



## Ankara – İstanbul YHT Hattındaki Tren Atama Problemi İçin Matematiksel Model Yaklaşımları

Enver Kerem KAYA<sup>id</sup>, Melike SÖNMEZ<sup>id</sup>, Emine AKYOL ÖZER<sup>\*id</sup>

*Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye*

\*emineakyol@eskisehir.edu.tr

*(Alınış/Received: 24.11.2023, Kabul/Accepted: 29.02.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)*

**Öz:** Demiryolu sektöründe görev yapan planlamacılar, güzergahlar arasında yapılacak seferleri en verimli ve etkili şekilde yönetmek zorundadır. Bu çalışmada, demiryolu şirketlerinin operasyonel süreçlerini optimize etmelerine yardımcı olacak iki 0-1 tamsayı matematiksel programlama modeli önerilmiştir. İlk modelin amacı, iki hat arasında yapılacak seferlere, farklı enerji tüketimine sahip trenler arasından toplam enerji tüketimini en küçükleyecek şekilde tren atamasını sağlamaktır. İkinci model ise, bu hattaki seferleri minimum sayıda trenle gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen modeller, GAMS yazılımında kodlanmış ve Cplex çözücüsü kullanılmıştır. Ankara-İstanbul arasındaki yüksek hızlı tren seferleri ile ilgili veriler kullanılarak, önerilen çözüm yaklaşımlarının performansı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karar vericilerin tercihlerine göre analiz edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tren atama, Tren Çizelgeleme, Raylı sistemler, Matematiksel modelleme, Enerji-etkin çizelgeleme

### Mathematical Model Approaches For Train Assignment Problem on Ankara – Istanbul High-Speed Train Line

**Abstract:** In the railway sector, planners responsible for operations must efficiently and effectively manage train services between routes. Addressing this problem, this study proposes two binary mathematical programming models to assist railway companies in optimizing their operational processes. The objective of the first model is to allocate trains between two lines in a way that minimizes the total energy consumption among trains with different energy profiles. The second model aims to execute services on the route with the minimum number of trains. The proposed models were coded in the GAMS software and solved using the Cplex solver. To test the performance of the suggested solution approaches, it was conducted using high-speed train services data between Ankara and Istanbul. The obtained results were analyzed based on decision-makers' preferences.

**Keywords:** Train assignment, Train Scheduling, Railroad systems, Mathematical modelling, Energy-efficient scheduling

## 1. Giriş

Sürdürülebilir bir gelecek, mevcut varlıkların en verimli şekilde kullanılması ve olabilecek en iyi şekilde korunmasıyla doğru orantılıdır. Bu bağlamda, ulaşım türleri incelendiğinde havayolu, karayolu ve demiryolu arasında gerek yakıt kullanımı gerek ise  $CO_2$  emisyonu bakımından en çevreci ulaşım türü demiryolu ulaşımıdır. Özellikle son yıllarda, ülkemizde demiryolu ulaşımı ile taşınan yolcu sayısı, yüksek hızlı trenlerin (YHT) kullanımı ile oldukça artmıştır. Bu sebeple, daha çevreci olan bu ulaşım türünde bile enerji-etkin yaklaşımların uygulanması sürdürülebilir kalkınma bakımından oldukça önemlidir.

Literatürde, demiryolu çizelgeleme konusunda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Boroun vd. [1] tren sefer çizelgesinin oluşturulması için bir matematiksel model ve bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Yang vd. [2] ise farklı zaman dilimlerindeki yolcu talebini dikkate alan demiryolu

Atıf için/Cite as: E.K. Kaya, M. Sönmez, E. Akyol Özer, “Ankara – İstanbul YHT hattındaki tren atama problemi için matematiksel model yaklaşımları,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 1-10, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1395761

hattının verimliliğini arttırmayı amaçlayan bir tren sefer çizelgesi oluşturma problemine odaklanmıştır. Problemin çözümü için Lagrange gevşetmesine dayalı iki adımdan oluşan bir model önerilmiş ve bu model, Beijing Yizhuang hattındaki veriler kullanılarak test edilmiştir. Xu vd. [3] çalışmalarında, tek hatlı bir demiryolundaki çizelgeleme problemini ele almış, problemin çözümü için benzetim tabanlı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Huang vd. [4] ise, metro hatlarındaki tren arızalarından kaynaklanan gecikmeler için, yolcu memnuniyetini arttırmayı amaçlayan bir yeniden çizelgeleme modeli önermişlerdir. Gültekin ve Eren [5] tren hattındaki gecikmeleri azaltmak için 0-1 tam sayılı programlama modeli ve benzetim olmak üzere iki çözüm yöntemi önermişlerdir. 16 istasyonlu 6 trenin çalıştığı Yeniçubuk-Çetinkaya demiryolu hattında örnek bir uygulama yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut durumla karşılaştırılmış, önerilen modelle gecikmelerde %81,59 oranında iyileşme sağlandığı vurgulanmıştır. Ayrıca, tek hatlı yolların çift hatta dönüştürülmesi durumunun gecikmelere olan etkisi önerilen bir benzetim modeli ile analiz edilmiştir. Yalçınkaya [6] ise çalışmasında, demiryolunun kapasitesi ve diğer işletme kısıtlarını dikkate alan tren tarifesi oluşturma problemi için bir benzetim modeli önermiştir. Amaç, demiryolu koridorundaki tüm istasyonlar için trenlerin istasyona geliş ve kalkış sürelerini hesaplayan olurlu bir tarife oluşturmak ve bu tarifeye bağlı ortalama tren seyahat süresini elde etmektir. Geliştirilen benzetim modelinin yapısı rastgele olayları içerdiğinden, yeniden çizelgeleme/sevk etme problemleri için de kullanılabilen öngörülüdür. Li vd. [7] çalışmasında tren rotalama ve tren çizelgeleme problemini birlikte ele almışlardır. Problemin çözümü için 0-1 karma tamsayı ve doğrusal olmayan bir model önermişlerdir. Ayrıca, gecikme bilgilerini kullanarak elde edilen rotaları iyileştirmek için bir algoritma ve bu çözümleri optimize etmek için bir tabu arama prosedürü geliştirmişlerdir. Benzetim modeli ile elde edilen sonuçlara göre, bu yöntemin optimal çözüme oldukça yaklaştığı ifade edilmiştir.

Literatürde son yıllardaki tren çizelgeleme problemini ele alan çalışmalarda, minimum enerji tüketimi öne çıkan amaçlardan biri olarak göze çarpmaktadır [8-11]. Mo vd. [12], metro sistemlerinde toplam enerji tüketimini azaltmak için optimal tren çizelgesi ve tren dizisi dolaşım planını eş zamanlı olarak oluşturan entegre bir model önermiştir. Tren dönüş ve dolaşım kısıtlamalarını, dinamik yolcu taleplerini ele alan doğrusal programlama modeli Pekin-Yizhuang Metro Hattı üzerinde test edilmiştir. Jin vd. [13] ise, metro sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak için bir tren çizelgeleme modeli oluşturmayı hedeflemiştir. Model, tren işletmelerini koordine etmek için regeneratif fren enerjisinin kullanımını artırmayı ve alt istasyon tepe gücünü azaltmayı amaçlamaktadır. Guangzhou Metro Hatları üzerinde yapılan çalışmalar, regeneratif fren enerjisi kullanımının %23 artabileceğini, alt istasyon enerji tüketiminin %14 azalabileceğini ve alt istasyon tepe gücü süresinin %66 azalabileceğini göstermiştir. Hasanzadeh vd. [14] çalışmalarında, elektrikli demiryolu sistemlerinde optimum enerji tüketimi için etkin bir tren çizelgesi oluşturmayı hedeflemiştir. Çözüm yöntemi olarak parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasından yararlanmışlardır. Önerilen algoritma, hat eğimi, hız sınırları, tren varış süreleri, motordan frenleme geçiş gibi pek çok faktörü dikkate almıştır. Önerilen algoritmanın performansı, Tahran Kenti ve Banliyö Demiryolu İşletme Şirketi'nin 2. Hattı'na uygulanarak ortaya koyulmuştur. Zhang vd. [15] ise, kentsel raylı transit trenler için tren gecikmelerini dikkate alan enerji verimli bir zaman çizelgesi geliştirmeyi hedeflemiştir. Problemin çözümü için iki aşamalı bir algoritma önerilmiştir. İlk aşamada, geliştirilmiş bir diferansiyel evrim algoritması kullanılarak trenin enerji tasarruflu işletim stratejisi optimize edilmiş ve hattın her bölümünde trenin optimal çalışma süresi-enerji tüketimi çözüm kümesi elde edilmiştir. İkinci aşamada ise, gecikmiş trenin zaman çizelgesi hızlı bir iteratif algoritma ile tekrar planlanmıştır. Corlu vd. [16] ve Fernández vd. [17] gibi derleme çalışmalar da literatürdeki çalışmalar değerlendirilmiş ve potansiyel çalışma alanları için öneriler sunulmuştur.

Erişilebilen literatürde, demiryolu çizelgeleme problemlerinde enerji odaklı amaçların günden güne öneminin artması göze çarpmaktadır. Bu bakış açısıyla, bu çalışmada benzer şekilde İstanbul-Ankara hattında yapılan seferlere, mevcut tren tipi/sayısı ve operasyonel kısıtları göz önünde bulundurularak toplam enerji tüketimini enküçüleyecek tren ataması problemi ele

alınmıştır. Problemin çözümü için 0-1 tamsayılı bir matematiksel model (M1) geliştirilmiştir. Ayrıca, M1 modelinin kısıtları kullanılarak, iki hat arasında yapılan seferler için gereken minimum tren sayısını belirlemek amacıyla ikinci bir matematiksel model (M2) sunulmuştur. M1 modeli tren atama problemini taktiksel planlama seviyesinde, M2 modeli ise stratejik planlama seviyesinde dikkate almıştır. Bu çalışmanın, erişilebilen literatürden farkı tren atama problemini farklı karar verme seviyelerinde ele almış olmasıdır. Ayrıca erişilebilen çalışmalarda, genellikle tren seferi oluşturma problemine odaklanmış olup, seferlere atanan tren sayıları üzerinde durulmamıştır.

Problem tanımı ve bu modellerin detayları ikinci bölümde verilmiştir. Üçüncü bölümde, Ankara-İstanbul hattındaki seferler kullanılarak matematiksel modellerle elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Dördüncü bölümde ise, çalışmanın özeti ve gelecekteki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

## 2. Problem Tanımı ve Matematiksel Modeller

Ankara ve İstanbul (Pendik) YHT istasyonu arasında hafta içindeki herhangi bir günde Ankara-İstanbul 9, İstanbul-Ankara 9 sefer olmak üzere toplam 18 sefer yapılmaktadır. Tablo 1’ de bu seferlerin zaman çizelgesi verilmiştir. Her iki istasyon için de günün ilk seferlerinde ve son 2 seferlerinde yolcu talebi oldukça yüksektir.

**Tablo 1.** Ankara-İstanbul hattında gerçekleşen seferler

Ankara – İstanbul			İstanbul-Ankara		
Sefer no	Kalkış zamanı	Varış zamanı	Sefer no	Kalkış zamanı	Varış zamanı
1	06:00	09:49	10	06:37	10:30
2	07:15	11:19	11	07:57	12:04
3	09:20	13:20	12	10:21	14:29
4	10:45	14:51	13	12:03	16:01
5	11:25	15:26	14	13:59	18:09
6	13:00	16:53	15	15:53	19:52
7	15:35	19:35	16	17:28	21:34
8	17:45	21:47	17	17:50	22:01
9	19:15	23:11	18	19:53	23:53

Halihazırda, YHT hizmetlerinde faaliyet gösteren HT65000 ve HT80000 olmak üzere toplam iki tip yüksek hızlı tren seti mevcuttur. HT65000, İspanya menşeli CAF şirketinden tarafından üretilmektedir. Tren setleri toplamda 6 vagon içermektedir ve 419 yolcu kapasitesine sahiptir. HT80000 tren seti Siemens Velaro marka olup, Almanya menşeli Siemens AG tarafından üretilmektedir. 8 vagonlu oluşan tren setinin yolcu kapasitesi 500’ den fazladır. HT65000 model trenler azami 250km/s hıza ulaşabilirken HT80000 model trenler ise azami 300km/s hıza çıkabilmektedir fakat Türkiye’deki demiryolları standartları nedeniyle her iki model tren de azami 250km/s hız ile seyahat edebilmektedir. Ayrıca, her iki tren tipi için de sefer sonrasında 40 dakika ile 1,5 saat arası süren kontrol ve temizlik işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra trenlerin yeniden sefere çıkması mümkündür.

Farklı teknik özelliklere sahip HT65000 ve HT80000 tren setinin enerji tüketimi de farklıdır. Bu çalışmada, enerji tüketimi ( $E$ ), tren direnci ( $R$ ), taşıt tonajı ( $T$ ) ve hat uzunluğu ( $L_{hat}$ ) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 1’ de verilmiştir.

$$E = RTL_{hat} \quad (1)$$

Akbayır ve Çayır [18]' in çalışmalarında da vurgulandığı üzere, tren direnci ile ilgili çalışmalar incelendiğinde ampirik verilere dayalı tren direnci formüllerinin ilk olarak Schmidt [19] tarafından kullanılmıştır. Tren direnci hıza bağlı ikinci derece bir polinomla ifade edilmekte olup, bu eşitlik Davis Eşitliği olarak adlandırılmaktadır. Bu denklem, Denklem 2' de verilmiştir.

$$R = A + BV + CV^2 \quad (2)$$

Denklem 2' de  $A$  parametresi mekanik direnç anlamına gelir; dingil yükü, dingil sayısı, trenin uzunluğu, aracın tipi ve yol tipi gibi parametreler ile değişmektedir.  $A$  parametresi, dingil yükü ve toplam tren yükü ile doğrusal artmaktadır. Denklem 3' de  $A$  parametresinin hesaplama denklemi verilmiştir. Buna göre  $T$ , ton cinsinden toplam tren yükünü,  $m$  dingil yükünü ifade etmektedir.  $\lambda$  ise, araca bağlı bir parametre olup, SNCF araçları için 0,9 ile 1,5 arasında bir değer almaktadır.

$$A = \lambda T \sqrt{\frac{10}{m}} \quad (3)$$

Denklem 2' deki  $BV$  ifadesi,  $B$  katsayısı ve trenin ortalama hızı ( $V$ ) ile değişim göstermektedir.  $B$  katsayısı; trenin uzunluğuna veya dingil sayısı gibi boyutsal etkilere bağlıdır.  $CV^2$  ifadesi ise,  $C$  katsayısı ve hızın karesi ile değişmektedir.  $CV^2$  terimi, trenin ön ve arka alanına etki eden aerodinamik dirençler ile trenin uzunluğuna bağlı aerodinamik dirençlerin toplamını ifade eder. Denklem 4' de denklemi verilmiştir.

$$CV^2 = k_1SV^2 + k_2pLV^2 \quad (4)$$

$k_1SV^2$  terimi, trenin ön yüzünde ortaya çıkan aerodinamik direnç,  $k_2pLV^2$  ise trenin yan yüzeyleri boyunca ortaya çıkan aerodinamik dirençleri belirtir.  $k_1$ , trenin ön ve arka şekline bağlı bir parametre,  $k_2$  ise pürüzlülüğü ifade eden bir parametredir.  $k_2$  parametresi  $p \times L$  yüzeyine bağlı olup,  $p$  aracın ray seviyesine kadar olan kısmi çevresini  $L$  ise tren boyunu metre cinsinden ifade etmektedir.  $p$  değeri genelde 10 metre civarındadır.

**Tablo 2.** HT65000 ve HT80000 için direnç hesabında kullanılan parametreler

	HT65000	HT80000
$V$	125 km/sa	125 km/sa
$\lambda$	1.5	1.5
$L$	158,92m	200m
$T$	440 ton	480ton
$m$	18 ton	18 ton
$B$	4,4	4,8
$S$	10 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>
$p$	10 m	10 m
$k_1$	$9 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-4}$
$k_2$	$20 \times 10^{-6}$	$20 \times 10^{-6}$

Bu çalışmada, HT65000 ve HT80000 tren setlerinin enerji tüketimlerini hesaplayabilmek için Tablo 2' de verilen parametreler kullanılmıştır.[20] Yapılan hesaplamalar sonucu mevcut hatta, HT65000 model tren kullanımı sonucu harcanan toplam enerji 2855,088 kWh, HT80000 model tren kullanımı durumunda 3237,857 kWh olarak elde edilmiştir.

### 2.1. Matematiksel model

Bu çalışmada, Ankara-İstanbul hattında çalışan seferlere tren ataması için iki matematiksel model önerilmiştir. İlk model(M1) toplam enerji tüketimini en küçükleyen tren atamasını, ikinci

model(M2) ise, seferleri gerçekleştirecek enküçük tren sayısının belirlemeyi amaçlamaktadır. Problemin çözümü için önerilen 0-1 tamsayılı matematiksel modellerin varsayımları, parametreleri, karar değişkenleri, kısıtları ve amaç fonksiyonu bu bölümde verilmiştir.

Varsayımlar:

- Ankara-İstanbul hattını tamamlayan bir tren için kontrol ve temizlik işlemlerinin süresi ortalama 1 saat olarak kabul edilmiştir.
- Kapasite sebebi ile her iki istasyon için de günün ilk ve son 2 seferleri yüksek kapasiteli olan HT80000 model tren ile sağlanmalıdır.
- Trenlerin Ankara-İstanbul hattı arasındaki ara duraklarda düşük hızdaki seyirleri sebebiyle her iki tren tipinin ortalama hızı 125km/s olarak kabul edilmiştir.
- Trenlere ait amortisman giderleri, işletme maliyetleri dikkate alınmamıştır.
- Trenlerin bakım zamanları ve arızaları göz önünde bulundurulmamıştır.

Kümeler:

$N_1 = \{1,2,\dots,n_1\}$  HT65000 model tren kümesi

$N_2 = \{n_1 + 1, \dots, n_2\}$  HT80000 model tren kümesi

$N = N_1 \cup N_2$  Tren kümesi

$S_1 = \{1,2,\dots,m_1\}$  Ankara-İstanbul arasındaki sefer kümesi

$S_2 = \{m_1 + 1, \dots, m_2\}$  İstanbul-Ankara arasındaki sefer kümesi

$S = S_1 \cup S_2$  Sefer kümesi

İndisler:

$i$ : Tren indisi,  $i \in N$

$s$ : Sefer indisi,  $s \in S$

Parametreler:

$e_i$ :  $i$ . trenin hat boyunca tükettiği enerji miktarı

$M$ : Çok büyük pozitif bir sayı

*Karar Değişkenleri:*

$x_{is}$ :  $i$ . tren  $s$ . sefere atanırsa 1, diğer durumlarda 0.

$y_i$ :  $i$ . tren seçilirse 1, diğer durumlarda 0.

M1 Modeli:

$$Enk z = \sum_{s=1}^{m_2} \sum_{i=1}^{n_2} e_i x_{is} \quad (5)$$

M1 modelinin amaç fonksiyonu (Denklem 5), toplam enerji tüketimini en küçükmektir.

$$\sum_{i=1}^{m_2} x_{is} = 1 \quad \forall s \in S \quad (6)$$

Denklem 6, her sefere yalnızca bir tren atanmasını garanti etmektedir.

$$\sum_{i=n_1+1}^{n_2} x_{is} = 1 \quad \forall s \in S, s \leq 2 \text{ yada } m_1 - 1 \leq s \leq m_1 + 2 \text{ yada } m_2 - 1 \leq s \leq m_2 \quad (7)$$

Denklem 7, Ankara yönünden kalkan ilk ve son iki sefer için, ayrıca İstanbul yönünden kalkan ilk ve son iki sefer için kullanılan trenin HT80000 model olması sağlayan kısıttır. Sonraki kısıtlar seferlere özgü olduğundan açık formda ifade edilmiştir.

$$Mx_{i6} \geq x_{i10} + x_{i18} - 1 \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$Mx_{i13} \geq x_{i1} + x_{i8} - 1 \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$M(x_{i13} + x_{i14}) \geq x_{i1} + x_{i9} - 1 \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$Mx_{i14} \geq x_{i12} + x_{i9} - 1 \quad \forall i \in N \quad (11)$$

Denklem 8 – Denklem 11, bir trenin sefer uygunluğunu kontrol eden kısıttır. Örneğin, bir tren iki farklı İstanbul-Ankara seferine atanmış ise, aynı zamanda ilk seferin varış zamanı ve ikinci seferin kalkış zamanı bakımından uygun olan bir Ankara-İstanbul seferine de mutlaka atanmış olmalıdır. Benzer şekilde iki farklı Ankara-İstanbul seferine atanan bir treninde, uygun bir İstanbul-Ankara seferini gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu durumdaki her kombinasyon için uygun kısıtlar yazılmıştır.

$$x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (12)$$

$$x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i10} + x_{i11} + x_{i12} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (13)$$

$$x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} + x_{i8} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (14)$$

$$x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} + x_{i8} + x_{i9} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (15)$$

$$x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} + x_{i13} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (16)$$

$$x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} + x_{i8} + x_{i14} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (17)$$

$$x_{i5} + x_{i15} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (18)$$

$$x_{i6} + x_{i11} + x_{i12} + x_{i15} + x_{i16} + x_{i17} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (19)$$

$$x_{i10} + x_{i11} + x_{i12} + x_{i13} + x_{i14} + x_{i15} + x_{i16} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (20)$$

$$x_{i7} + x_{i8} + x_{i9} + x_{i15} + x_{i16} + x_{i17} + x_{i18} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (21)$$

$$x_{i11} + x_{i12} + x_{i13} + x_{i14} + x_{i18} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (22)$$

$$x_{i10} + x_{i13} + x_{i14} + x_{i17} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (23)$$

Bir tren bazı sefer gruplarından en çok bir tanesini gerçekleştirebilir. Örneğin, *i*. tren Ankara-İstanbul hattındaki 1. sefer ve 7. sefer arasındaki en çok bir sefere atanabilir. Bunun sebebi, kalkış varış zamanları ile uyumlu bir İstanbul-Ankara seferinin bulunmamasıdır. Bu durumdaki her kombinasyon için uygun kısıtlar Denklem 12 – Denklem 23' de ifade edilmiştir.

$$x_{is} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, s \in S \quad (24)$$

Denklem 24' de  $x_{is}$  karar değişkeninin işaret kısıtı verilmiştir.

M2 Modeli:

$$Enk z = \sum_{i=1}^{n_2} y_i \quad (25)$$

M2 modelinin amaç fonksiyonu (Denklem 25) seferlerde kullanılacak tren sayısının en küçüklenmesidir.

$$\sum_{s=1}^{m_2} x_{is} \leq M y_i \quad \forall i \in N \quad (26)$$

Denklem 26,  $x_{is}$  ve  $y_i$  karar değişkenlerinin ilişki kısıtıdır.

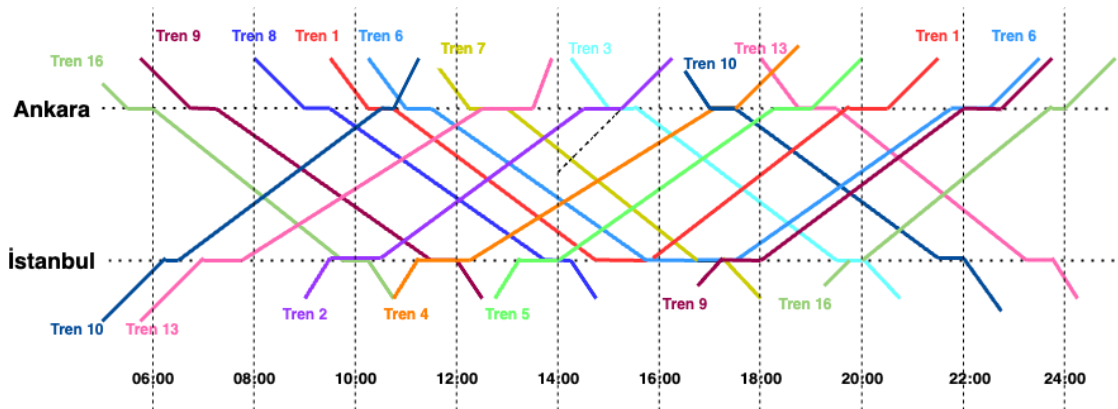
$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \quad (27)$$

$y_i$  karar değişkeninin işaret kısıtı, Denklem 27' de verilmiştir. M1 modelinde yer alan Denklem 6 – Denklem 24, M2 modelinin de kısıtlarını oluşturmaktadır.

### 3. Bulgular

Ankara-İstanbul arasındaki seferlere toplam enerji tüketimini enküçükleyen tren atamasını elde edebilmek için, önerilen M1 modeli GAMS 24.0 programında kodlanmış, Cplex çözücüsüyle 1 saniyeden daha kısa süre içerisinde en iyi çözüm elde edilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu değeri 54453 kWh olarak hesaplanmıştır.

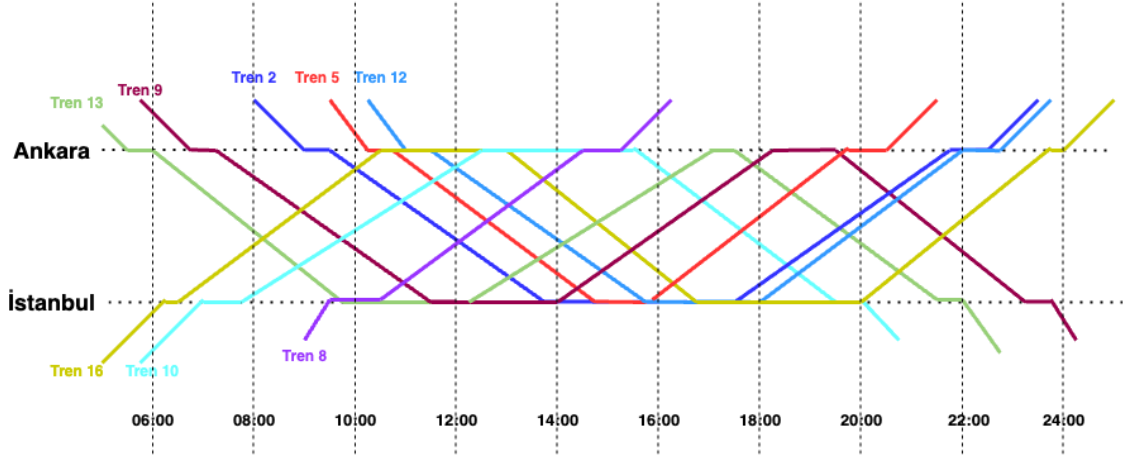
Elde edilen çözüme göre, 8 adet HT65000 model, 4 adet HT80000 model olmak üzere toplam 12 trenin mevcut seferleri gerçekleştirebilmek için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Zaman-yer grafiği Şekil 1' de verilmiştir. Tren numarası sekiz ve sekizden küçük olan trenler HT65000 modeldir. Kısıtlarda verilen, istasyonların yoğun zamanları olan ilk ve son 2 sefere HT80000 trenlerinin atanması sağlanmıştır.



Şekil 1. M1 modeli ile elde edilen zaman-yer grafiği

Ankara-İstanbul arasındaki seferleri gerçekleştirecek en az sayıda tren atamasını elde edebilmek için, M2 modeli GAMS/Cplex çözücüsüyle 1 saniyeden daha kısa sürede eniyi çözümü elde edilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu değeri 8' dir.

Eldeki çözüm incelendiğinde, 3 adet HT65000 model, 5 adet HT80000 model olmak üzere toplam 8 trenin halihazırdaki seferlere ataması yapılmıştır. Zaman-yer grafiği Şekil 2’ de verilmiştir. Tren numarası 2, 5 ve 8 olan trenler HT65000 modeldir. Şekil 2’ den de görüldüğü üzere, amaç kullanılan tren sayısını en küçükmek olduğunda tek bir tren birden çok seferde kullanılmıştır. Örneğin; HT80000 model Tren 9, Sefer 2, 9 ve 14’ de kullanılmıştır.



Şekil 2. M2 modeli ile elde edilen zaman-yer grafiği

Her iki zaman-yer grafiği kıyaslandığında, M1 modeli ile halihazırdaki seferleri gerçekleştirebilmek için daha çok sayıda trene ihtiyaç duyulmuştur. Ancak, amaç enerji tüketimini enküçükmek olduğundan, kısıtlar elverdiğince enerji tüketimi daha az olan HT65000 model tren kullanılmıştır. M2 modeli ile elde edilen çözümde ise, daha az sayıda tren kullanılmasına rağmen, seferleri büyük bir kısmı HT80000 trenleri ile yapılmıştır. Bu çözüme göre hesaplanan toplam enerji tüketimi 56368 kWh' tır. Beklendiği üzere, M2 modelinde enerji tüketimi performans ölçütü dikkate alınmadığından, enerji tüketimi daha yüksektir. Gerçek hayat problemlerinde iki model de karar vericinin tercihleri doğrultusunda ve farklı karar verme seviyelerinde kullanılabilir. Her iki modele de kolayca yeni kısıtlar eklenebilir. Özellikle, iki hat arasındaki seferleri gerçekleştirecek minimum tren sayısının elde edilmesi, planlamacılar açısından oldukça önemli bir karardır.

#### 4. Sonuç

Bu makalede, iki matematiksel model önerilmiştir. Bu modellerin temel amacı, seferlere atanacak trenleri belirlemektir. Ancak, her iki model planlama problemini farklı karar verme seviyelerinde ele almıştır. M1 modeli tren atama problemi taktiksel planlama seviyesinde, M2 modeli ise stratejik planlama seviyesinde dikkate almıştır. Öyle ki, M1 modelinde halihazırdaki tren filosu içerisinde enerji tüketimini enküçükleyecek trenlerin seferlere atanmasını amaçlamaktadır. M2 modelinde ise, tüm seferleri gerçekleştirebilecek minimum tren sayısının belirlenmesini amaçlamaktadır. Önerilen modeller, GAMS yazılımında kodlanmıştır. Ankara-İstanbul arasındaki seferler için çözümler elde edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, M1 modeli detaylandırılarak, tren hatlarındaki ara duraklar da probleme dahil edilip istasyonlar arası mesafenin bir parametre olarak kullanıldığı yöntemler ile direnimler hesaplanabilir. Trenlerin bakım süreleri ve arızalanma olasılığını dikkate alan, dinamik bir model geliştirilebilir. Ayrıca, trenlerin duruş ve kalkış süreçlerindeki enerji tüketimleri de göz önüne alınarak daha kapsamlı bir çalışma ortaya koyulması mümkündür. M2 modeline ise, personel kısıtları dahil edilip, tren atama problemi ve vardiya çizelgeleme problemi birlikte ele alınabilir.



## Kaynakça

- [1] M. Boroun, S. Ramezani, N. V. Farahani, E. Hassannayebi, S. Abolmaali and M. Shakibayifar, "An efficient heuristic method for joint optimization of train scheduling and stop planning on double-track railway systems," *INFOR: Information Systems and Operational Research*, vol.58 no.4, pp. 652-679, 2020.
- [2] L. Yang, Y. Yao, H. Shi and P. Shang, "Dynamic passenger demand-oriented train scheduling optimization considering flexible short-turning strategy," *Journal of the Operational Research Society*, vol.72, no.8, pp. 1707-1725, 2021.
- [3] X. Xu, K. Li, L. Yang, and Z. Gao, "An efficient train scheduling algorithm on a single-track railway system" *Journal of Scheduling*, vol.22, pp. 85-105, 2019.
- [4] Y. Huang, C. Mannino, L. Yang, and T. Tang, "Coupling time-indexed and big-M formulations for real-time train scheduling during metro service disruptions," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol.133, pp.38-61, 2020.
- [5] N. Gültekin, and T. Eren. "Demiryolu çizelgeleme probleminin modellenmesi ve çözümü," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 29, no.2, 235-242, 2014, doi:10.17341/gummfd.18951.
- [6] Ö. Yalçınkaya. "Tren çizelgeleme problemi: bir modelleme ve çözüm yaklaşımı," *Demiryolu Mühendisliği*, vol.3, pp. 75-80, 2016.
- [7] F. Li, Z. Gao, K. Li, and D. Z. W. Wang. "Train routing model and algorithm combined with train scheduling" *Journal of Transportation Engineering* vol.139, no.1, 2013.
- [8] A. R. Jafarian-Moghaddam, "Economical speed for optimizing the travel time and energy consumption in train scheduling using a fuzzy multi-objective model" *Urban Rail Transit*, vol.7, no.3, pp. 191-208, 2021.
- [9] J. Zhou, X. Guo, and F. Li, "Urban rail train scheduling with smoothing energy consumption peaks and synchronization time minimization: Using novel time-shift control scheme" *IEEE Access*, vol.9, pp. 70142-70154, 2021.
- [10] H. Zhang, L. Jia, L. Wang, and X. Xu, "Energy consumption optimization of train operation for railway systems: Algorithm development and real-world case study" *Journal of Cleaner Production*, vol.214, pp. 1024-1037, 2019.
- [11] S. Zhan, P. Wang, S. C. Wong, and S. M. Lo, "Energy-efficient high-speed train rescheduling during a major disruption," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol.157, 102492, 2022.
- [12] P. Mo, L. Yang, A. D'Ariano, J. Yin, Y. Yao and Z. Gao, "Energy-efficient train scheduling and rolling stock circulation planning in a metro line: a linear programming approach," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.21, no.9, pp. 3621-3633, 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2930085.
- [13] B. Jin, X. Feng, Q. Wang, P. Sun and Q. Fang, "Train scheduling method to reduce substation energy consumption and peak power of metro transit systems," *Transportation Research Record*, vol.2675, no.4, pp. 201-212, 2021, doi: 10.1177/0361198120974677.
- [14] S. Hasan-zadeh, S. F. Zarei and E. Najafi, "A train scheduling for energy optimization: Tehran metro system as a case study," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 357-366, 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3215095.
- [15] L. Zhang, D. He, Y. He, B. Liu, Y. Chen and S. Shan, "Real-time energy saving optimization method for urban rail transit train timetable under delay condition," *Energy*, vol.258, 124853, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124853
- [16] C. G. Corlu, R. de la Torre, A. Serrano-Hernandez, A.A. Juan, and J. Faulin, "Optimizing energy consumption in transportation: Literature review, insights, and research opportunities," *Energies*, vol.13, no.5, 1115, 2020.
- [17] P. M. Fernández, I. V. Sanchís, V. Yepes, and R. I. Franco, "A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption" *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, pp. 153-162, 2019.
- [18] Ö. Akbayır and F. H. Çakır, "Enerji verimliliği için tren direnci formüllerinin karşılaştırılması," *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 1, pp. 112-126, 2017.
- [19] E. C. Schmidt, *Freight train resistance, its relation to car weight*. Vol. 43 of Engineering Experiment Station Illinois University, Urbana, Illinois 1910.

[20] S. Ateş, “Yüksek hızlı demiryolu trafiğinin ürettiği bina titreşimlerinin saha koşullarında ölçülmesi ve uluslararası standartlara göre değerlendirilmesi,” Master Thesis, Department of Civil Engineering, Sakarya University, Sakarya, 2021.

### Özgeçmiş



#### **Enver Kerem KAYA**

1995 yılında Mersin’de doğmuştur. Eskişehir Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’nden Lisans derecesini almıştır. Montaj ve Proses Mühendisi olarak çalışmaktadır. Optimizasyon, üretim ve operasyon planlama, modelleme ve simülasyon ilgi alanına giren konulardır.

E-Posta: enverkeremkaya@gmail.com



#### **Melike SÖNMEZ**

1997 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Eskişehir Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Üretim ve Servis Sistemleri Planlama, Tasarım ve Çizelgeleme konuları ilgi alanına giren araştırma konularındandır.

E-Posta: melikesonmez197@gmail.com



#### **Emine AKYOL ÖZER**

1989 yılında Osmaniye’ de doğmuştur. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında Lisans ve 2013 yılında Yüksek Lisans derecesini aldı. 2017 yılında Pardubice Üniversitesi (University of Pardubice)’ nde Ulaştırma Mühendisliği alanında doktorasını tamamladı. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi’nde Endüstri Mühendisliği bölümünde Doktor Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları optimizasyon, gerçek zamanlı sistemler, hata teşhisi ve durum izleme, si matematiksel modeller, optimizasyon ve ilerisezgisel algoritmalarıdır.

E-Posta: emineakyol@eskisehir.edu.tr

### **Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Enver Kerem KAYA: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Modelleme. Melike SÖNMEZ: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Emine AKYOL ÖZER: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.