

Ekip Çizelgeleme Problemi

Yüksel ÜSTÜDAÇ

ÖZET

Ekip çizelgeleme ve ekip atama problemlerinin her biri, demiryolu işletim planlamasında karşılaşılan en karmaşık ve zor problemlerdendir. Personel maliyetleri demiryolu şirketinin kontrol edebileceği büyük giderlerden birisi olduğu için, ekipleri tren seferlerine etkin olarak atamak, demiryolu işletim planlamasında önemli rol oynar. Ekip çizelgeleme probleminde, her tren seferinin en az bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsandığı en düşük maliyetli eşleştirmeler kümesi bulunmaya çalışılır. Ancak tüm olası ekip eşleştirmelerini oluşturmak oldukça zordur. Bu çalışmada, ekip çizelgeleme probleminin çözümünde sütun oluşturma algoritması ek olarak, ekip atama probleminin çözümünde ise DELPHI programlama dili ile yazılmış olan rassal atama yöntemi kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ekip çizelgeleme, Sütun türetme, Ekip atama

ABSTRACT

Crew scheduling and crew assignment problems are both most complicated and hardest problems encountered in railway planning. The assignment of the crew effectively is very important for railway planning, as personnel costs are the great values that can be controlled by the railway firm. In crew scheduling problem, the goal is to find the minimum costly set of pairings in that each journey leg is covered at least by one crew pairing. However, generating all possible crew pairings are quite difficult. In this study, column generation algorithm is used for solving crew scheduling problem in addition, random assignment method that is coded by DELPHI programming language is used for solving the crew assignment problem.

Keywords: Crew scheduling, Column generation, Crew rostering

1. GİRİŞ

Ekip çizelgeleme ya da ekip planlama problemi, görevler kümesine personel gruplarının atanması problemi olarak tanımlanabilir. Bu problem havayolu, demiryolu, karayolu gibi birçok ulaştırma grubu için oldukça önemlidir. Ekip çizelgeleme problemi, demiryolu işletim planlamasında karşılaşılan en kapsamlı problemlerden biridir. Demiryolları için tren üstü ekibini çizelgelemenin önemi oldukça fazladır. Mevcut demiryolu hatlarının büyük çoğunluğunda dizel tren işletmeciliği yapıldığı için yakıt maliyetlerinden sonra, personel maliyetleri demiryolları için en büyük maliyet faktörlerinden birisidir. Personel maliyetleri demiryolunun kontrol edebileceği en büyük giderlerden birisi olduğu için, tren seferlerine etkin personel ataması, demiryolu işletim planlaması açısından büyük önem taşımaktadır.

Ekip çizelgeleme problemi genellikle doğrusal olmayan maliyet fonksiyonuna sahip olduğu ve çok sayıda olası eşleştirmeyi içermesi nedeniyle çözülmesi zordur. Literatürde sıkça kullanılan çözüm yöntemleri, sütun oluşturma algoritmaları, özellikle genetik algoritma ve tavlama benzetimi, şebeke çözüm teknikleri ve ayrıştırma algoritmalarıdır.

Bir depoda başlayan ve sonlanan, bir tren seferinin varış şehrinin bir sonraki tren seferinin kalkış şehri ile uyuşturduğu bir tren seferleri sıralaması, eşleştirme olarak adlandırılmaktadır. Her eşleştirmenin kendisi ile ilişkili bir maliyet değeri vardır. Ekip çizelgelemede amaç, önceden belirlenen bir tren çizelgesindeki tüm tren seferlerini tam olarak bir kere kapsayan en düşük maliyetli ekip eşleştirmeleri kümesini bulmaktır.

2. DEMİRYOLU İŞLETMECİLİĞİNDE PLANLAMA

Avrupa demiryollarında yoğun rekabetten dolayı demiryolu şirketleri müşterilerine karşı belirli bir hizmet sevi-

yesine erişmek zorundadırlar. Örneğin Hollanda'da özel demiryolu şirketleri hükümetle belirli bir kalitede hizmet vereceklerine ve tren seferlerinde gecikmelere neden olmayacaklarına dair sözleşmeler imzalamaktadırlar. Söz konusu şartları yerine getirememeleri durumunda tren işletme haklarının ellerinden alınmasına kadar uzanan çeşitli yaptırımlara maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden şirketlerin çok iyi planlamalar yapması büyük önem taşımaktadır (Huisman and Wagelmans, 2006).

Demiryolu işletmeciliğinde planlama aşamaları aşağıdaki gibidir. Bu çalışmada son iki aşama detaylı olarak anlatılacaktır:

- * Tren Seferleri Çizelgesi Oluşturma
- * Uygun Lokomotif ve Vagon Bileşimi Oluşturma
- * Tren Rotalama
- * Ekip Çizelgeleme (Eşleştirme)
- * Ekip Atama

3. DEMİRYOLU EKİP ÇİZELGELEME VE EKİP ATAMA

Çizelgeleme ve atama problemi havayolu, demiryolu ve karayollarında "ekip çizelgeleme" veya "ekip atama" olarak adlandırılır. Bunların çözüm yöntemleri olarak talep modelleme (demand modelling), yapay zeka yaklaşımları, kısıtlı programlama, meta sezgiseller veya matematiksel programlama yaklaşımlarının kullanıldığı görülmektedir (Ernst et al., 2004).

Ekip eşleştirme problemleri şirketler ya da ülkeler açısından kurallar ve maliyetlere bağlı olarak farklılık gösterse de ana özellikleri benzerdir. Eşleştirmenin tersine ekip atama farklı pek çok yaklaşımla ele alınabilir. Amaç yaşam kalitesi kriterini dikkate alarak maliyetlerin minize edilmesidir. Havayollarında farklı atama prensipleri kullanıldığı gibi, diğer ulaştırma sistemlerinde bunları kombine eden esnek sistemler de uygulanmaktadır (Kohl and Karisch, 2004).

Demiryolu ekip çizelgeleme, ekonomik boyutu ve etkisi göz önüne alındığında, personel çizelgeleme uygulamalarının en kapsamlılarından biridir. Ayrıca demiryolu planlama sürecindeki en önemli aşamalardan biridir. Bu nedenle, ulaştırma sistemlerindeki uygulama alanları arasında demiryolu ekip çizelgeleme havayolu ekip çizelgeleme ile birlikte oldukça büyük öneme sahiptir.

Moudani et al., (2001) ekip üyelerinin memnuniyetini arttıracak ekip atama problemi üzerine iki amaçlı yeni bir matematiksel model önermişlerdir. Ana amaç ekip operasyon maliyetlerinin azalması, ikincil amaç ekip üyelerinin memnuniyetini arttırmak olarak alınmıştır. Sezgisel yaklaşımı genetik algoritmalarla birleştirerek maliyetleri düşürecek çözümler aramışlardır.

4. EKİP ÇİZELGELEME VE EKİP ATAMADA YAKLAŞIMLAR

Matematiksel Programlama Yöntemleri

- * Dantzig-wolfe ayrıştırması
- * Sütun türetme algoritması
- * Dal-sınır algoritması

Sezgisel Algoritmalar.

- * Genetik algoritmalar
- * Sinir ağları
- * Çok ünlü serim akış modeli

Atama Problemi Yaklaşımları

- * Macar algoritması
- * Tabu arama

5. SÜTUN OLUŞTURMA ALGORİTMASI VE RASSAL ATAMA UYGULAMASI

Ekonomik boyutu ve etkisi nedeniyle demiryolu ekip çizelgeleme problemi, personel çizelgeleme uygulamalarının da en kapsamlılarından biridir. Yakıt maliyetlerinden sonra, personel maliyetleri bir demiryolu şirketi için en büyük maliyet faktörlerinden birisidir. Personel maliyetleri demiryolu işletmesinin kontrol edebileceği bir gider olduğu için, tren seferlerine etkin personel ataması demiryolu işletmeciliği planlaması açısından çok önemlidir.

Bu çalışmanın kullanılan terimlerin açıklaması aşağıdaki gibidir.

Bir tren seferi; belirli bir şehirden başka bir şehre giden, kalkış ve varış zamanı ile seyir süresi belirli olan aralıksız bir tren seferini ifade eder.

Bir görev; personel için günlük iş değeridir.

Depo merkezi; Çizelgeleme yapılacak depo makinistlerinin ikamet ettiği şehirdir. Tren seferlerini gerçekleştirecek olan ekiplerin, göreve Eskişehir'den başlayıp yine aynı şehirde görevlerinin son bulması gerekmektedir.

Bir görev süresi; birbirinden kısa dinlenme süreleri ile ayrılan birden fazla tren seferinin toplam süresini ifade eder.

Görev süresine dahil olan iş alma ve iş bırakma süresi; sırasıyla, makinistin görev aldıktan sonra trenin hareket saatine kadar geçen süre ile trenin varış saatinde itibaren makinistin görevi bırakmasına kadar geçen süreleri ifade eder.

Tren kullanım süresi; lokomotif kullanılan toplam saatlik değeridir.

Toplam görev süresi; kısaca iş alma ile iş bırakma süresi arasında geçen zamanların toplamıdır.

Toplam Görev Süresi = Σ(Toplam Görev Süreleri + Toplam Kısa Dinlenme Süreleri +

İş Alma ve İş Bırakma Süreleri)
(Formül.1)

Bir eşleştirme; aralarında uzun (gece) dinlenme süreleri bulunan birden fazla görev süresi toplamı olarak tanımlanabilir. Her eşleştirme, personelin konumlandığı depo veya atölyede başlar ve biter. Ayrıca eşleştirmenin içerdiği, bir tren seferinin varış şehri, bir sonraki tren seferinin kalkış şehri ile uyuşmak zorundadır.

Kendi merkezinden uzakta geçen zaman (KMUGZ); bir eşleştirmedeki görev süreleri arasında bulunan gece dinlenmelerini içeren toplam zaman olarak tanımlanır.

KMUGZ = ΣToplam görev süreleri + ΣUzun dinlenme süreleri (Formül.2)

Yasal Zorunluluklar (Kısıtlar)

Bir demiryolu işletmesi, ekip çizelgelerini oluştururken resmi yordamlara ve personel yönetmeliklerine uymak zorundadır.

Çözümünü yapacağımız problem için;

Makinist personel bir görev süresi içerisinde harici merkezde istirahat süresi en fazla 720 dk. olarak

Bir görev süresi en fazla 15 saat 40dk. (940 dk.) olarak,

Bir görevde gerçekleşen toplam tren kullanım süresi ise en fazla 12 saat (720 dk.) olarak kısıtlandırılmıştır.

Maliyet Yapısı

Ekip eşleştirme modeli sadece ekibin kendi merkezinden uzakta olduğu zamanın uzunluğuyla ve personelin

yolcu olarak taşınmasıyla ilgili artan maliyetleri dikkate alır. Bu maliyetler, tren kullanım süresine ek maliyetlerdir. Kurallara uygun her eşleştirme için sabit olan yakıt masraflarının yanı sıra eşleştirmelerin ek maliyetlerinin temel sebepleri; görev süreleri içerisinde gerçekleşen kısa dinlenme süresinin sıklığı, uzun dinlenme süreleri ve personeli yolcu olarak taşıma maliyetleridir.

Eşleştirmenin maliyeti genellikle şu model kullanılarak hesaplanır:

*Eşleştirme Maliyeti = Enb{ Eşleştirme Görev Sayısı*EEGU,*

KMUGZ Faktör KMUGZ, Toplam Görev Maliyeti}*
(Formül.3)

EEGU (eşleştirme en düşük garanti ücret); görev süresinin uzunluğuna bakılmaksızın bir eşleştirmedeki her görev için personele ücret ödenmesinin garantilediği en az saat sayısı,

KMUGZ Faktör; kendi merkezinden uzakta geçen toplam zaman (KMUGZ) ile ilişkili bir katsayı,

Toplam Görev Maliyeti; eşleştirmedeki tüm görev sürelerinin maliyetleri toplamıdır.

Görev maliyeti eşleştirme maliyetinininkine benzer bir model ile hesaplanır.

*Görev Maliyeti = Enb{EGU, Toplam Görev Süresi Faktörü*Toplam Görev Süresi, Tren Kullanım Süresi}*
(Formül.4)

Burada;

EGU (en düşük garanti ücret); bir görevdeki personel için ücretin garanti edilmiş en az saat sayısını,

Toplam Görev Süresi Faktörü; tren görev süresiyle ilişkili bir katsayısı,

Tren Kullanım Zamanı; görev süresince gerçekleşen gerçek tren kullanım süresinin toplam saatlik değerini ifade eder.

Bu çalışmada günlük ekip eşleştirme problemi dikkate alındığı için ve günlük eşleştirmeler bir görev periyodundan oluştuğu için, eşleştirme maliyetleri, görev periyodu maliyetlerine eşit olacaktır. Dolayısıyla;

Toplam Görev Süresi = KMUGZ
(Formül.5)

olmaktadır. Parametrelerin aldığı değerler şöyledir:

Toplam Görev Süresi Faktörü = KMUGZ Faktör = 0,6

EGU = 4 saat =240 dk.

Eşleştirme Maliyeti = $Enb\{240, KMUGZ * 0.6, Tren Kullanım Süresi\}$ (Formül.6)

Eşleştirmenin maliyeti, eşleştirmede kendi merkezinden uzakta geçen toplam zamanın %60'ı kadardır. Eğer bir eşleştirmedeki toplam tren kullanım zamanı bu değerden büyükse, bu fazladan bir maliyet getireceğinden, eşleştirmenin maliyeti de bu değer kadar alınır. Bu değer ise her eşleştirme için belirlenen dört saatlik alt sınır değerinden az olmamalıdır. Bu nedenle eşleştirmenin maliyeti hesaplanırken bu üç değerden en büyük olanı alınmalıdır.

Matematiksel Modelleme

Ekip eşleştirme problemi genellikle iki aşamada çözülür: İlk aşamada tüm eşleştirmeler oluşturulur ve maliyetleri hesaplanır ve daha sonra bu eşleştirmelerin iyi bir altkümesi tüm tren seferlerini kapsayacak şekilde seçilir. Demiryolu ekip çizelgeleme problemi literatürde genellikle bir küme ayrıştırma ya da küme kapsama modeli olarak modellenmektedir.

Küme ayrıştırma modeli literatürde, araç rotalama, ekip çizelgeleme, devre ayrıştırma gibi birçok problemin çözümünde kullanılmaktadır.

Küme ayrıştırma ve küme kapsama modelinde olası tüm eşleştirmelerin oluşturulduğu ve maliyetlerinin hesaplandığını varsayılmaktadır. Pratikte, sayıları çok fazla olduğundan tüm eşleştirmeleri uygun olarak oluşturmak mümkün değildir. Genellikle eşleştirmelerin tam üretimi için bir sütun oluşturma algoritması uygulanır. Demiryolu ekip çizelgeleme probleminin küme kapsama ve küme ayrıştırma olarak modellenmesi aşağıda gösterilmiştir. Kullanılan simgeler şu şekildedir;

- i : Tren seferi ($i = 1,2,\dots,m$)
- j : Eşleştirme ($j = 1,2,\dots,n$)

$c(j)$: j eşleştirmesinin maliyeti

- n_t : t . iterasyondaki eşleştirme sayısı
- t : mevcut iterasyon

$x(j)$: j eşleştirmesinin en iyi çözümde yer alıp almayacağını gösteren 0-1

değişken

$a(i,j)$: i . tren seferinin j eşleştirmesi tarafından kapsanıp kapsanmadığını gösteren parametre

$$\sum_{j=1}^n a(i,j) * x(j) = 1 \quad \forall i = 1,\dots,m$$

$$x(j) \in \{0,1\} \quad \forall j = 1,\dots,nt$$

(Formül.7)

k.a.

$$EnkZ = \sum_{j=1}^n c(j) * x(j)$$

Küme ayrıştırma modeli:

$$\sum_{j=1}^n a(i,j) * x(j) \geq 1 \quad \forall i = 1,\dots,m$$

$$x(j) \in \{0,1\} \quad \forall j = 1,\dots,nt$$

(Formül.8)

k.a.

$$EnkZ = \sum_{j=1}^n c(j) * x(j)$$

Küme kapsama modeli:

Küme ayrıştırma modeli ile tüm tren seferleri tam olarak bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsanacak şekilde toplam eşleştirme maliyetini enküçüklemek amaçlanır. Diğer bir ifade ile bir tren seferi için birden fazla eşleşmeye izin verilmemektedir.

Küme kapsama modeli ise, tüm tren seferleri en az bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsanacak şekilde toplam eşleştirme maliyetini enküçüklemeyi amaçlamaktadır. Küme kapsama probleminde tren seferlerinin tam olarak bir eşleştirme tarafından kapsanması kısıtı küme ayrıştırmaya göre gevşetilmiştir. Sonuç yine tamsayı bir çözümdür. Sadece en iyi çözümde aynı tren seferi birden fazla eşleştirme tarafından kapsanabilmektedir. Bu da problemin çözümünü kolaylaştırmaktadır. Küme ayrıştırma ile modellendiğinde tüm eşleştirmelerin tam olarak bir eşleştirmede yer alacağı ve tüm eşleştirme kısıtlarını karşılayan uygun bir çözüm bulmak, özellikle büyük boyutlu problemlerde, oldukça zordur.

Sütun Türetme Algoritması

Sütun oluşturma yönteminin en etkin kullanılabildiği alanlardan biri demiryolu ekip çizelgeleme problemidir. Literatürde sütun oluşturma algoritmasını ekip eşleştirme probleminde uygulayan ilk çalışma Minoux, (1984) tarafından yapılmıştır.

Sütun oluşturma, bir problemin küçük, yönetilebilir bir parçasından başlar. Bu küçük parça çözülerek çözüm

analiz edilir ve problemin modele eklenecek bir sonraki parçası olarak bir ya da daha fazla değişken belirlenir. Daha sonra genişletilmiş model tekrar çözülür. Sütun oluşturma yoluyla çözümden, tatmin edici bir sonuç bulunana kadar bu süreç tekrarlanır.

Sütun oluşturma algoritması büyük boyutlu doğrusal programları çözmek için kullanılan etkili bir algoritmadır. Bazı doğrusal programlarda, değişkenlerin ya da başka deyişle simplex algoritmasındaki sütunların sayısı milyonları bulabilmektedir.

Sütun oluşturma algoritmaları, iki aşamadan oluşur:

- Ana problemin çözülmesi
- Alt problemin çözülmesi

Ana problem

Ana problemde amaç, toplam eşleştirme maliyet-

$$\sum_{j=1}^n a(i, j) * x(j) \geq 1 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (\text{Formül.9})$$

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, nt$$

$$k.a. \quad \text{EnkZ} = \sum_{j=1}^n c(j) * x(j) \quad (\text{Formül.10})$$

lerini enküçükmektir. Kısıt ise, her tren seferinin tam olarak bir eşleştirme tarafından kapsanmasını sağlamaktır.

Modelde kullanılan simgeler aşağıdaki gibidir:

$x(j)$: j eşleştirmesinin en iyi çözümde yer alıp almayacağını gösteren 0-1 değişken

$a(i, j)$: i tren seferinin j eşleştirmesi tarafından kapsanıp kapsanmadığını gösteren parametre

$c(j)$: j eşleştirmesinin maliyet değeri

m : Tren seferlerinin sayısı

n_t : t . iterasyondaki eşleştirme sayısı

t : Mevcut iterasyon

Alt problem

Ana problem küme kapsama modeli ile çözüldükten sonra, ana problemdeki her bir tren seferi için oluşturulan kısıtlara ilişkin ikil değerler alt probleme gönderilir. Alt problem serim modellerinden biriyle modellenir. En çok kullanılan alt problem tipi ise en kısa yol problemidir.

Çünkü alt problem, tren çizelgesindeki tren seferinin her birinin bir düğüm olarak yer aldığı, tren seferleri arasındaki tren kullanım süresi ve dinlenme sürelerinin oklarla gösterildiği, personelin ikâmet ettiği depoda başlayan ve burada sonlanan bir tren serimindeki en kısa yolları bulmaya ilgilendirilmiştir.

Alt problemin amacı, bu serimde yasalara uygun eşleştirme olma kısıtlarını sağlayan en düşük indirgenmiş maliyetli eşleştirmeyi bulmaktır. Alt problemde her bir eşleştirmeye karşılık gelen değişkenlere ilişkin indirgenmiş maliyetler, o eşleştirmenin maliyetinden kârını çıkartarak elde edilir. Ana problemde gelen ikil değerler kullanılarak eşleştirmelerin kârları hesaplanır. Eşleştirmelerin maliyetleri ise günlük ekip eşleştirmeleri göz önünde bulundurulacağı için;

$$M \geq \left(\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) + \sum_{i,j=1}^n r(i, j) * x(i, j) \right) * KMUGZ \quad (\text{Formül.11})$$

$$M \geq \sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) \quad (\text{Formül.12})$$

$$M \geq EEGU \quad (\text{Formül.13})$$

$$\sum_{i=1}^n x(i, j) = \sum_{i=1}^n x(j, i) \quad \forall j = 2, \dots, n-1 \quad (\text{Formül.14})$$

$$\sum_{i=1}^n x(1, j) = 1 \quad (\text{Formül.15})$$

$$\sum_{i=1}^n x(i, n) = 1 \quad (\text{Formül.16})$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) \leq \text{Toplam Tren Kullanım Süresi} \quad (\text{Formül.17})$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) + \sum_{i,j=1}^n r(i, j) * x(i, j) \leq KMUGZ \quad (\text{Formül.18})$$

k.a.

$$\text{Enk } z = M - \sum_{i,j=1}^n d(i, j) * x(i, j) \quad (\text{Formül.19})$$

$f(i, j)$: i ve j şehirleri arasındaki tren kullanım periyodu

$r(i, j)$: i ve j seferleri arasındaki mola periyodu

$d(i, j)$: Ana problemde alt probleme gönderilen seferlerle ilişkin ikil değerler

$x(i, j)$: i ve j değişkenin modelde yer almadığını gösteren 0,1 tam sayı değişken

M : Her bir eşleştirmeye ait Eşleştirme Maliyeti

n : Eşleştirme sayısı

Ekip Atama Problemi

Yöneylem Araştırması'nda en çok tanınan problemlerden

biri "Atama" (Assignment) problemidir. Atama probleminde yapılması gereken (m) adet görev vardır. Bu görevleri yapmaları için de (m) ayrı kişi bulunmaktadır. Herhangi bir (i) kişinin (j) görevine verilmesi durumunda (c_{ij}) maliyeti oluşmaktadır. Her göreve mutlaka bir kişinin verilmesi ve bir kişinin sadece tek bir göreve atanması koşuluyla en küçük toplam maliyetle bir görevlendirme planı yapılması amaçlanmaktadır. (Öner ve Ülengin, 2003).

Bu çalışmada ekip eşleştirme probleminin sonuçlarını kullanarak makinist atama problemi için sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Rassal atama programında tren öncelikleri ve personel maliyetleri dikkate alınmış olup işletme için öncelikli olan trenlere daha yüksek puanlı atamalar yapılmıştır. Atama problemi için program, DELPHI programlama dili kullanılarak yazılmıştır.

Sütun Türetme Algoritmasının Uygulaması

Bu çalışma kapsamında, Aşağıda yer alan örnek tren çizelgesi için günlük ekip eşleştirme problemi sütun oluşturma algoritması kullanılarak çözülmüştür. Çalışmada 62 tren seferi seçilmiştir ve sadece Ankara, İstanbul ve Kütahya'ya yapılan yolcu treni seferleri dikkate alınmıştır. Burada bir temel oluşturması açısından günlük ekip eşleştirme probleminin çözülmesi amaçlanmıştır.

Planlanan tren seferlerini de içine alan yeni veriler ise Tablo-1'de gösterilmiştir. Merkez konumundaki şehir Eskişehir olduğu için, eşleştirmeler oluşturulurken kalkış ve varış şehrinin, Eskişehir olması gerekmektedir.

Tablo-1 Planlanan tren çizelgesi

Sıra No	Hareket Dakikası	Varış Dakikası	Kalkış İst.	Varış İst.
1	10	217	Eskişehir	Ankara
2	410	607	Ankara	Eskişehir
3	250	466	Eskişehir	Ankara
4	800	1005	Ankara	Eskişehir
5	500	703	Eskişehir	Ankara
6	900	1079	Ankara	Eskişehir
7	800	1008	Eskişehir	Ankara
8	1200	1407	Ankara	Eskişehir
9	650	863	Eskişehir	Ankara
10	1150	1388	Ankara	Eskişehir
11	100	309	Eskişehir	Ankara
12	350	539	Ankara	Eskişehir
13	200	399	Eskişehir	Ankara
14	500	681	Ankara	Eskişehir
15	700	883	Eskişehir	Ankara
16	1000	1220	Ankara	Eskişehir
17	900	1100	Eskişehir	Ankara
18	1238	1438	Ankara	Eskişehir
19	115	313	Eskişehir	Ankara
20	460	667	Ankara	Eskişehir
21	300	505	Eskişehir	Ankara
22	600	803	Ankara	Eskişehir
23	825	1027	Eskişehir	Ankara
24	1100	1308	Ankara	Eskişehir
25	20	353	Eskişehir	İstanbul
26	450	748	İstanbul	Eskişehir
27	150	448	Eskişehir	İstanbul
28	900	1195	İstanbul	Eskişehir
29	300	570	Eskişehir	İstanbul
30	800	1060	İstanbul	Eskişehir

31	500	730	Eskişehir	İstanbul
32	1000	1329	İstanbul	Eskişehir
33	650	959	Eskişehir	İstanbul
34	1115	1430	İstanbul	Eskişehir
35	800	1035	Eskişehir	İstanbul
36	1204	1440	İstanbul	Eskişehir
37	550	860	Eskişehir	İstanbul
38	80	317	Eskişehir	İstanbul
39	400	727	İstanbul	Eskişehir
40	220	534	Eskişehir	İstanbul
41	580	806	İstanbul	Eskişehir
42	400	634	Eskişehir	İstanbul
43	780	1006	İstanbul	Eskişehir
44	650	975	Eskişehir	İstanbul
45	1075	1303	İstanbul	Eskişehir
46	850	1112	Eskişehir	İstanbul
47	1180	1414	İstanbul	Eskişehir
48	1000	1300	İstanbul	Eskişehir
49	150	448	Eskişehir	İstanbul
50	520	815	İstanbul	Eskişehir
51	300	530	Eskişehir	İstanbul
52	630	890	İstanbul	Eskişehir
53	550	820	Eskişehir	İstanbul
54	1025	1323	İstanbul	Eskişehir
55	420	495	Eskişehir	Kütahya
56	550	625	Kütahya	Eskişehir
57	700	775	Eskişehir	Kütahya
58	850	925	Kütahya	Eskişehir
59	1000	1075	Eskişehir	Kütahya
60	1150	1225	Kütahya	Eskişehir
61	1250	1325	Eskişehir	Kütahya
62	1365	1440	Kütahya	Eskişehir

Problemın çözümünde kullanılan sütun oluşturma yönteminin, ana problem ve alt probleminin matematiksel modelleri aşağıda gösterilmiştir. Başlangıç eşleştirmeleri, ana problem ve alt problem, GAMS eniyileme programı kullanılarak kodlanmış ve iteratif olarak çözülmüştür.

Ana problem

$$\sum_{j=1}^{62} a(i, j) * x(j) \geq 1 \quad \forall i = 1, \dots, 62$$

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, 62$$

k.a.

$$EnkZ = \sum_{j=1}^{62} c(j) * x(j)$$

$$\sum_{j=1}^n f(i, j) * x(i, j) + \sum_{j=1}^n r(i, j) * x(i, j) * 0,6$$

$$M \geq \sum_{j=1}^n f(i, j) * x(i, j)$$

$$M \geq 240$$

$$\sum_{i=1}^n x(i, j) = \sum_{i=1}^n x(i, i) \quad \forall j = 1 \dots 62$$

$$\sum_{i=1}^n x(1, j) = 1$$

$$\sum_{i=1}^n x(i, n) = 1$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) \leq 720$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) + \sum_{i,j=1}^n r(i, j) * x(i, j) \leq 940 \quad (\text{Formül.28})$$

k.a.

$$EnkZ = M - \sum_{i,j=1}^n d(i, j) * x(i, j) \quad (\text{Formül.29})$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) + \sum_{i,j=1}^n r(i, j) * x(i, j) * 0,6 \quad (\text{Formül.21})$$

$$M \geq \sum_{j=1}^n f(i, j) * x(i, j) \quad (\text{Formül.22})$$

$$M \geq 240 \quad (\text{Formül.23})$$

$$\sum_{i=1}^n x(i, j) = \sum_{i=1}^n x(i, i) \quad \forall j = 1 \dots 62 \quad (\text{Formül.24})$$

$$\sum_{i=1}^n x(1, j) = 1 \quad (\text{Formül.25})$$

$$\sum_{i=1}^n x(i, n) = 1 \quad (\text{Formül.26})$$

$$\sum_{i,j=1}^n f(i, j) * x(i, j) \leq 720 \quad (\text{Formül.27})$$

Alt problem

$f(i)$: i seferi periyodu

n_t : t . iterasyondaki eşleştirme sayısı

$r(i, j)$: i ve j seferleri arasındaki mola periyodu

$d(i)$: Ana problemden alt probleme gönderilen tren seferlerine ilişkin ikil değerler

$x(i, j)$: i ve j düğümleri arasında bir bağlantı mümkünse 1 değilse 0 değerini alan karar değişkeni

M : Her bir eşleştirmeye ait $Enb \{240, KMUGZ * 0,6$,

Toplam Tren Kullanım Süresi} modeline göre hesaplanan maliyet değeri

Problem, GAMS 21.5 eniyileme programının CPLEX karma tamsayılı doğrusal program çözücü yazılımı kullanılarak çözülmüştür.

Sütun oluşturma algoritmasının GAMS modeli ile çözümlerini sonucunda elde edilen en iyi maliyet değeri 14072'dir. Çözüm kümesi ise 27 değişkenden oluşmaktadır. En iyi ekip eşleştirmeleri Tablo-2'de gösterilmiştir.

Tablo-2. En iyi ekip eşleştirmeleri

Değişken	Eşleştirme				Maliyet
X3	10	17			438
X4	3	14			397
X8	2	11	57	58	556
X17	18	23			402
X20	1	20	57	58	564
X21	12	19			387
X23	7	8			415
X24	35	45			463
X31	4	21			423
X32	5	6			382
X33	30	31	61	62	640
X34	13	22			402
X36	32	42			563
X37	34	37			625
X40	48	53			570
X41	36	46			498
X43	15	24	55	56	541
X44	43	49			524
X46	33	54			607
X47	25	39			660
X49	28	29			565
X50	41	51	59	60	606
X51	27	50			593
X52	40	52			574
X55	9	16	55	56	583
X60	26	38			535
X64	44	47			559

Tablo-3'te en iyi ekip çizelgesi görülmektedir. Çizelgede ekiplerin hangi trenleri yapacağı bilgisi ve trenlerin kalkış, varış saatleri verilmiştir.

Tablo-3. En iyi ekip çizelgesi

Ekip No	Sıra No	Hareket Saati	Variş Saati	Kalkış Şehri	Variş Şehri
Ekip 1	17	900	1100	Eskişehir	Ankara
	10	1150	1388	Ankara	Eskişehir
Ekip2	3	250	466	Eskişehir	Ankara
	14	500	681	Ankara	Eskişehir
Ekip 3	11	100	309	Eskişehir	Ankara
	2	410	607	Ankara	Eskişehir
	57	700	775	Eskişehir	Kütahya
	58	850	925	Kütahya	Eskişehir
Ekip 4	23	825	1027	Eskişehir	Ankara
	18	1238	1438	Ankara	Eskişehir
Ekip 5	1	10	217	Eskişehir	Ankara
	20	460	667	Ankara	Eskişehir
Ekip 6	19	115	313	Eskişehir	Ankara
	12	350	539	Ankara	Eskişehir
Ekip 7	7	800	1008	Eskişehir	Ankara
	8	1200	1407	Ankara	Eskişehir
Ekip 8	35	800	1035	Eskişehir	İstanbul
	45	1075	1303	İstanbul	Eskişehir
Ekip 9	21	300	505	Eskişehir	Ankara
	4	800	1005	Ankara	Eskişehir
Ekip 10	5	500	703	Eskişehir	Ankara
	6	900	1079	Ankara	Eskişehir
Ekip 11	31	500	730	Eskişehir	İstanbul
	30	800	1060	İstanbul	Eskişehir
	61	1250	1325	Eskişehir	Kütahya
	62	1365	1440	Kütahya	Eskişehir
Ekip 12	13	200	399	Eskişehir	Ankara
	22	600	803	Ankara	Eskişehir
Ekip 13	42	400	634	Eskişehir	İstanbul
	32	1000	1329	İstanbul	Eskişehir
Ekip 14	37	550	860	Eskişehir	İstanbul
	34	1115	1430	İstanbul	Eskişehir
Ekip 15	53	550	820	Eskişehir	İstanbul
	48	1000	1300	İstanbul	Eskişehir
Ekip 16	46	850	1112	Eskişehir	İstanbul
	36	1204	1440	İstanbul	Eskişehir
Ekip 17	15	700	883	Eskişehir	Ankara
	24	1100	1308	Ankara	Eskişehir
	55	420	495	Eskişehir	Kütahya
	56	550	625	Kütahya	Eskişehir
Ekip 18	49	150	448	Eskişehir	İstanbul
	43	780	1006	İstanbul	Eskişehir
Ekip 19	33	650	959	Eskişehir	İstanbul
	54	1025	1323	İstanbul	Eskişehir
Ekip 20	25	20	353	Eskişehir	İstanbul
	39	400	727	İstanbul	Eskişehir
Ekip 21	29	300	570	Eskişehir	İstanbul
	28	900	1195	İstanbul	Eskişehir
Ekip 22	51	300	530	Eskişehir	İstanbul
	41	580	806	İstanbul	Eskişehir
	59	1000	1075	Eskişehir	Kütahya
	60	1150	1225	Kütahya	Eskişehir
Ekip 23	27	150	448	Eskişehir	İstanbul
	50	520	815	İstanbul	Eskişehir
Ekip 24	40	220	534	Eskişehir	İstanbul
	52	630	890	İstanbul	Eskişehir
Ekip 25	9	650	863	Eskişehir	Ankara
	16	1000	1220	Ankara	Eskişehir
Ekip 26	38	80	317	Eskişehir	İstanbul
	26	450	748	İstanbul	Eskişehir
Ekip 27	44	650	975	Eskişehir	İstanbul
	47	1180	1414	İstanbul	Eskişehir

Rassal Atama Algoritmasının Uygulaması

Ekip eşleştirme probleminin çözümünde, Merkezi Eskişehir olan bir işyeri için bir günlük yolcu tren seferlerini gerçekleştirebilmek için 27 ekibe ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Her ekip iki adet personelden oluşmaktadır. DELPHI programlama dili ile geliştirdiğim Rassal personel atama programının ara yüzü Şekil-1’de gösterilmiştir.

Şekil-1. Personel atama programı ara yüzü

Rassal atama probleminin çözümü için temel olarak personelin dört farklı özelliğine göre hesaplama yapılmıştır. Bu özellikler; eğitim durumu, yaş, hizmet süresi ve idari ceza alıp almaması durumudur. Eğitim durumu için personel eğer üniversite mezunu ise 4 puan, lise mezunu ise 1 puan (lise eğitiminden daha düşük tahsilli kişilerin

makiniist olmasına izin verilmiyor) verilmektedir. Personel eğer 45 yaşından küçük veya eşit ise 4 puan büyük ise 1 puan verilmektedir. Hizmet süresi 6 yıldan küçük ise 1 puan, 6 yıldan büyük 18 yıldan küçük ise 7 puan, 18 yıl ve üzeri ise 4 puan verilmiştir. Son olarak personelin aldığı disiplin cezalarının derecesine göre -1 puan veya -2 puan kesilmektedir. Çalışmada yolcu trenleri de üç sınıfa ayrılmıştır. Bunlar; süper ekspresler, mavi trenler ve ekspres trenlerdir. Bu trenler için de farklı puanlar belirlenmiştir. Çalışma için rastgele 193 makinistten oluşan bir veritabanı oluşturulmuştur.

Puan hesaplama işleminde makinist listesinden bir personel rassal olarak seçilir, seçilen personelin belirlenen dört kritere göre puanı hesaplanır daha sonra kişinin hesaplanan puanı atama yapılacak tren puanı ile çarpılır son olarak kişi geçici olarak makinist listesinden silinir, program yine rassal olarak listeden başka bir personel seçer. Kriterler uygunsa geri kalan atamaların puan hesaplamaları da yapılır. Tüm ekiplere personel ataması yapıldıktan sonra bu atamaların toplam puanı hesaplanır ve ikinci iterasyona geçilir. İkinci iterasyonda da toplam puan hesaplandıktan sonra, iterasyonun toplam puanı bir önceki iterasyondaki puandan daha büyük ise bu puan iyileşme olarak kabul edilir ve bir önceki değer silinerek yüksek puana sahip olan atamalar saklanır. Tüm iterasyonlar için puanlar hesaplandıktan sonra sadece toplam puanı yükselten atama sonuçları CSV uzantılı bir dosya olarak kaydedilir.

Sütun oluşturma algoritması ile çözülmüş olan Eskişehir’de yer alan bir işyeri için bir günlük çizelgeleme probleminin sonucu olan 27 ekip ihtiyacı için rassal atama ile 100.000 iterasyon yapılarak personel atamaları gerçekleştirilmiştir. Personel atamalarını gösteren Tablo-4’de gösterilmiştir.

Tablo-4. Ekiplere atanan personel listesi

Ekip No	Atanan Personeller		Hareket Saati	Variş Saati	Kalkış Şehri	Variş Şehri
Ekip 1	Y170	M57	900	1100	Eskişehir	Ankara
			1150	1388	Ankara	Eskişehir
Ekip2	Y191	M81	250	466	Eskişehir	Ankara
			500	681	Ankara	Eskişehir
Ekip 3	Y179	M88	100	309	Eskişehir	Ankara
			410	607	Ankara	Eskişehir
Ekip 4	Y166	M135	700	775	Eskişehir	Kütahya
			850	925	Kütahya	Eskişehir
Ekip 5	M131	M28	825	1027	Eskişehir	Ankara
			1238	1438	Ankara	Eskişehir
			10	217	Eskişehir	Ankara
			460	667	Ankara	Eskişehir

Ekip 6	M87	M110	115	313	Eskişehir	Ankara
			350	539	Ankara	Eskişehir
Ekip 7	M5	M128	800	1008	Eskişehir	Ankara
			1200	1407	Ankara	Eskişehir
Ekip 8	Y149	M80	800	1035	Eskişehir	İstanbul
			1075	1303	İstanbul	Eskişehir
Ekip 9	M55	M68	300	505	Eskişehir	Ankara
			800	1005	Ankara	Eskişehir
Ekip 10	Y6	M112	500	703	Eskişehir	Ankara
			900	1079	Ankara	Eskişehir
			500	730	Eskişehir	İstanbul
Ekip 11	M31	M108	800	1060	İstanbul	Eskişehir
			1250	1325	Eskişehir	Kütahya
			1365	1440	Kütahya	Eskişehir
Ekip 12	M17	M7	200	399	Eskişehir	Ankara
			600	803	Ankara	Eskişehir
Ekip 13	M115	M139	400	634	Eskişehir	İstanbul
			1000	1329	İstanbul	Eskişehir
Ekip 14	M124	M132	550	860	Eskişehir	İstanbul
			1115	1430	İstanbul	Eskişehir
Ekip 15	M22	M89	550	820	Eskişehir	İstanbul
			1000	1300	İstanbul	Eskişehir
Ekip 16	M126	M4	850	1112	Eskişehir	İstanbul
			1204	1440	İstanbul	Eskişehir
			700	883	Eskişehir	Ankara
Ekip 17	M102	M25	1100	1308	Ankara	Eskişehir
			420	495	Eskişehir	Kütahya
			550	625	Kütahya	Eskişehir
Ekip 18	Y184	M125	150	448	Eskişehir	İstanbul
			780	1006	İstanbul	Eskişehir
Ekip 19	M100	M133	650	959	Eskişehir	İstanbul
			1025	1323	İstanbul	Eskişehir
Ekip 20	M27	Y8	20	353	Eskişehir	İstanbul
			400	727	İstanbul	Eskişehir
Ekip 21	Y181	M19	300	570	Eskişehir	İstanbul
			900	1195	İstanbul	Eskişehir
			300	530	Eskişehir	İstanbul
Ekip 22	Y10	M97	580	806	İstanbul	Eskişehir
			1000	1075	Eskişehir	Kütahya
			1150	1225	Kütahya	Eskişehir
Ekip 23	M136	M1	150	448	Eskişehir	İstanbul
			520	815	İstanbul	Eskişehir
Ekip 24	M96	M75	220	534	Eskişehir	İstanbul
			630	890	İstanbul	Eskişehir
Ekip 25	M117	Y151	650	863	Eskişehir	Ankara
			1000	1220	Ankara	Eskişehir
Ekip 26	M44	Y118	80	317	Eskişehir	İstanbul
			450	748	İstanbul	Eskişehir
Ekip 27	M127	M33	650	975	Eskişehir	İstanbul
			1180	1414	İstanbul	Eskişehir

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, günlük demiryolu ekip çizelgeleme problemi ve ekip atama problemi çözülmüştür. Eskişehir merkezli bir işletme için tren çizelgesinde yer alan 62 adet tren seferi için ekip çizelgeleme problemi çözülmüştür. Sütun oluşturma algoritmasında, ana problem bir küme kapsama problemi, alt problem ise bir en kısa yol problemi olarak modellenmiştir. Bu çalışmada günlük eşleştirme problemine uygun bir çözüm elde edilmiştir, bu veriler ışığında haftalık istisnalar ve diğer tren seferleri de modele eklenerek, ileri tarihli versiyonlar elde edilebilir.

Mevcut durumda ekip çizelgeleri elle hazırlanmaktadır. Bu nedenle bu konuda görevli personelin oluşturduğu ekip çizelgeleri sezgisel olup, en iyilikten uzaktır. Çalışmada kullanılan sütun oluşturma algoritmasıyla ekip çizelgeleri, GAMS programı aracılığıyla 18 dakikalık sürede oluşturulmuştur.

Ekip eşleştirme problemi için, en iyi ekip eşleştirmeleri oluşturulmuş ve etkin bir ekip çizelgesi elde edilmiştir. Günlük çizelgelemedeki tren seferlerini gerçekleştirebilmek için toplam 27 adet ekibe ihtiyaç olduğu belirlenmiştir.

Ekip atama problemi için rassal bir sezgisel kullanılmıştır bunun gerekçesi, bu sezgiselin kısa sürede en iyiye yakın çözümler üretebilmesidir. Geliştirilen program iterasyon adedi 100.000 olacak şekilde çalıştırıldı. Program 78.162'ci iterasyonda 72.500 toplam atama puanına ulaşmıştır. Toplam atama puanı 100.000 iterasyon boyunca 15 defa iyileştirilmiştir. Bu da zaten sezgisel algoritmaların avantajı olarak literatürlerde anlatılmaktadır. Oluşturulmuş olan sezgisel algoritmanın literatürle örtüşüyor olması yapılan çalışmanın güvenilirliğini arttırmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında demiryolu planlama sürecinin son iki aşaması olan ekip çizelgeleme ve ekip atama problemleri ele alınmış olup her iki problemin çözümünde farklı yöntemler kullanılmıştır. Mevcut durumda elle çözülmeye çalışılan problemler için başarılı sonuçlar üreten matematiksel ve sezgisel algoritmalar önerilmiştir.

KAYNAKLAR

Abbinck, E., Fischetti, M., Kroon, L., Timmer, G., Vromans, M., "Reinventing crew scheduling at Netherlands Railways" Erasmus Research Institute of Management 35, 393-401 (2005).

Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Sier, D., "Staff Scheduling and Rostering: A Review of Applications, Methods and Models", European Journal of Operational Research, 153: 3-27 (2004).

Huisman, D., Kroon, L.G., Lentink, R.M., Vromans, M.J.C.M., "Operations research in passenger railway transportation" Statistica Neerlandica, 59: 467-497 (2005b).

Huisman, D., and Wagelmans, A., "A Solution Approach for Dynamic Vehicle and Crew Scheduling", European Journal of Operational Research, 172: 453-471 (2006)

Huisman, D., "A column generation approach for the rail crew re-scheduling problem", European Journal of Operational Research, 180:163-173 (2007).

Kohl, N., Karisch S.E., "Airline Crew Rostering: Problem Types, Modeling, and Optimization", Annals of Operations Research, 127: 223-257 (2004).

Lavoie, S., Minoux, M., Odier, E., "A New Approach For Crew Pairing Problems By Column Generation with An Application to Air Transportation", European Journal of Operations Research, 35(1): 45-58 (1988).

Moudani, El. W., Cosenza, C.A.N, Mora-Camino, F., "An intelligent approach for solving the airline crew rostering problem", Computer Systems and Applications, ACS/IEEE International Conference, 73-79 (2001).

Öner, A., Ülengin, F., "Atama problemi için yeni bir çözüm yaklaşımı", İTÜ dergisi, 2(1):73-79(2003).



Yüksel ÜSTÜNDAĞ

17 yıllık demiryolculuk yaşamı boyunca TCDD bünyesinde Cer Dairesinin farklı birimlerinde ve Bilgi İşlem Dairelerine bağlı birimlerde görev yapmıştır. 2008 yılından beri TCDD Kurumsal Kaynak Yönetimi Projesinde İnsan Kaynakları Yönetim Sistemi (İKYS - SAP HR) modülünde görev yapmaktadır. Endüstri Mühendisliğinde lisans ve yüksek lisansa sahiptir.