atamalar ile mevcut atamalar karşılaştırılamamıştır. Ancak planlamacılar mevcut durumda, Marşandiz manevra örneğindeki manevra hatlarına atamanın her hatta sadece bir yöne gidecek vagonların atanması şeklinde yapılmış olabileceğini belirtmişlerdir. Mevcut durumda yönlerine göre vagonların; A yönü t<sub>1</sub>, B yönü t<sub>2</sub>, C yönü t<sub>3</sub>, D yönü t<sub>4</sub> ve E yönü t<sub>5</sub> manevra hatlarına atandığı varsayımı doğrultusunda toplam manevra maliyeti 9,120 birim olarak hesaplanmıştır. Bu durum %17’lik bir iyileştirmeyi göstermektedir.

#### 5.4. Problem Türetme

Çalışılan gerçek hayat problemindeki 5 farklı yöne sahip 36 vagon için farklı sıralamalar ile 12 problem türetilmiştir. Problem türetmede; aynı türdeki vagonların birbirinden ayrılmamış ve birlikte manevra hatlarına giriş-çıkış yaptıkları, B türündeki



vagonların geliş sıralarının aynı olduğu (2. sıra) ve A türünde vagonların sıralamada C türündeki vagonlardan önce ( $A < C$ ) olduğu varsayılmıştır. Türetilen problemlere ait geliş sıralamaları Çizelge 5.8’de gösterilmiştir. Manevra hattından gidiş sıralaması geliş sıralamasının tersi olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.8. Türetilen problemler için geliş-gidiş sıralamaları

| Problem | Geliş Sırası |   |   |   |   | Gidiş Sırası |   |   |   |   |
|---------|--------------|---|---|---|---|--------------|---|---|---|---|
| P1      | A            | B | C | D | E | E            | D | C | B | A |
| P2      | A            | B | C | E | D | D            | E | C | B | A |
| P3      | A            | B | D | C | E | E            | C | D | B | A |
| P4      | A            | B | D | E | C | C            | E | D | B | A |
| P5      | A            | B | E | D | C | C            | D | E | B | A |
| P6      | A            | B | E | C | D | D            | C | E | B | A |
| P7      | D            | B | A | C | E | E            | C | A | B | D |
| P8      | D            | B | A | E | C | C            | E | A | B | D |
| P9      | D            | B | E | A | C | C            | A | E | B | D |
| P10     | E            | B | A | C | D | D            | C | A | B | E |
| P11     | E            | B | A | D | C | C            | D | A | B | E |
| P12     | E            | B | D | A | C | C            | A | D | B | E |

Çizelge 5.8’de geliş-gidiş sıralamaları verilen problemlerden örneğin P1 için vagon türü A olan 21 m uzunluğundaki 10 adet vagon manevra alanına ilk sırada gelir ve bu vagonlar alandan en son gönderilecektir. P12 için ise vagon türü E olan 16 m uzunluğundaki 3 vagon alana ilk sırada gelir ve alandan en son sırada gönderilir. Türetilen 12 problemin GAMS/CPLEX çözümünde 1 ve 2 nolu manevra hatları kullanılarak farklı atamalar elde edilmiş olup ulaşılan amaç fonksiyonu değerleri aynı olup 7,680 birim ve çözüm süreleri 0,27 dakikadır.

Farklı manevra hatları kullanıldığında atama sonucunun nasıl değişeceğini görmek üzere gerçek hayat problemindeki geliş sıralamaları Çizelge 5.5’te paylaşılan farklı türde 36 gelen vagon için olası tüm ikili hatlar kullanılarak atama sonuçları ve katlanılacak toplam manevra maliyetleri araştırılmıştır. Çalışılan gerçek hayat problemi çözümünde birbirinden farklı olası tüm ikili manevra hat kombinasyonları kullanılarak  $C(6, 2) = 15$  farklı atama için elde edilen model sonuçları Çizelge 5.9’da gösterilmektedir.

Çizelge 5.9 Türetilen 2'li hat atamaları için model bilgileri

| Atama | Manevra Hatları | CPU Süresi (dakika) | Amaç Fonksiyon Değeri (birim) | Hat Kullanım Oranı (%) |
|-------|-----------------|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| A1    | t1, t2          | 0,14                | 7 680                         | 72%                    |
| A2    | t1, t3          | 0,13                | 8 448                         | 72%                    |
| A3    | t1, t4          | 0,13                | 9 216                         | 61%                    |
| A4    | t1, t5          | 0,16                | 9 984                         | 67%                    |
| A5    | t1, t6          | 0,13                | 10 752                        | 67%                    |
| A6    | t2, t3          | 0,14                | 8 928                         | 61%                    |
| A7    | t2, t4          | 0,13                | 9 216                         | 52%                    |
| A8    | t2, t5          | 0,13                | 9 504                         | 57%                    |
| A9    | t2, t6          | 0,14                | 9 792                         | 57%                    |
| A10   | t3, t4          | 0,20                | 10 656                        | 52%                    |
| A11   | t3, t5          | 0,16                | 10 944                        | 57%                    |
| A12   | t3, t6          | 0,22                | 11 232                        | 57%                    |
| A13   | t4, t5          | 0,11                | 12 096                        | 50%                    |
| A14   | t4, t6          | 0,25                | 12 096                        | 50%                    |
| A15   | t5, t6          | 0,14                | 13 968                        | 54%                    |

1 ve 2 numaralı manevra hatları kullanılarak elde edilen en düşük toplam manevra maliyeti değeri 7,680 birim ve hat kullanım oranı % 72 ile Çizelge 5.9'da ilk sıradaki atamadır (A1). En düşük ikinci toplam manevra maliyeti A1 ile aynı hat kullanım oranında 2 ve 3 numaralı hatlara atamada (A2) 8,448 birim olarak elde edilmiştir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ele alınan DAMP, manevra alanına gelen vagonların giden vagonlar ile eşleştirilmesi ve uygun manevra hattına en az manevra maliyetiyle atanması olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada amaçlanan, manevra planlayıcılarına demiryolu trafiğinin yoğun yaşandığı manevra alanlarında karar vermeleri gereken manevra planlarında yardımcı olmaktır. Mevcut durumda manuel olarak planlanan manevra hareketleri kaynaklı maliyetlerin değerlendirilmesi ve performans ölçümü açısından çalışmanın fayda sağlayacağı beklenmektedir.

DAMP için Schrijver (2003)'in modelini temel alan bir TDP önerilmiş ve model GAMS yazılımı kullanılarak kodlanmış olup CPLEX çözücüsü ile eniyi çözümlere ulaşılmıştır. Modelin uygulamasında TCDD işletmesi idaresinde Ankara il sınırları içinde bulunan Marşandiz Gar manevra alanında 2015 yılı Mayıs ayında 24 saatlik bir zaman penceresinde gerçekleştirilen manevra işlemlerine ait veriler kullanılmıştır. Çözüm sonucunda ulaşılan manevra maliyeti ile mevcut durumda katlanılan maliyetler karşılaştırıldığında ulaşılan manevra maliyetinin mevcut duruma göre %17 daha düşük olduğu görülmüştür.

Ayrıca Marşandiz Gar örneği farklı vagon sıralamaları ile türetilen 12 problem çözülmüş, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde, vagonların atandığı hatlar farklılaştırılarak türetilen 15 problem de çözülmüş elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Manevra planlama, her ne kadar yük taşımacılığı için incelenmiş olsa da önerilen model ile gün içinde çalışmalarını tamamladıktan sonra gece park edilmek üzere manevra alanlarına sevk edilecek yolcu vagonları için de kullanılabilir. Yük taşımacılık alanında faaliyet gösteren ve son yıllarda ülkemizde sayısı giderek artan lojistik merkezlerde de önerilen model ile manevra planlama çalışmaları yapılması mümkündür.

İleri çalışmalara ışık tutması açısından; çalışılan DAMP modeli, manevra alanından sevk edilecek tren için diğer bir kısıt olan ilgili yöndeki en düşük güce sahip lokomotif çekeri atamaları ve manevra alanında gerçekleştirilen servis işlemleri de göz önünde

bulundurularak geliştirilebilir. Ayrıca model sonuçlarından hareketle manevra lokomotif ve manevra personeli çizelgelemesi de eklenerek bütünleşik bir yaklaşım geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akker, M., Baarsma, H., Hurink, J., Modelski, M., Paulus, J. J., Reijnen I. vd., 2008, Shunting passenger trains: getting ready for departure, Technical Report UU-CS-2008-035, <https://www.researchgate.net/publication/46708784>, erişim tarihi: 11.05.2019.
- Aksen, D., 1998, Teach Yourself GAMS, Boğaziçi University Press, p.47-101.
- Alev, I., Çavdar, B., Çelik, B., Demirel, V., Güller A., 2009, Yük treni istasyonlarında hareket planlaması, Makine Mühendisleri Odası Endüstri Mühendisliği Dergisi, 20, 3, 2-21.
- Anonim, 2018, TCDD 2017 Faaliyet Raporu, <http://www.tcdd.gov.tr/files/istatistik/2017faaliyetraporu.pdf>, erişim tarihi: 10.05.2019.
- Anonim, 2018, TCDD Taşımacılık 203 Nolu Genel Emir, [http://www.tcddtasimacilik.gov.tr/files/3/mevzuat/203\\_Numarali\\_Genel\\_Emir.doc](http://www.tcddtasimacilik.gov.tr/files/3/mevzuat/203_Numarali_Genel_Emir.doc), erişim tarihi: 11.05.2019.
- Anonim, Demiryollarının 162 Yılı, <http://www.tcdd.gov.tr/content/e-kitap#162.%20YIL/1>, erişim tarihi: 08.05.2019.
- Beygang, K., Dahms, F., Krumke, O.S., 2010, Train marshalling problem-algorithms and bounds, <https://www.researchgate.net/publication/228849068>, erişim tarihi: 06.06.2019.
- Bilgiç, Ş., Demiryolu Ders Notları, 2017, <http://web.ogu.edu.tr/Storage/akalin/Uploads/demiryolu-dersnotu-1-2017.pdf>, erişim tarihi: 01.05.2019.
- Blasum, U., Bussieck, M. R., Hochstattler, W., Moll, C., Winter, T. vd., 1999, Scheduling trams in the morning, Mathematical Methods of Operational Research, <https://www.researchgate.net/publication/225352003>, erişim tarihi: 02.05.2019.
- Boysen, N., Emde, S., Fliedner, M., 2016, The basic train makeup problem in shunting yards, OR Spectrum, 38, 207-233.
- Broek, R. W., 2016, Train Shunting and Service Scheduling: an integrated local search approach, Msc. Thesis, Utrecht University, p. 63.
- Caprara, A., Kroon L., Monaci, M., Peeters, M., Toth, P., 2007, Passenger railway optimization, Barnhart, C., Laporte, G. (Eds.) Handbook in OR&MS, p.129-187.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cicerone, S., D'Angelo, G., Stefano, D. G., Frigioni, D., Navarra, A., 2009, Recoverable robustness for train shunting problems, *Algorithmic Operations Research*, 4, 102-116.
- Cordeau, J. F., Toth, P., Vigo, D., 1998, A survey of optimization models for train routing and scheduling, *Transportation Science*, 32, 4, 380-404.
- Dahlhaus, E., Horak, P., Miller, M., Ryan, J. F., 2000, The Train Marshalling Problem, *Discrete Applied Mathematics*, 103, 41-54.
- Di Stefano, G., Koci, M. L., 2004, a Graph Theoretical Approach To The Shunting Problem, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 92, 16-33.
- Eggermont, C., Hurkens, C. A. J., Modelski, M., Woeginger, G. J., 2009, The hardness of train rearrangements, *Operations Research Letters*, 37, 80-82.
- Freling, R., Lentink, R. M., Kroon, L. G., Huisman, D., 2002, Shunting of passenger train units in a railway station, *Econometric Institute Report EI2002-26*, p.1-19.
- Gallo, G., Federico, M., 2001, Dispatching buses in parking depots, *Transportation Science* 35, 3, 322-330.
- Gatto, M., Maue, J., Mihalak, M., Widmayer, P., 2009, Shunting for dummies: an introductory algorithmic survey, <https://www.researchgate.net/publication/225576076>, erişim tarihi: 21.06.2019.
- Gestrelus, S., Dahms, F., Bohlin, M., 2013, Optimisation of simultaneous train formation and car sorting at marshalling yards, *Swedish Transport Administration (Trafikverket)*, 1-17.
- Haahr, J.T., Lusby, R.M., Wagenaar, J.C., 2015, A comparison of optimization methods for solving the depot matching and parking problem, <https://www.researchgate.net/publication/282860940>, erişim tarihi: 15.06.2019
- Hamdouni, M., Soumis, F., Desaulniers, G., 2006, Parking buses in a depot with stochastic arrival times, *European Journal of Operational Research*, 183, 502–515.
- He, S., Song, R., Chaundhry, S. S., 2000, Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards operations, *European Journal of Operational Research*, 124, 307-331.
- Jacobsen, P., M., Pisinger, D., 2011, Train shunting at a workshop area, *Flexible Service Manufacturing Journal*, 23, 156–180.
- Lentink, R. M., 2006, Algorithmic decision support for shunt planning, Phd. Thesis, Erasmus University Rotterdam, p.247.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lentink, R. M., Fioole, P. J., Kroon, L. G., Woudt C., 2003, Applying operations research techniques to planning of train shunting, Report Series Research In Management, Erasmus Research Institute of Management, p.25.
- MEB, 2011, Raylı Sistemler Teknolojisi Manevrular, [http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Tren%20Te%C5%9Fkili.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Tren%20Te%C5%9Fkili.pdf), erişim tarihi: 09.05.2019.
- Otto, A., Pesch E., 2017, Operation of shunting yards: train-to-yard assignment problem, Journal of Business Economics, 87, 4, p.465-486.
- Saraç, T., 2016, GAMS'te sonuç dosyası yazdırma, Sanal Derslik, <https://www.youtube.com/watch?v=-mkcFL6EvB4>, erişim tarihi: 12.05.2019.
- Schrijver, A., 2003, Rangeren op Opstelsporen, Technical Report, CWI.
- Schrijver, A., Lentink, R., M., Kroon, L., G., 2005, Shunting of passenger train units: an integrated approach, Transportation Science, 39, 2, 147-288.
- Shi, T., Zhou, X., 2015, A mixed integer programming model for optimizing multi-level operations process in railroad yards, Transportation Research Part B, 80, p.19-39.
- Tomii, N., Zhou, Li J., 2000, Depot shunting scheduling using combined genetic algorithm and PERT, Brebbia C. A., Allan J., Hill R.J., Sciutto G., Sone S. (Eds.) Computers in Railways VII, p.1-10.
- Tormos, P., Abril, M., Salido, M. A., Barber, F., Ingolotti L. vd., 2006, Distributed constraint satisfaction problems to model railway scheduling problems, Computers in Railways, 88, p.289-297.
- UAB, 2011, Ulaştırma ve Haberleşme Terimleri Sözlüğü, [http://www.dtd.org.tr/\\_files/ulusal/ulascca7tc4b1rmavehaberlescca7meterimlerisoc88zlucc88gcc86u.pdf](http://www.dtd.org.tr/_files/ulusal/ulascca7tc4b1rmavehaberlescca7meterimlerisoc88zlucc88gcc86u.pdf), erişim tarihi: 09.05.2019.
- Winter, T., Zimmermann, T. U., 1999, Real-Time Dispatch of Trams in Storage Yards, Schwerpunktprogramm Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, 32.

## **EK AÇIKLAMALAR**

**Ek Açıklama – A:** Küçük boyutlu problem için GAMS kodu

**Ek Açıklama – B:** Küçük boyutlu problemin GAMS sonuç çıktısı

**Ek Açıklama – C:** Marşandiz Gar manevra problemi GAMS kodu

**EK Açıklama – D:** Marşandiz Gar manevra probleminin GAMS sonuç çıktısı



## Ek Açıklama – A: Küçük boyutlu problem için GAMS kodu

```

1  $title Manevra Maliyetinin En Küçüklenmesi
2  $onText
3  Bu problem tren vagonlarının en az manevra ile sevkini ve manevra
4  maliyetinin en küçüklenmesini ele almaktadır.
5
6  $offtext
7
8  SETS
9      IJ      'gelen ve giden vagonlar sıralaması' / i1, i2, j1, i3, i4, j2, i5,»
          j3, j4, j5/
10     I(IJ)   'gelen vagonlar alt kümesi' / i1*i5/
11     J(IJ)   'giden vagonlar alt kümesi' / j1*j5 / ;
12
13  SETS
14     I1(I)   'j1 dan önce gelen aynı tipden gelen vagonlar kümesi' /i2/
15     I2(I)   'j2 dan önce gelen aynı tipden gelen vagonlar kümesi' /i1, i4/
16     I3(I)   'j3 dan önce gelen aynı tipden gelen vagonlar kümesi' /i1, i4/
17     I4(I)   'j4 dan önce gelen aynı tipden gelen vagonlar kümesi' /i3, i5/
18     I5(I)   'j5 dan önce gelen aynı tipden gelen vagonlar kümesi' /i3, i5/
19
20     J1(J)   'i1 dan sonra gidecek aynı tipden giden vagonlar kümesi' /j2, j3/
21     J2(J)   'i2 dan sonra gidecek aynı tipden giden vagonlar kümesi' /j1/
22     J3(J)   'i3 dan sonra gidecek aynı tipden giden vagonlar kümesi' /j4, j5/
23     J4(J)   'i4 dan sonra gidecek aynı tipden giden vagonlar kümesi' /j2, j3/
24     J5(J)   'i5 dan sonra gidecek aynı tipden giden vagonlar kümesi' /j4, j5/;
25
26  Alias (IJ, IJP);
27  Alias (J, JP);
28  Alias (I, IP);
29
30  SET BEFOREIJ(IJ,IJP) /i1.(i2, j1, i3, i4, j2, i5, j3, j4, j5),
31                          i2.(j1, i3, i4, j2, i5, j3, j4, j5),
32                          j1.(i3, i4, j2, i5, j3, j4, j5),
33                          i3.(i4, j2, i5, j3, j4, j5),
34                          i4.(j2, i5, j3, j4, j5),
35                          j2.(i5, j3, j4, j5),
36                          i5.(j3, j4, j5),
37                          j3.(j4, j5),
38                          j4.j5/;
39
40  SET AFTERJ(J,JP) /j2.j1,
41                   j3.(j1, j2),
42                   j4.(j1, j2, j3),
43                   j5.(j1, j2, j3, j4)/;
44
45
46  SET BEFOREI(I,IP) /i1.(i2, i3, i4, i5),
47                   i2.(i3, i4, i5),
48                   i3.(i4, i5),
49                   i4.i5/;
50
51  SET BEFOREJI(IJ,IJP) /i3.j1,
52                       i4.j1,
53                       i5.(j1,j2)/;
54
55
56  SET BEFOREI2(I,IP) /i1.(i1, i2, i3, i4, i5),
57                   i2.(i2, i3, i4, i5),
58                   i3.(i3, i4, i5),
59                   i4.(i4, i5),
60                   i5.i5/;

```

## Ek Açıklama – A: Küçük boyutlu problem için GAMS kodu (devam)

```

61
62 SET   T 'manevra hatları kümesi' /t1*t2/;
63
64
65 Binary variable Zi(i,t)   'gelen i vagonu t hattına atandı ise =1'
66                   Zj(j,t)   'gelen j vagonu t hattına atandı ise =1'
67                   X(i,j,t)   'gelen i vagonu t hattında giden j vagonu ile eşleş»
    ti ise =1';
68
69
70 Variable z;
71
72 Equations
73   esitlik2 'gelen her bir vagonun mutlaka bir hatta atanması'
74   esitlik3 'giden her bir vagonun mutlaka bir hatta atanması'
75   esitlik41 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
76   esitlik42 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
77   esitlik43 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
78   esitlik44 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
79   esitlik45 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
80
81   esitlik51 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
82   esitlik52 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
83   esitlik53 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
84   esitlik54 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
85   esitlik55 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
86
87   esitlik611 'bloklamanın engellenmesi'
88   esitlik612 'bloklamanın engellenmesi'
89   esitlik613 'bloklamanın engellenmesi'
90   esitlik614 'bloklamanın engellenmesi'
91   esitlik615 'bloklamanın engellenmesi'
92
93   esitlik621 'bloklamanın engellenmesi'
94   esitlik622 'bloklamanın engellenmesi'
95   esitlik623 'bloklamanın engellenmesi'
96   esitlik624 'bloklamanın engellenmesi'
97   esitlik625 'bloklamanın engellenmesi'
98   esitlik631 'bloklamanın engellenmesi'
99   esitlik632 'bloklamanın engellenmesi'
100  esitlik633 'bloklamanın engellenmesi'
101  esitlik634 'bloklamanın engellenmesi'
102  esitlik635 'bloklamanın engellenmesi'
103  esitlik641 'bloklamanın engellenmesi'
104  esitlik642 'bloklamanın engellenmesi'
105  esitlik643 'bloklamanın engellenmesi'
106  esitlik644 'bloklamanın engellenmesi'
107  esitlik645 'bloklamanın engellenmesi'
108  esitlik651 'bloklamanın engellenmesi'
109  esitlik652 'bloklamanın engellenmesi'
110  esitlik653 'bloklamanın engellenmesi'
111  esitlik654 'bloklamanın engellenmesi'
112  esitlik655 'bloklamanın engellenmesi'
113
114  esitlik71 'hat uzunluğu kapasitesi'
115  esitlik72 'hat uzunluğu kapasitesi'
116  esitlik73 'hat uzunluğu kapasitesi'
117  esitlik74 'hat uzunluğu kapasitesi'
118  esitlik75 'hat uzunluğu kapasitesi'
119
120  amac      'amac fonksiyon' ;

```

## Ek Açıklama – A: Küçük boyutlu problem için GAMS kodu (devam)

```

121
122 parameter WL1(I) 'gelen vagon uzunluğu(m)' /i1 5, i2 10, i3 20,i4 5,i5 2>
0/
123 parameter WL2(J) 'giden vagon uzunluğu(m)' /j1 10,j2*j3 5, j4*j5 20/;
124
125 parameter E(I) 'giden vagon tipleri' /i1 1, i2 2, i3 3, i4 1, i5 3/
126 parameter D(J) 'giden vagon tipleri' /j1 2, j2*j3 1, j4*j5 3/
127
128 parameter L(T) 'manevra hat uzunluğu (m)' /t1 20, t2 30/;
129 parameter c(T) 'birim manevra maliyeti hat başına (TL)'/t1 1, t2 5/;
130
131
132 amac.. z =e= sum((i,t), c(t)*Zi(i,t)) + sum((j,t), c(t)*Zj(j,t));
133
134
135 esitlik2(I).. sum(T, Zi(I,T)) =e= 1;
136
137 esitlik3(J).. sum(T, Zj(J,T)) =e= 1;
138
139 esitlik41('i1',T).. sum(J1(J), X('i1',J,T)) =e= Zi('i1',T);
140 esitlik42('i2',T).. sum(J2(J), X('i2',J,T)) =e= Zi('i2',T);
141 esitlik43('i3',T).. sum(J3(J), X('i3',J,T)) =e= Zi('i3',T);
142 esitlik44('i4',T).. sum(J4(J), X('i4',J,T)) =e= Zi('i4',T);
143 esitlik45('i5',T).. sum(J5(J), X('i5',J,T)) =e= Zi('i5',T);
144
145 esitlik51('j1',T).. sum(I1(I), X(I,'j1',T)) =e= Zj('j1',T);
146 esitlik52('j2',T).. sum(I2(I), X(I,'j2',T)) =e= Zj('j2',T);
147 esitlik53('j3',T).. sum(I3(I), X(I,'j3',T)) =e= Zj('j3',T);
148 esitlik54('j4',T).. sum(I4(I), X(I,'j4',T)) =e= Zj('j4',T);
149 esitlik55('j5',T).. sum(I5(I), X(I,'j5',T)) =e= Zj('j5',T);
150
151
152 esitlik611('i1','j1',T)$ BEFOREIJ('i1','j1').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j1')), X>
('i1',J1,T))
+ sum(I1$(BEFOREI(I1,'i1')) , X(I1,'j1',T)) =1= 1;
153
154
155 esitlik612('i1','j2',T)$ BEFOREIJ('i1','j2').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j2')), X>
('i1',J1,T))
+ sum(I2$(BEFOREI(I2,'i1')) , X(I2,'j2',T)) =1= 1;
156
157
158 esitlik613('i1','j3',T)$ BEFOREIJ('i1','j3').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j3')), X>
('i1',J1,T))
+ sum(I3$(BEFOREI(I3,'i1')) , X(I3,'j3',T)) =1= 1;
159
160
161 esitlik614('i1','j4',T)$ BEFOREIJ('i1','j4').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j4')), X>
('i1',J1,T))
+ sum(I4$(BEFOREI(I4,'i1')) , X(I4,'j4',T)) =1= 1;
162
163
164 esitlik615('i1','j5',T)$BEFOREIJ('i1','j5').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j5')), X(>
'i1',J1,T))
+ sum(I5$(BEFOREI(I5,'i1')) , X(I5,'j5',T)) =1= 1;
165
166
167
168
169 esitlik621('i2','j1',T)$ BEFOREIJ('i2','j1').. sum(J2$(AFTERJ(J2,'j1')), X>
('i2',J2,T))
+ sum(I1$(BEFOREI(I1,'i2')) , X(I1,'j1',T)) =1= 1;
170
171
172 esitlik622('i2','j2',T)$BEFOREIJ('i2','j2').. sum(J2$(AFTERJ(J2,'j2')), X(>
'i2',J2,T))
+ sum(I2$(BEFOREI(I2,'i2')) , X(I2,'j2',T)) =1= 1;
173

```

## Ek Açıklama – A: Küçük boyutlu problem için GAMS kodu (devam)

```

174
175   esitlik623('i2','j3',T)$ BEFOREIJ('i2','j3').. sum(J2$(AFTERJ(J2,'j3')), X>
('i2',J2,T))
176           + sum(I3$(BEFOREI(I3,'i2')) , X(I3,'j3',T)) =1= 1;
177
178   esitlik624('i2','j4',T)$ BEFOREIJ('i2','j4').. sum(J2$(AFTERJ(J2,'j4')), X>
('i2',J2,T))
179           + sum(I4$(BEFOREI(I4,'i2')) , X(I4,'j4',T)) =1= 1;
180
181   esitlik625('i2','j5',T)$ BEFOREIJ('i2','j5').. sum(J2$(AFTERJ(J2,'j5')), X>
('i2',J2,T))
182           + sum(I5$(BEFOREI(I5,'i2')) , X(I5,'j5',T)) =1= 1;
183
184
185
186   esitlik631('i3','j1',T)$ BEFOREIJ('i3','j1').. sum(J3$(AFTERJ(J3,'j1')), X>
('i3',J3,T))
187           + sum(I1$(BEFOREI(I1,'i3')) , X(I1,'j1',T)) =1= 1;
188
189   esitlik632('i3','j2',T)$ BEFOREIJ('i3','j2').. sum(J3$(AFTERJ(J3,'j2')), X>
('i3',J3,T))
190           + sum(I2$(BEFOREI(I2,'i3')) , X(I2,'j2',T)) =1= 1;
191
192   esitlik633('i3','j3',T)$ BEFOREIJ('i3','j3').. sum(J3$(AFTERJ(J3,'j3')), X>
('i3',J3,T))
193           + sum(I3$(BEFOREI(I3,'i3')) , X(I3,'j3',T)) =1= 1;
194
195   esitlik634('i3','j4',T)$ BEFOREIJ('i3','j4').. sum(J3$(AFTERJ(J3,'j4')), X>
('i3',J3,T))
196           + sum(I4$(BEFOREI(I4,'i3')) , X(I4,'j4',T)) =1= 1;
197
198   esitlik635('i3','j5',T)$ BEFOREIJ('i3','j5').. sum(J3$(AFTERJ(J3,'j5')), X>
('i3',J3,T))
199           + sum(I5$(BEFOREI(I5,'i3')) , X(I5,'j5',T)) =1= 1;
200
201
202
203   esitlik641('i4','j1',T)$ BEFOREIJ('i4','j1').. sum(J4$(AFTERJ(J4,'j1')), X>
('i4',J4,T))
204           + sum(I1$(BEFOREI(I1,'i4')) , X(I1,'j1',T)) =1= 1;
205
206   esitlik642('i4','j2',T)$ BEFOREIJ('i4','j2').. sum(J4$(AFTERJ(J4,'j2')), X>
('i4',J4,T))
207           + sum(I2$(BEFOREI(I2,'i4')) , X(I2,'j2',T)) =1= 1;
208
209   esitlik643('i4','j3',T)$ BEFOREIJ('i4','j3').. sum(J4$(AFTERJ(J4,'j3')), X>
('i4',J4,T))
210           + sum(I3$(BEFOREI(I3,'i4')) , X(I3,'j3',T)) =1= 1;
211
212   esitlik644('i4','j4',T)$ BEFOREIJ('i4','j4').. sum(J4$(AFTERJ(J4,'j4')), X>
('i4',J4,T))
213           + sum(I4$(BEFOREI(I4,'i4')) , X(I4,'j4',T)) =1= 1;
214
215   esitlik645('i4','j5',T)$ BEFOREIJ('i4','j5').. sum(J4$(AFTERJ(J4,'j5')), X>
('i4',J4,T))
216           + sum(I5$(BEFOREI(I5,'i4')) , X(I5,'j5',T)) =1= 1;
217
218
219   esitlik651('i5','j1',T)$ BEFOREIJ('i5','j1').. sum(J5$(AFTERJ(J5,'j1')), X>
('i5',J5,T))
220           + sum(I1$(BEFOREI(I1,'i5')) , X(I1,'j1',T)) =1= 1;

```

## Ek Açıklama – A: Küçük boyutlu problem için GAMS kodu (devam)

```

221
222   esitlik652('i5','j2',T)$ BEFOREIJ('i5','j2').. sum(J5$(AFTERJ(J5,'j2')), X»
('i5',J5,T))
223           + sum(I2$(BEFOREI(I2,'i5')) , X(I2,'j2',T)) =1= 1;
224
225   esitlik653('i5','j3',T)$ BEFOREIJ('i5','j3').. sum(J5$(AFTERJ(J5,'j3')), X»
('i5',J5,T))
226           + sum(I3$(BEFOREI(I3,'i5')) , X(I3,'j3',T)) =1= 1;
227
228   esitlik654('i5','j4',T)$ BEFOREIJ('i5','j4').. sum(J5$(AFTERJ(J5,'j4')), X»
('i5',J5,T))
229           + sum(I4$(BEFOREI(I4,'i5')) , X(I4,'j4',T)) =1= 1;
230
231   esitlik655('i5','j5',T)$ BEFOREIJ('i5','j5').. sum(J5$(AFTERJ(J5,'j5')), X»
('i5',J5,T))
232           + sum(I5$(BEFOREI(I5,'i5')) , X(I5,'j5',T)) =1= 1;
233
234
235   esitlik71('i1',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i1')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(BEF»
OREJI('i1',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
236   esitlik72('i2',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i2')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(BEF»
OREJI('i2',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
237   esitlik73('i3',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i3')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(BEF»
OREJI('i3',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
238   esitlik74('i4',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i4')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(BEF»
OREJI('i4',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
239   esitlik75('i5',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i5')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(BEF»
OREJI('i5',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
240
241 model deneme /all/;
242 solve deneme using MIP minimizing z;
243 DISPLAY "IJ =",IJ, " I= ", I, "J= ", J;
244 display x.l, zi.l, zj.l;
245
246 file sonuclar/C:\Users\Tcdd.LPT0EYSDAI0001\Desktop\sonuclar_A6.txt/;
247
248 put sonuclar;
249
250 put system.ifile/;
251 put system.date/;
252 put system.time/;
253
254 put '*****'/;
255 put 'sure           z'/;
256 put deneme.resusd;
257 put z.l/;
258
259 put '*****'/;
260
261 put 'i           j           t           E(i)           D(j)           Zi(i,»
t)           Zj(j,t)           X(i,j,t)'/;
262
263 Loop ((i,j,t), if(X.l(i,j,t)>0 and Zi.l(i,t)>0 and Zj.l(j,t)>0, put i.tl j.tl»
t.tl, E(i) D(j) X.l(i,j,t) Zi.l(i,t) Zj.l(j,t) /));
264 putclose sonuclar
265

```

## Ek Açıklama – B: Küçük boyutlu problemin GAMS sonuç çıktısı

08/26/19

09:25:44

\*\*\*\*\*

sure

z

0.11

26.00

\*\*\*\*\*

| i  | j  | t  | E(i) | D(j) | Zi(i,t) | Zj(j,t) | X(i,j,t) |
|----|----|----|------|------|---------|---------|----------|
| i1 | j2 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i2 | j1 | t1 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i3 | j4 | t2 | 3.00 | 3.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i4 | j3 | t2 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i5 | j5 | t1 | 3.00 | 3.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |

## Ek Açıklama – C: Marşandiz Gar manevra problemi GAMS kodu

```

1 $title Manevra Maliyetinin En Küçüklenmesi
2 $onText
3 Bu problem tren vagonlarının en az manevra ile sevkini ve manevra
4 maliyetinin en küçüklenmesini ele almaktadır.
5
6 $offtext
7
8 Set
9   IJ      'gelen ve giden vagonlar sıralaması' / i1*i36,j1*j36/
10  I(IJ)   'gelen vagonlar alt kümesi' / i1*i36/
11  J(IJ)   'giden vagonlar alt kümesi' / j1*j36 / ;
12
13 Sets
14  I1(I)   ' alt kümeler      '      /i34*i36/
15  I2(I)   ' alt kümeler      '      /i34*i36/
16  I3(I)   ' alt kümeler      '      /i34*i36/
17  I4(I)   ' alt kümeler      '      /i31*i33/
18  I5(I)   ' alt kümeler      '      /i31*i33/
.
.
.
49  I36(I)  ' alt kümeler      '      /i1*i10/;
50
51 SETS
52  J1(J)   /j27*j36/
53  J2(J)   /j27*j36/
54  J3(J)   /j27*j36/
55  J4(J)   /j27*j36/
56  J5(J)   /j27*j36/
.
.
.
91  J36(J)  /j1*j3/ ;
92
93
94 Alias (IJ, IJP);
95 Alias (J, JP);
96 Alias (I, IP);
97
98
99 Set BEFOREIJ(IJ,IJP) /i1.(i2*i36, j1*j36),
100                          i2.(i3*i36, j1*j36),
101                          i3.(i4*i36, j1*j36),
102                          i4.(i5*i36, j1*j36),
103                          i5.(i6*i36, j1*j36),

```

**Ek Açıklama – C: Marşandiz Gar manevra problemi GAMS kodu (devam)**

```

169             j35.(j36) /;
170
171
172 SET AFTERJ(J,JP) /j2.j1,
173             j3.(j1*j2),
174             j4.(j1*j3),
175             j5.(j1*j4),
176             j6.(j1*j5),
.
.
.
206             j36.(j1*j35)/;
207
208
209 SET BEFOREI(I,IP) /i1.(i2*i36),
210             i2.(i3*i36),
211             i3.(i4*i36),
212             i4.(i5*i36),
213             i5.(i6*i36),
.
.
.
243             i35.i36 /;
244 $onempty
245 SET BEFOREJI(IJ,IJP) / /;
246
247
248 SET BEFOREI2(I,IP)/ i1.(i1*i36),
249             i2.(i2*i36),
250             i3.(i3*i36),
251             i4.(i4*i36),
252             i5.(i5*i36),
.
.
.
283             i36.i36 /;
284
285 SET T 'manevra hatları' /t1*t6/;

```



## Ek Açıklama – C: Marşandiz Gar manevra problemi GAMS kodu (devam)

```

301  binary variable Zi(i,t)  'gelen i vagonu t hattına atandı ise 1'
302                      Zj(j,t)  'gelen j vagonu t hattına atandı ise 1'
303                      X(i,j,t)  'gelen i vagonu t hattında giden j vagonu ile eş»
    leşti ise 1';
.
.
.

308 Equations
309  esitlik2 'gelen her bir vagonun mutlaka bir hatta atanması'
310  esitlik3 'giden her bir vagonun mutlaka bir hatta atanması'
311  ***
312
313  esitlik41 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
314  esitlik42 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
315  esitlik43 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
316  esitlik44 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
317  esitlik45 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
.
.
.

351  esitlik436 'gelen her bir vagonun t hattında giden bir vagonla eşleşmesi'
352  ****
353
354  esitlik51 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
355  esitlik52 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
356  esitlik53 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
357  esitlik54 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
358  esitlik55 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
.
.
.

392  esitlik536 'giden her bir vagonun t hattında gelen bir vagonla eşleşmesi'
393
394  ***  6.1_*
395
396  esitlik611 'bloklamanın engellenmesi'
397  esitlik612 'bloklamanın engellenmesi'
398  esitlik613 'bloklamanın engellenmesi'
399  esitlik614 'bloklamanın engellenmesi'
400  esitlik615 'bloklamanın engellenmesi'
.
.
.

```

## Ek Açıklama – C: Marşandiz Gar manevra problemi GAMS kodu (devam)

```

462   esitlik655 'bloklamanın engellenmesi'
463
464   esitlik71  'hat uzunluğu kapasitesi'
465   esitlik72  'hat uzunluğu kapasitesi'
466   esitlik73  'hat uzunluğu kapasitesi'
467   esitlik74  'hat uzunluğu kapasitesi'
468   esitlik75  'hat uzunluğu kapasitesi'

.

.

.

502   esitlik736 'hat uzunluğu kapasitesi'
503
504
505   amac      'amac fonksiyon' ;
506
507   parameter WL1(I)  'gelen vagon uzunluğu(m)' /i1*i10 21, i11*i25 21, i26*i30
30 22,i31*i33 16,i34*i36 19/;
508   parameter WL2(J)  'giden vagon uzunluğu(m)' /j1*j3 19,j4*j6 16, j7*j11 22»
, j12*j26 21, j27*j36 21/;
509
510   parameter E(I) /i1*i10 1, i11*i25 2, i26*i30 3, i31*i33 5, i34*i36 4/;
511   parameter D(J) /j1*j3 4, j4*j6 5, j7*j11 3, j12*j26 2, j27*j36 1/;
512
513   parameter L(T) 'manevra hat uzunluğu (m)' /t1 411, t2 611, t3 611, t4 8»
00, t5 692, t6 690/;
514
515   parameter c(T) 'birim manevra maliyeti (TL)'/t1 96, t2 120, t3 144, »
t4 168, t5 192, t6 216/;
516
517
518   amac.. z =e= sum((i,t), c(t)*Zi(i,t)) + sum((j,t), c(t)*Zj(j,t));

.

.

.

521   esitlik2(I).. sum(T, Zi(I,T)) =e= 1;
522
523   esitlik3(J).. sum(T, Zj(J,T)) =e= 1;
524
525   esitlik41('i1',T).. sum(J1(J), X('i1',J,T)) =e= Zi('i1',T);
526   esitlik42('i2',T).. sum(J2(J), X('i2',J,T)) =e= Zi('i2',T);
527   esitlik43('i3',T).. sum(J3(J), X('i3',J,T)) =e= Zi('i3',T);
528   esitlik44('i4',T).. sum(J4(J), X('i4',J,T)) =e= Zi('i4',T);
529   esitlik45('i5',T).. sum(J5(J), X('i5',J,T)) =e= Zi('i5',T);

.

.

.

```

## Ek Açıklama – C: Marşandiz Gar manevra problemi GAMS kodu (devam)

```

560  esitlik436('i36',T).. sum(J36(J), X('i36',J,T)) =e= Zi('i36',T);
561
562  esitlik51('j1',T).. sum(I1(I), X(I,'j1',T)) =e= Zj('j1',T);
563  esitlik52('j2',T).. sum(I2(I), X(I,'j2',T)) =e= Zj('j2',T);
564  esitlik53('j3',T).. sum(I3(I), X(I,'j3',T)) =e= Zj('j3',T);
565  esitlik54('j4',T).. sum(I4(I), X(I,'j4',T)) =e= Zj('j4',T);
566  esitlik55('j5',T).. sum(I5(I), X(I,'j5',T)) =e= Zj('j5',T);

.
.
.

600  esitlik536('j36',T).. sum(I36(I), X(I,'j36',T)) =e= Zj('j36',T);
601
602
603  *****
604
605  esitlik611('i1','j1',T)$ BEFOREIJ('i1','j1').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j1')), X»
('i1',J1,T))
606          + sum(I1$(BEFOREI(I1,'i1')), X(I1,'j1',T)) =1= 1;
607
608  esitlik612('i1','j2',T)$ BEFOREIJ('i1','j2').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j2')), X»
('i1',J1,T))
609          + sum(I2$(BEFOREI(I2,'i1')), X(I2,'j2',T)) =1= 1;
610
611  esitlik613('i1','j3',T)$ BEFOREIJ('i1','j3').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j3')), X»
('i1',J1,T))
612          + sum(I3$(BEFOREI(I3,'i1')), X(I3,'j3',T)) =1= 1;
613
614  esitlik614('i1','j4',T)$ BEFOREIJ('i1','j4').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j4')), X»
('i1',J1,T))
615          + sum(I4$(BEFOREI(I4,'i1')), X(I4,'j4',T)) =1= 1;
616
617  esitlik615('i1','j5',T)$BEFOREIJ('i1','j5').. sum(J1$(AFTERJ(J1,'j5')), X»
('i1',J1,T))

.
.
.

794  esitlik655('i5','j5',T)$ BEFOREIJ('i5','j5').. sum(J5$(AFTERJ(J5,'j5')), X»
('i5',J5,T))
795          + sum(I5$(BEFOREI(I5,'i5')), X(I5,'j5',T)) =1= 1;
796
797
798  esitlik71('i1',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i1')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(»
BEFOREJI('i1',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
799  esitlik72('i2',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i2')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(»
BEFOREJI('i2',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
800  esitlik73('i3',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i3')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(»
BEFOREJI('i3',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
801  esitlik74('i4',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i4')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(»
BEFOREJI('i4',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
802  esitlik75('i5',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i5')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(»
BEFOREJI('i5',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);

```

**Ek Açıklama – C: Marşandiz Gar manevra problemi GAMS kodu (devam)**

```
836     esitlik736('i36',T).. sum(I$(BEFOREI2(I,'i36')), WL1(I)*Zi(I,T)) - sum(J$(»
      BEFOREJI('i36',J)), WL2(J)*Zj(J,T)) =1= L(T);
837
838
839 model deneme /all/;
840 solve deneme using MIP minimizing z;
841 DISPLAY "IJ =",IJ, " I= ", I, "J= ", J;
842 display x.l, zi.l, zj.l;
```

## EK Açıklama – D: Marşandız Gar manevra probleminin GAMS sonuç çıktısı

08/26/19

12:34:29

\*\*\*\*\*

sure

z

0.34 7680.00

\*\*\*\*\*

| i   | j   | t  | E(i) | D(j) | Zi(i,t) | Zj(j,t) | X(i,j,t) |
|-----|-----|----|------|------|---------|---------|----------|
| i1  | j30 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i2  | j35 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i3  | j36 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i4  | j32 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i5  | j31 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i6  | j28 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i7  | j34 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i8  | j29 | t1 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i9  | j33 | t2 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i10 | j27 | t2 | 1.00 | 1.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i11 | j22 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i12 | j20 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i13 | j14 | t1 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i14 | j25 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i15 | j15 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i16 | j18 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i17 | j24 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i18 | j17 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i19 | j16 | t1 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i20 | j19 | t1 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i21 | j13 | t1 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i22 | j23 | t1 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i23 | j21 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i24 | j12 | t1 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i25 | j26 | t2 | 2.00 | 2.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i26 | j11 | t2 | 3.00 | 3.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i27 | j10 | t2 | 3.00 | 3.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i28 | j7  | t2 | 3.00 | 3.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i29 | j8  | t2 | 3.00 | 3.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i30 | j9  | t2 | 3.00 | 3.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i31 | j4  | t1 | 4.00 | 4.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i32 | j6  | t1 | 4.00 | 4.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i33 | j5  | t1 | 4.00 | 4.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i34 | j1  | t1 | 5.00 | 5.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i35 | j3  | t1 | 5.00 | 5.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |
| i36 | j2  | t1 | 5.00 | 5.00 | 1.00    | 1.00    | 1.00     |