





Tren Çizelgeleme Problemine Karmaşık Atölye Tabanlı Bir Yaklaşım: Türkiye Uygulama Örnekleri

Selma SAKA SEZER ^{*1}, Ertan GÜNER ²

¹ TCDD Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

*sakasezerselma@gmail.com

(Alınış/Received: 13.12.2025, Kabul/Accepted: 02.01.2026, Yayınlama/Published: 19.01.2026)

Öz: Bu çalışmada, literatürde önerilen Paralel Makine Atama (PMA) modeli kullanılarak bloklama kısıtlı tren çizelgeleme problemi ele alınmış ve model, Türkiye demiryolu ağından seçilen iki tek hatlı–çift yönlü koridor (Fevzipaşa–Toprakkale ve Irmak–Boğazköprü) üzerinde uygulanmıştır. Ayrık graf formülasyonundaki öncelik değişkenleriyle karma tam sayılı programlama yapısına aktarılan model, dört farklı talep düzeyi (8, 10, 12 ve 15 tren) ve farklı tren tipi birleşimleri altında IBM ILOG CPLEX çözücüsü ile test edilmiştir. Sonuçlar; toplam gecikme, bloklanma yüzdesi, darboğaz kesitleri ve çözüm süreleri açısından karşılaştırıldığında, daha uzun ve dengesiz istasyon aralıklarına sahip Irmak–Boğazköprü koridorunun Fevzipaşa–Toprakkale koridoruna kıyasla daha yüksek bloklanma, gecikme ve hesaplama süresi ürettiği gösterilmiştir. Çalışma, Türkiye demiryolu ağı için karmaşık atölye tabanlı, bloklama kısıtlı tren çizelgeleme problemlerine yönelik bir MIP modelleme ve test veri seti şablonu sunmakta; gerçek iki Türk koridoruna ilk kez uygulanması, işlem sürelerinin TCDD 2025 Şebeke Bildirimi ve ilgili raporlara dayalı olarak türetilmesi, tren tiplerinin işletme önceliklerine göre tanımlanması ve farklı talep senaryolarında bloklanma–gecikme–hesaplama süresinin birlikte analiz edilmesi bakımından literatüre özgün katkılar sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Tren Çizelgeleme, Karmaşık Atölye Tipi Çizelgeleme, Bloklama, Paralel Makine, Karma Tam Sayılı Programlama, TCDD

A Job Shop-Based Approach to the Train Scheduling Problem: Case Studies from Türkiye

Abstract: This study addresses the train scheduling problem by applying the Parallel Machine Assignment (PMA) model proposed in literature to two single-track, bidirectional railway corridors selected from the Turkish railway network (Fevzipaşa–Toprakkale and Irmak–Boğazköprü). Using precedence variables from the disjunctive graph formulation, the blocking-constrained train scheduling problem is formulated as a mixed-integer programming model and tested under four different demand levels (8, 10, 12, and 15 trains) and various train type combinations using the IBM ILOG CPLEX solver. The results, evaluated in terms of total delay, blocking percentage, bottleneck sections, and computation time, show that the Irmak–Boğazköprü corridor, due to its longer and more uneven station spacing, generates significantly higher blocking, delay, and computational effort compared to the Fevzipaşa–Toprakkale corridor. The study provides a mixed-integer programming modeling and test data set template for complex job-shop-based, blocking-constrained train scheduling problems in the Turkish railway network and distinguishes itself from the literature by being the first to adapt such a model to two real corridors in Turkey. Deriving section and station processing times based on the TCDD 2025 Network Statement and related activity reports, defining train types according to national operational priorities, and jointly analyzing blocking, delay, and computation time under different demand scenarios constitute the main original contributions of this study.

Keywords: Train Scheduling, Job Shop Scheduling, Blocking, Parallel machines, Mixed Integer Programming, TCDD

Atıf için/Cite as: S. Saka Sezer, E. Güner, “Tren çizelgeleme problemine karmaşık atölye tabanlı bir yaklaşım: Türkiye uygulama örnekleri,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 23, no. 1841796, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1841796

1. Giriş

Demiryolları; yüksek taşıma kapasitesi, enerji verimliliği ve düşük karbon salımı ile hem Türkiye’de hem de dünyada sürdürülebilir ulaşım politikalarının merkezinde yer almaktadır. [2] Bu nedenle hem Türkiye hem dünyada yük ve yolcu taşımacılığında demiryolu payını artırmaya yönelik çalışmalara ağırlık verilmektedir. Bu doğrultuda demiryolu altyapısı ağını genişletme ve güçlendirme yatırımlarının yanı sıra demiryolu işletmeciliğini geliştirme yönünde de atılımlar önem kazanmıştır.

Mevcut hat kapasitesinin maksimum verimle kullanılması demiryolu işletmeciliğinin geliştirilmesinde önemli bir bileşendir. Bu nedenle, demiryollarının ulaşırma modları içindeki taşıma payının artırılması hedefine yönelik olarak yapılan çalışmalar arasında öncelikli olarak ele alınmalıdır. Ayrıca, Türkiye’nin jeostratejik konumu nedeniyle Asya–Avrupa–Orta Doğu ticaret koridorlarının kesişim noktasında yer alması demiryolu kapasitesinin etkin kullanımını daha da kritik kılmaktadır.

Demiryollarında tren çizelgeleme, sınırlı hat kapasitesi üzerinde artan sayıda trenin mümkün olduğunca az gecikme ve yüksek güvenlikle işletilmesini amaçlar ve bu nedenle demiryolu operasyonlarının planlanmasında en önemli karar aşamasıdır.

Bu çalışmada tren çizelgeleme problemi karmaşık atölye tipi çizelgeleme mantığıyla ele alınmaktadır. Hat kesitleri makineler, trenler ise bu makineler üzerinde belirli sırada operasyon dizilerini gerçekleştiren işler olarak ele alınmıştır. Ayrıca, tek hatlı bir koridorda trenlerin bir sonraki kesit müsait hale gelmeden mevcut kesiti terk edememesi, karmaşık atölye probleminin “depolamasız / ara stok alanı olmayan” özel durumuna uyarlanarak probleme dahil edilmiştir.

2. Literatür Özeti

Tren çizelgeleme problemi, demiryolu işletmeciliğinde artan kapasite kullanımı ve güvenilirlik gereksinimleri nedeniyle literatürde sıklıkla ele alınmış, NP-zor problemler sınıfında değerlendirilerek çözümü için çeşitli optimizasyon modelleri, sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler, ayrık olay simülasyonu yaklaşımları geliştirilmiştir [3], [4], [5]. Bu çalışmalarda temel amaç, genellikle toplam gecikmenin veya toplam sapmanın minimize edilmesi, aynı zamanda tek hat kapasitesi, istasyon kısıtları ve güvenlik aralığı koşullarının sağlanmasıdır.

Bu genel çerçeve içinde literatürdeki çalışmalar, kullanılan çözüm yaklaşımına göre üç ana grupta toplanabilir:(i) kesin optimizasyon temelli modeller (MILP, ayrık graf tabanlı yaklaşımlar), (ii) sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler (GA, Tabu Arama, Tavlama Benzetimi, yerel arama ve hibritler) ve (iii) ayrık olay simülasyonu ve simülasyon–optimizasyon tabanlı yaklaşımlar. Her bir yaklaşım farklı problem ölçekleri ve amaçlar için avantaj ve sınırlılıklar barındırmaktadır.

Hat kesitlerinin makaleler, trenlerin ise bu makineler üzerinde işlem gören işler olarak yorumlandığı karmaşık atölye çerçevesi ilk kez Szpigel [6] tarafından önerilmiş, daha sonra çok sayıda araştırmacı bu yaklaşımı geliştirmiştir [7], [8], [9], [10]. Mascis ve Pacciarelli’nin [11] bloklama ve beklemesizlik kısıtlarını alternatif graf modeli üzerinde ikili öncelik değişkenleri ile ifade ettiği yaklaşım, daha sonra hem genel karmaşık atölye problemlerinde hem de bloklama kısıtlı tren çizelgeleme uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmıştır.

Bu çalışmaların literatürdeki önemi, tek hatlı demiryolu işletmesinin temel fiziksel kısıtı olan “bloklanma” olgusunu çizelgeleme modeline açık biçimde dâhil etmeleridir. Bununla birlikte, bu tür ayrık graf ve MILP tabanlı modellerde değişken ve kısıt sayısının hızla artması, özellikle gerçek ölçekli ağlarda hesaplama süresini sınırlayıcı bir faktör hâline getirmektedir. Bu durum,

literatürde kesin modellerin çoğunlukla küçük veya sentetik ağlar üzerinde test edilmesine yol açmıştır.

Lange ve Werner [1] tren çizelgeleme problemine karmaşık atölye perspektifinden yaklaşarak, bloklama kısıtları içeren dört farklı karma tam sayılı programlama formülasyonu önermiş, çalışmalarında bu modelleri teorik topolojiler ve sentetik test örnekleri üzerinde karşılaştırmışlardır. Lange ve Werner [1] paralel makine kavramını temel alan mevcut çizelgeleme yaklaşımlarını, bloklama kısıtlı tren çizelgeleme bağlamında farklı atama ve öncelik değişkenleriyle yeniden formüle etmiş; böylece modelleme tercihleri ile çözüm performansı arasındaki ilişkiyi sistematik olarak inceleyen bir MIP formülasyon ailesi önermiştir. Ancak modellerin gerçek demiryolu koridorları üzerinde uygulanmamış olması, topolojik dengesizliklerin ve gerçek hat uzunluklarının bloklanma ve gecikme üzerindeki etkilerinin analiz edilmesini sınırlamaktadır.

Sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler, tren çizelgeleme probleminin özellikle büyük ölçekli ve gerçek zamanlı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda tabu arama (TS), tavlama benzetimi (SA), yerel arama ve bu yöntemlerin hibrit birleşimleri, yeniden çizelgeleme ve trafik yönetimi problemlerinde tercih edilen başlıca yaklaşımlar arasında yer almaktadır. D' Ariano, Pacciarelli ve Pranzo [8] tabu arama temelli bir yaklaşım ile tren çatışmalarının gerçek zamanlı olarak giderilmesini ele almış; Higgins ve Kozan [5] ise kural tabanlı sezgisel yöntemleri yerel iyileştirme adımlarıyla birleştirerek tek hatlı çizelgeleme problemleri için uygulanabilir çözümler üretmiştir.

Tavlama benzetimi ve yerel arama temelli yaklaşımlar, özellikle yerel minimumlardan kaçabilme yetenekleri nedeniyle periyodik ve tek hatlı çizelgeleme problemlerinde kullanılmıştır. Akdemir [12] tren çizelgeleme problemini simülasyon–optimizasyon çerçevesinde ele alarak tabu arama, tavlama benzetimi ve yerel arama yöntemlerini karşılaştırmış; sonuçlar, bu yöntemlerin çözüm kalitesinin büyük ölçüde parametre ayarlarına ve komşuluk tanımlarına duyarlı olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Yalçınkaya [13] tarafından geliştirilen simülasyon tabanlı çalışmalarda, sezgisel ve rassal arama mekanizmalarının operasyonel belirsizlikleri temsil etmede etkili olduğu; ancak optimalite garantisi sunmadığı vurgulanmıştır.

Son yıllarda, bu yöntemlerin ayrık olay simülasyonu ile birlikte kullanıldığı hibrit yaklaşımlar da literatürde yer bulmuştur. Song ve diğerleri [14] , simülasyon ve tabu aramayı birleştiren bir çerçeve ile karmaşık istasyon yapılarında tren yönlendirme ve çizelgeleme problemlerini ele almış; elde edilen sonuçlar, hibrit yaklaşımların büyük problem örneklerinde hesaplama açısından avantaj sağladığını, ancak çözüm kalitesinin kullanılan sezgisel stratejilere bağımlı olduğunu ortaya koymuştur.

Ayrık olay simülasyonu tabanlı yaklaşımlar, demiryolu sistemlerindeki stokastik yapı ve operasyonel belirsizliklerin modellenmesi amacıyla kullanılmıştır. Yalçınkaya [13] ve Akdemir [12] tarafından geliştirilen simülasyon–optimizasyon tabanlı çalışmalar, hat arızaları, gecikmeler ve talep belirsizliklerini etkili biçimde temsil edebilmiş; ancak bu yaklaşımlar genellikle sezgisel arama stratejilerine dayandığından, elde edilen çözümlerin optimaliteye yakınlığı sistematik olarak garanti edilememektedir.

Aydın 15, tek hatlı ve çift yönlü demiryolu hatlarında trenlerin yeniden çizelgelenmesi problemini ele almış ve karşılaşma ile geçiş kararlarını ikili değişkenler aracılığıyla modelleyen kesin bir karma tam sayılı programlama yaklaşımı önermiştir. Çalışma, tren çizelgeleme problemini gerçekçi işletme kısıtları altında matematiksel olarak formüle etmesi ve küçük–orta ölçekli örnekler için optimal çözümler üretebilmesi bakımından literatürde önemli bir referans oluşturmaktadır.

Diğer yandan tren çizelgeleme ve tren hareket planlama problemlerine ilişkin farklı modelleme yaklaşımları (olay-aktivite ağları, ağ akışı modelleri, ayrık graf programlama vb.) ve çözücü teknikleri derleyen kapsamlı literatür araştırmaları sunulmuştur [16], [17].

Özetle, literatürde tren çizelgeleme problemi için karmaşık atölye tabanlı kesin modeller ile sezgisel, meta-sezgisel ve simülasyon tabanlı yaklaşımlar geniş biçimde ele alınmış; buna karşın bloklama kısıtlarını açık biçimde içeren ve gerçek demiryolu koridorlarına dayalı karşılaştırmalı analizler sunan çalışmalar sınırlı kalmıştır.

Bu çalışma, literatürde önerilen PMA tabanlı karmaşık atölye modelini Türkiye demiryolu ağına ait iki gerçek tek hatlı-çift yönlü koridora uyarlayarak; farklı talep düzeyleri altında bloklanma, gecikme ve hesaplama süresi etkilerini birlikte incelemesi bakımından, tezde yer alan sezgisel ve simülasyon ağırlıklı çalışmalardan yöntemsel olarak ayrılmaktadır.

3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Çalışmanın temel amacı, Lange ve Werner [1] tarafından önerilen öncelik tabanlı değişkenler ve paralel hatları ayrı makineler olarak ele aldıkları PMA modelini, Türkiye demiryolu altyapısında gerçek birer test alanı olan Fevzipaşa-Toprakkale ve Irmak-Boğazköprü koridorlarına uyarlamak ve bu modelin farklı topolojik yapılar da; farklı tren tipleri (yavaş-orta-hızlı) ve bunların çeşitli birleşimlerinde, farklı talep düzeyleri altında gösterdiği performansı karşılaştırmaktır.

Lange ve Werner[1] kurgusal olarak oluşturdukları basit bir hat topolojisinde bu MIP'lerin testlerini yapmış ve sonuçlarını paylaşmışlardır. Hesaplama sonuçlarına göre , öncelik tabanlı ve sıralama tabanlı yaklaşımlar kıyaslandığında uygulanabilirlik açısından belirgin farklar bulunmuştur. Sıralama tabanlı formülasyonların, modelin boyutunu ciddi biçimde artırdığı ve orta ölçekli problemler için dahi çoğu durumda verilen süre sınırları içerisinde tam sayılı çözüme erişme ve hesaplama süresi açısından daha kararlı sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle PMA modelinin Türkiye koridorlarında denenmesinde öncelik tabanlı atama değişkenleri kullanılmıştır.

Fevzipaşa-Toprakkale ve Irmak-Boğazköprü koridorlarının PMA modeli uygulama alanı olarak seçilmelerindeki temel sebep, her iki koridorun da iki yönden yoğun tren girişinin olduğu kavşak noktaları içermesi ve bu girişlerin bir tek hatlı kesitle devam etmesi dolayısı ile seçilen koridorların modellerin toplam gecikme ölçümündeki performansını test etmeye elverişli alanlar olmasıdır.

Bu amaçla TCDD 2025 Şebeke Bildirimi [18] esas alınarak her iki koridor basitleştirilmiş bir topolojiye dönüştürülmüştür. Tren çizelgeleme problemi, ara stok alanı bulunmayan karmaşık atölye problemi olarak modellenmiş, bloklama, güvenlik aralığı ve öne geçme kuralları öncelik değişkenleri aracılığıyla karma tam sayılı programlama formuna aktarılmıştır.

Model, Fevzipaşa-Toprakkale ve Irmak-Boğazköprü koridorlarında dört farklı tren sayısı senaryosu (8, 10, 12 ve 15 tren) ve her senaryoda farklı tren tipi kompozisyonları altında çalıştırılmış; çözüm kalitesi, toplam gecikme, bloklanma yüzdesi, darboğaz kesitleri ve hesaplama süreleri kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Çalışma, Türkiye demiryolu ağı için karmaşık atölye tabanlı, bloklama kısıtlı tren çizelgeleme modellerine dayalı bir test veri seti oluşturulması açısından da örnek bir çerçeve sunmaktadır.

4. Problem Tanımı

Çalışmada tanımlanan tren çizelgeleme probleminde, belirlenen koridorlardaki hat topolojilerine göre trenlerin güzergahları, geliş zamanları, varış zamanları, tren tipleri problemin girdilerini

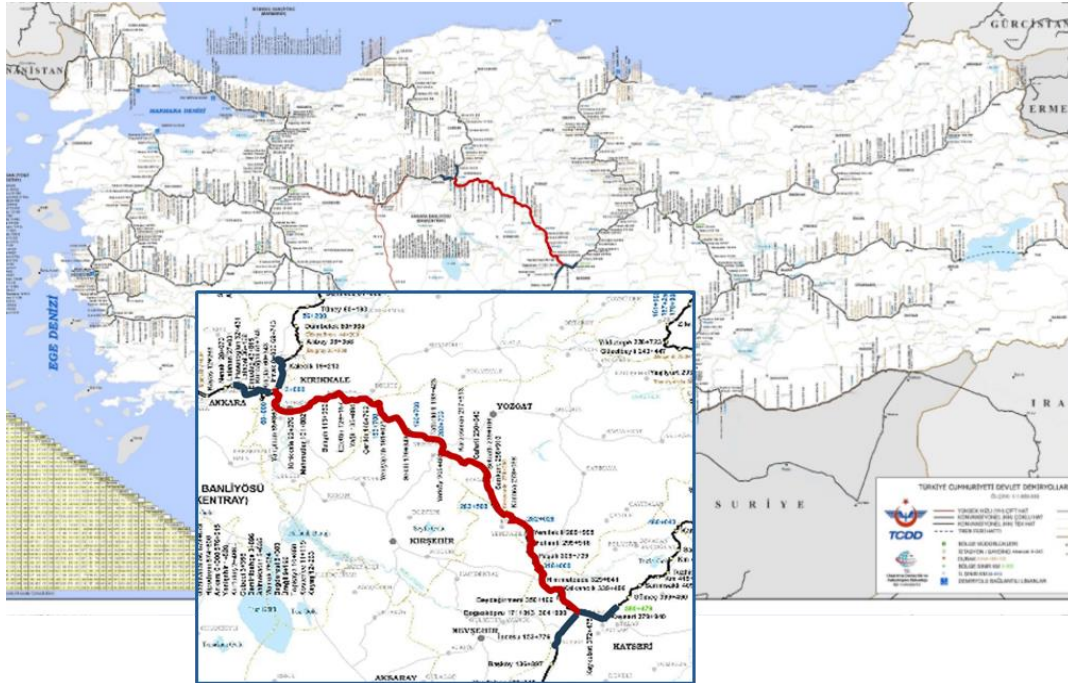
oluşturmaktadır. Ön çizelgede belirlendiği kabul edilen ve elde edilişi bölüm 4.1’de açıklanacak bu girdiler kullanılarak toplam gecikme , darboğaz ve bloklama analizleri yapılmıştır.

Kısa mesafe aralığını içine alan ve hat topolojisi nispi olarak daha sade olan Fevzipaşa–Toprakkale koridoru, ağırlıklı olarak yük trenlerinin kullandığı, kritik lojistik bağlantılardan biridir. Şekil 1’de hattın Türkiye Demiryolu ağı üzerindeki bölümü gösterilmiştir.



Şekil 1. Fevzipaşa-Toprakkale demiryolu koridoru

PMA modelinin uygulandığı ikinci demiryolu koridoru ise yolcu ve yük trenlerinin birlikte işletildiği karma bir taşıma koridoru olan Irmak-Boğazköprü koridorudur. Şekil 2’de koridorun Türkiye Demiryolu haritası üzerindeki görünümü verilmiştir.



Şekil 2. Irmak-Boğazköprü demiryolu koridoru

4.1. Tren tipleri ve işlem süreleri

Çalışmada yavaş Trenler, orta hızlı trenler, hızlı (ekspres) trenler olarak üç tren tipi tanımlanmıştır. Tren tipleri için seçilen hat koridorlarındaki ortalama hızlar ise koridorlarda 2025 TCDD Şebeke Bildiriminde [18] izin verilen hız sınırları baz alınarak ve tren tiplerine göre sırayla 1,5 kat hız fark katsayısı uygulanarak ulaşılan hız kabulleri ile belirlenmiştir. Yavaş trenler 40 km/saat, orta hızlı trenler 60 km/saat, hızlı(ekspres) trenler ise 90 km/saat ortalama hızlara sahip kabul edilmiştir.

Her bir tek hat kesiti ve istasyon ve sayding paralel hat kesitleri için, her bir tren tipine ait seyir süreleri hesaplanmıştır. Bu sürelerin elde edilmesinde iki aşamalı bir yöntem izlenmiştir.

Öncelikle tek hatlı bloklardaki seyir süreleri *Hat kesiti uzunluğu(km)/Tren Tipi Ortalama Hızı(km/sa)*60dk* formülüyle elde edilen seyir süreleri ile eş değer kabul edilerek belirlenmiştir. Giriş-çıkış noktaları olduğu kabul edilen G1,G2 ,G3 ve G4 noktaları ile kavşak noktaları arası mesafeler, ilgili koridorun tek hatlı kesitleri arası mesafelerin yaklaşık ortalamasına eş kabul edilerek aynı formülle hesaplama yapılmıştır.

İstasyonlarda geçen seyir süreleri belirlenirken, istasyonların operasyon yoğunluğunun (yolcu indirme-bindirme-transfer, yükleme-aktarma-boşaltma-vagon ayırma-lokomotif ve personel değişimi; karşılaşma-öne geçme işlemleri; sinyalizasyon yol hazırlığı, giriş-çıkış izinleri ile makas geçişleri vb.) en fazla olduğu demiryolu bölümleri olduğundan hareket edilmiştir. İstasyondaki her bir paralel hatta geçen seyir süresi, ilgili hat topolojisindeki en uzun seyir süresine 15 dk bekleme süresi ile yaklaşma ve kalkış safhasındaki hız düşüşleri ve sinyal güvenlik paylarını temsilen 5 dk ek sürenin dahil edilmesiyle bulunmuştur. Bu sayede, modelde sıradan bir hat kesitine kıyasla darboğaz yaratma potansiyeli yüksek kritik bloklar olarak yer almaları sağlanmıştır.

Saydingler kısa hat bloklarıdır. Fakat tek hatlı demiryolunun bekleme-karşılaşma-öne geçme işlemlerinin yapıldığı bölümleri olması dolayısı ile modele dahil edilirken hat topolojisindeki en kısa seyir süresiyle eş değer seyir süreleri kullanılmıştır.

İkinci aşamada ise ortaya çıkan bu süreler hesaplama kolaylığı açısından aynı katsayı ile çarpılarak sadeleştirilmiş ve tren tiplerine göre farklılaştırılarak PMA model formülasyonuna dahil edilmiştir.

Tablo 1 ve Tablo 2 'de bu hesaplama mantığı ile oluşturulan tren tiplerine göre ve hat kesitlerine ait işlem süreleri koridor bazında verilmiştir.

Tablo 1. Fevzipaşa-Toprakkale hat kesitlerine göre işlem süreleri(dk)

Hat Kesiti/İstasyon/Sayding	Orta Hızlı Tren Seyir Süresi	Hızlı Tren Seyir Süresi	Yavaş Tren Seyir Süresi
G1-Fevzipaşa	5	3	8
G2-Fevzipaşa	5	3	8
Fevzipaşa-Ayran	2	1	3
Ayran Saydingi (1)	2	1	3
Ayran Saydingi (2)	2	1	3
Ayran-Mamure	7	5	10
Mamure İstasyonu (1)	11	6	3
Mamure İstasyonu (2)	11	6	3
Mamure-Toprakkale	4	3	6
Toprakkale-G3	5	3	8
Toprakkale-G4	5	3	8

Tablo 2. Irmak-Boğazköprü hat kesitlerine göre işlem süreleri(dk)

Hat Kesiti/İstasyon/Sayding	Orta Hızlı Tren Seyir Süresi	Hızlı Tren Seyir Süresi	Yavaş Tren Seyir Süresi
G1-Irmak	8	5	12
G2-Irmak	8	5	12
Irmak-Yahşihan	3	2	5
Yahşihan İstasyonu (1)	12	8	4
Yahşihan İstasyonu (2)	12	8	4
Yahşihan-İzzettin	8	5	16
İzzettin Saydingi (1)	3	2	4
İzzettin Saydingi (2)	3	2	4
İzzettin-Çerikli	4	3	6
Çerikli Saydingi (1)	3	2	4
Çerikli Saydingi (2)	3	2	4
Çerikli-Yerköy	12	8	18
Yerköy İstasyonu	12	6	4
Yerköy İstasyonu	12	6	4
Yerköy-Himmetdede	25	17	37
Himmetdede Saydingi (1)	3	2	4
Himmetdede Saydingi (2)	3	2	4
Himmetdede-Beydeğirmeni	4	3	6
Beydeğirmeni Saydingi (1)	3	2	6
Beydeğirmeni Saydingi (2)	3	2	6
Beydeğirmeni-Boğazköprü	3	2	5
Boğazköprü-G3	8	5	12
Boğazköprü-G4	8	5	12

5. Metodoloji

Bu bölümde öncelik değişkenleri kullanarak oluşturulan PMA modelleme yaklaşımı özetlenmekte, ardından modele ait formülasyonlar tanımlanmaktadır.

5.1. Varsayımlar

Modellemeyi sadeleştirmek için şu varsayımlar yapılmaktadır:

Trenlere ait güzergahlar önceden bellidir ve sabittir.

Her iki koridora giriş ve çıkışlar yalnızca G_1, G_2, G_3 veya G_4 noktalarının birinden yapılır. Giriş yapılan noktadan çıkış yapılamaz.

İstasyonlar aynı zamanda giriş yönünün tersinde çıkışların yapılabilmesine imkan veren, geri dönüşlerin yapılabildiği terminal noktalarıdır.

Her kesitte aynı anda yalnızca bir tren bulunabilir; istasyonlar ve saydinglelerdeki paralel hatlar PMA modelinde ayrı ayrı paralel makineler ile temsil edilmektedir.

Trenler, bir kesitten çıkmadan bir sonraki kesite giremeyeceği için, sonraki kesit müsait hale gelmeden mevcut kesiti terk edemez. Bu durum modele bloklama kısıtları ile dahil edilmiştir.

Geçme (hızlı trenin yavaş treni sollaması) yalnızca istasyon veya saydinglelerde mümkündür; diğer kesitlerde trenlerin sırası korunur.

Talep çizelge döneminde deterministtir, dönem içerisindeki tren iptal ve eklemeleri dikkate alınmamıştır.

Periyodik ve çevrimsel tren güzergâhlarını temsil edebilmek amacıyla, modelde yeniden dolaşıma izin verilmiştir. Bu varsayım aynı işin bir makinede tekrarlı şekilde işlenebilmesine karşılık gelmektedir.

5.2. Tek hatlı demiryolunda karmaşık atölye çizelgeleme temeline dayanan modelleme çerçevesi

Tek hatlı demiryolu kesitinde trenlerin hareketi, klasik karmaşık atölye çizelgeleme mantığı ile güçlü bir yapısal benzerlik göstermektedir. Karmaşık atölye temeline dayandırılan tren çizelgeleme problemi modeli aşağıda verilmiştir.

Belirli bir demiryolu bölümündeki hatlar veya hat kesitleri makineler kümesini oluşturur.

$$(M = \{M_k \mid k = 1, 2, \dots, n\})$$

Her tren, hatlar ve hat kesitlerinin temsil ettiği makinelerde işlenen iş olarak kabul edilir ve trenler kümesi işler kümesini oluşturur.

$$J = \{J_i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$$

Ele alınan tek hatlı demiryolu hatları kesitlere ayrılmıştır. Her trenin sıralı olarak geçeceği hat kesitleri o trenin teknolojik sırasını oluşturan operasyon kümesidir.

$$O^i = \{O_{ij} \mid j = 1, 2, 3, \dots, n_i\}, J_i \text{ treninin operasyon kümesidir.}$$

O_{ij} : J_i treninin güzergahı içerisinde j. sırada geçtiği hat kesitidir.

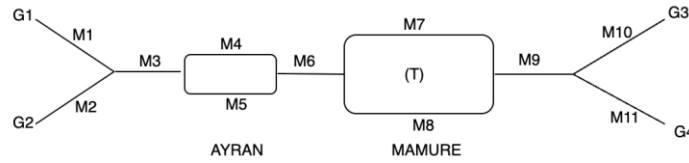
(O_{in_i} : J_i trenin son geçtiği hat kesitidir.)

$OpMa^k$: Tren çizelgelemede k hat kesitini kullanan trenlere ait hat geçişlerini ifade eder. (k makinesinde gerçekleştirilen operasyonlar kümesidir.)

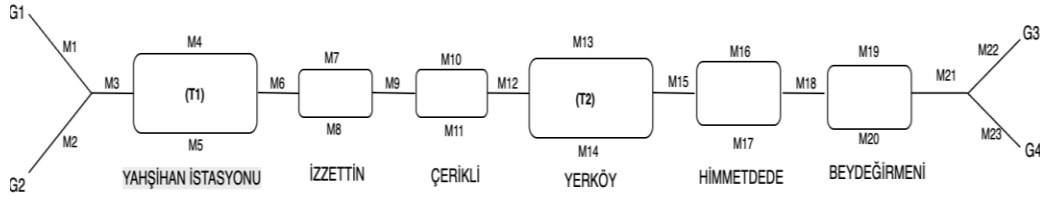
O^k : k kesitinden (M_k) geçen farklı trenlere ait kesit geçişleri(operasyonlar) kümesidir.

5.3. PMA Modeli

İstasyonların ve saydinglerin paralel hatlardan oluşması durumu, bu bölümlerin çizelgede paralel makineler olarak temsil edilmesi ile karmaşık atölye çizelgeleme mantığındaki yerini bulmuştur. Şekil 3 ve Şekil 4'de PMA modelinin uygulandığı hat topolojilerinin Karmaşık Atölye Çizelgeleme mantığı ile oluşturulan basitleştirilmiş görselleri sunulmuştur.



Şekil 3. Fevzipaşa-Toprakkale hattı PMA modeli temsili



Şekil 4. Irmak-Boğazköprü koridoru PMA modeli temsili

Parametreler:

p_{ij} : O_{ij} operasyonunun tamamlanması için gereken süreyi temsil eden parametredir. İlgili tren tipine ve hat kesitinin uzunluğuna ve diğer operasyon gereksinimlerine bağlı hesaplanmıştır.

r_i : J_i treninin(işinin) demiryoluna geliş zamanıdır.

d_i : J_i treninin planlanan çizelgede rotasını tamamlama zamanıdır.

O_{ijk} : J_i treninin j . hat geçişinin k . hat kesitinde olup olmadığının belirlendiği parametredir

Trenlere air rota bilgisi önceden belli ve sabit olduğundan modelin parametrelerindedir. 0 veya 1 değerini alır.

L : Yeterince büyük tanımlanmış bir üst sınır parametresidir.

Karar değişkenleri:

s_{ij} : O_{ij} operasyonunun başlangıç zamanını temsil eder.

C_i : J_i treninin güzergahını tamamlama zamanı değişkenidir.

$y_{ijj'k}$: Aynı makinesini kullanan iki operasyon arasındaki sıralamayı belirleyen ikili değişken öncelik değişkenidir.

$T_i : J_i$ treninin gecikmesini temsil eden değişkendir.

Amaç fonksiyonu: Toplam ağırlıklı gecikmeyi minimize etmek.

$$\min \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

Model Kısıtları:

Teknoloji kısıtları : Her trene ait operasyonların teknolojik sırasını sağlayan kısıttır. Bir trenin bir operasyonu tamamlanmadan teknolojik sıralamasında ardından gelen operasyon başlayamaz.

$$s_{ij} + p_{ij} \leq s_{i,j+1} \quad O_{ij} \in O^i \setminus \{O_{ini}\}, J_i \in J \quad (2)$$

Geliş zamanı kısıtları: Her tren için geliş zamanından önce ilk operasyonu başlayamaz.

$$r_i \leq s_{i1}, J_i \in J \quad (3)$$

Tamamlanma zamanı kısıtları: Her bir trenin güzergahını tamamlama zamanı, o trenin son hat kesitine girdiği ve son geçişini tamamladığı zamana eşittir.

$$s_{ini} + p_{ini} = C_i, \quad J_i \in J \quad (4)$$

Gecikme Kısıtları: Trenlerin gecikme kısıtları güzergah tamamlama zamanları ve önceden planlanmış varış zamanları üzerinden tanımlanmıştır.

$$T_i \geq C_i - d_i, \quad J_i \in J \quad (5)$$

$$T_i \geq 0, J_i \in J \quad (6)$$

Öncelik Değişkenleri Kısıtları: Öncelik değişkenleri aynı makineyi kullanan ve farklı trenlere ait iki operasyon arasındaki sıralama ilişkisini ifade eden ikili değişkenlerdir. Öncelik değişkenleri kısıtları ile aynı hat kesitini kullanan farklı trenlere ait iki operasyon için yalnızca bir sıralama ilişkisi geçerli olabilir. Bir hat kesitinin aynı anda yalnızca bir tren tarafından kullanılabilmesi mantığına dayanan bu kısıt ile aynı zamanda tren aralığı-güvenlik mesafesi koşulu da sağlanmış olur.

$$y_{ijj'k} + y_{i'j'jk} = 1, \quad O_{ij} \in OpMak, i < i', M_k \in M \quad (7)$$

Ardışıklık Kısıtları: Aynı kesitte gerçekleşen operasyonlar arasında, sonra gelen operasyonun başlangıç zamanı, önce gelen operasyonun başlangıç zamanı ile işlem süresinin toplamından daha küçük olamaz. Böylece ardışıklık kısıtı sağlanmış olur.

$$s_{i'j'} + L(1 - y_{ijj'k}) \geq s_{ij} + p_{ij}, \quad O_{i'j'} \in OpMak, i \neq i', M_k \in M \quad (8)$$

Bloklama kısıtları: Tren bir hat kesitinden çıkıp bir sonrakine geçemediğinde, önceki hat kesitini tutmaya devam etmesini ifade eder. Trenin meşgul ettiği hat kesitini boşaltması ve kendisinden sonra o hat kesitini kullanacak trenin operasyonunun başlama süresi, ancak o trenin bir sonraki operasyonunun başlamasıyla mümkün olabilir.

$$s_{i'j'} + L(1 - y_{ij'i'j'k}) \geq s_{ij+1}, \quad O_{i'j'} \in OpMak, i \neq i' \text{ ve } j \neq n_i, M_k \in M \quad (9)$$

Atama Değişkenleri Kısıtları: Atama değişkenlerinin 0 veya 1 olmasını sağlayan kısıtlardır.

$$y_{ij'i'j'k} \in \{0,1\}, \quad O_{ij}, O_{i'j'} \in O^k, i \neq i' M_k \in M \quad (10)$$

6. Deneysel tasarım

Her iki hat topolojisinde düşük talep (8 tren), orta talep (10 tren), Orta-yüksek talep (12 tren), yüksek talep (15 tren) içeren 4 adet senaryo ile testler uygulanmıştır. Test senaryolarında trenlerin tipleri ve güzergahları rastgele belirlenmiştir. Trenlerin geliş zamanları(r_i), 0 ile tüm trenlerin minimum toplam işlem sürelerinin iki katı arasında ve rastgele seçilmiş, ve varış zamanları(d_i) ise geliş zamanlarına toplam işlem sürelerinin 1,2 katı tolerans payı ilave edilerek bulunmuştur. Senaryolara ait testler IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 22.1.1 çözümleyicisi ile Apple M1 (8 çekirdek, 16 GB RAM) ve macOS Sonoma 14.5 işletim sistemi yüklü bir bilgisayar ile elde yapılmış, her senaryo 3600 sn'lik maksimum zaman diliminde koşturulmuştur.

6.1. Deney sonuçları

Tablo 3 ve Tablo 4'de seçilen iki koridor için üretilen 10 trenli birer örnek senaryonun çıktıları özetlenmiştir. Bu tablolardaki veriler modelin gecikme minimizasyonu ve bloklanma yüzdelerini gösterme performansını göstermektedir.

Problemin girdisi olan trenlerin tipi ile başlangıç ve bitiş noktaları, geliş ve varış zamanları(r_i ve d_i) her trenin PMA topolojisi üzerindeki makine dizisi, bu makinelere karşılık gelen işlem süreleri tabloların ilk 5 sütununda yer almaktadır. Her trenin gecikme süresini T_i ve toplam bloklanma süresi ise problemin çıktılarıdır ve 6. ve 7. sütunlarda yer almaktadır. Böylece Fevzipaşa-Toprakkale koridoru örneğinde gecikme değerleri genel olarak düşük düzeyde oluşmuştur. Sadece 4., 7. ve 10. trenlerde 10–15 dakikalık daha belirgin gecikmeler gözlenmektedir. Bloklanma süreleri ise 1–17 dakika aralığında seyretmekte, özellikle 6.,7. ve 10. trenlerde daha yüksek bloklanma görülmektedir. Bu yapı, Fevzipaşa–Toprakkale koridorunda hat uzunluğunun sınırlı ve makine sayısının görece az olmasına rağmen, karşılıklı tren akışlarının özellikle orta ve terminal istasyonlarda (M7–M11 civarı) yer yer ciddi bekleme yol açabildiğini göstermektedir.

Irmak–Boğazköprü koridoru için üretilen örnek senaryo tablosunda görüldüğü üzere bu kez rota dizileri Fevzipaşa–Toprakkale'ye kıyasla çok daha uzun olup, koridorun tamamında yer alan 23 makinenin önemli bir kısmını kapsamaktadır. İşlem süreleri sütununda özellikle M15 çevresinde (Yerköy İstasyonu) ve uzun tek hat kesitlerinde oldukça yüksek süreler görülmekte, bu da bloklayıcı ve gecikmenin yoğunlaştığı darboğaz bölgesini işaret etmektedir. Nitekim aynı tabloda 1., 3., 5. ve özellikle 6. trenin hem yüksek toplam bloklanma sürelerine (örneğin 3. tren için 82 dakika, 6. tren için 157 dakika) hem de anlamlı düzeyde gecikmelere ($T_1 \approx 123$, $T_3 \approx 53$, $T_5 \approx 30$, $T_6 = 136$) maruz kaldığı görülmektedir. Buna karşılık daha kısa rota izleyen ya da yalnızca koridorun bir bölümünü kullanan trenler (örneğin 2., 4., 8. ve 10. trenler) neredeyse sifıra yakın gecikme ile planlanabilmiştir.

Tablo 3. Fevzipaşa-Toprakkale koridorunda örnek senaryo

TNo	Tip	r_i	d_i	Operasyon Sırası	Seyir Süreleri(dk)	Gecikme(dk)) T_i	Blok (dk)
T1	Yvş	1	37	M10-M9-M8-M9-M11	8,6,2,6,8	0	5
T2	Hızlı	19	46	M10-M9-M7-M6-M5-M3-M2	3,3,6,5,1,1,3	1	6
T3	Yvş	20	56	M11-M9-M7-M9-M10	8,6,2,6,8	0	3
T4	Hızlı	28	57	M2-M3-M5-M6-M7-M6-M5-M3-M1	3,1,1,5,4,5,1,1,3	15	1
T5	Orta	18	62	M2-M3-M5-M6-M7-M9-M10	5,2,2,7,11,4,5	0	6
T6	Yvş	1	61	M1-M3-M5-M6-M7-M6-M5-M3-M2	8,3,3,10,2,10,3,3,8	5	15
T7	Yvş	33	93	M2-M3-M5-M6-M7-M6-M4-M3-M1	8,3,3,10,2,10,3,3,8	10	17
T8	Hızlı	10	37	M10-M9-M7-M6-M5-M3-M2	3,3,6,5,1,1,3	0	4
T9	Hızlı	35	62	M10-M9-M7-M6-M4-M3-M2	3,3,6,5,1,1,3	7	12
T10	Orta	35	65	M11-M9-M7-M9-M10	5,4,7,4,5	13	17

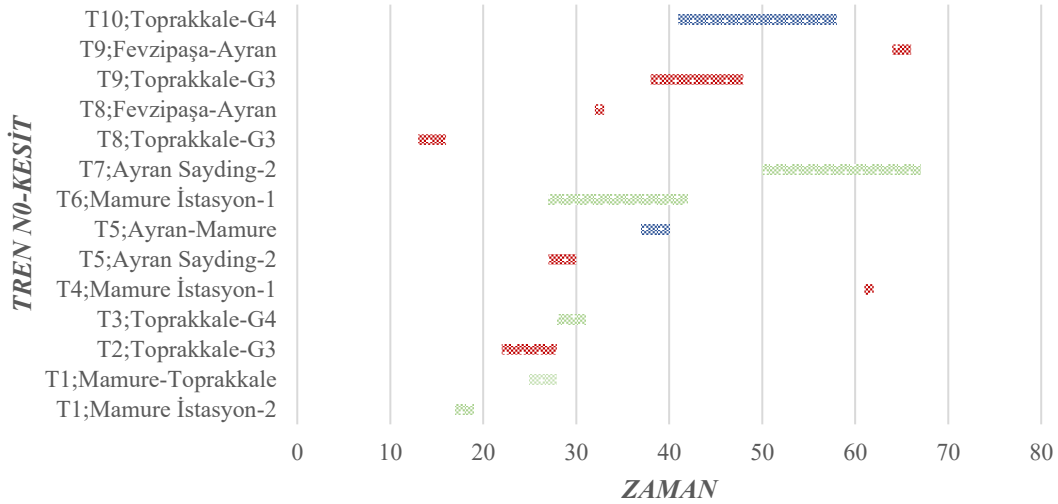
Tablo 4. Irmak-Boğazköprü koridorunda örnek senaryo

TNo	Tip	r_i	d_i	Operasyon Sırası	Seyir Süreleri (dk)	Gecikme(dk) T_i	Blok (dk)
T1	Yvş	8	180	M23-M21-M19-M18-M16-M15-M13-M12-M10-M9-M8-M6-M4-M3-M2	12,5,6,6,4,37,4,18,4,6,4,16,4,5,12	123	47
T2	Yvş	47	92	M1-M3-M5-M3-M2	12,5,3,5,12	0	2
T3	Yvş	1	173	M2-M3-M5-M6-M7-M9-M11-M12-M13-M15-M16-M18-M19-M21-M22	12,5,4,16,4,6,4,18,4,37,4,6,6,5,12	53	82
T4	Orta	49	85	M2-M3-M4-M3-M1	8,3,8,3,8	0	6
T5	Orta	57	191	M22-M21-M19-M18-M16-M15-M13-M12-M10-M9-M8-M6-M5-M3-M2	8,3,3,4,3,25,12,12,3,4,3,8,12,3,8	30	36,0
T6	Orta	52	172	M22-M21-M20-M18-M16-M15-M13-M15-M16-M18-M20-M21-M23	8,3,3,4,3,25,8,25,3,4,3,3,8	136	157
T7	Hızlı	56	143	M1-M3-M5-M6-M8-M9-M10-M12-M13-M15-M16-M18-M20-M21-M23	5,2,8,5,2,3,2,8,6,17,2,3,2,2,5	2	12
T8	Hızlı	49	129	M23-M21-M20-M18-M17-M15-M13-M15-M17-M18-M20-M21-M22	5,2,2,3,2,17,4,17,2,3,2,2,5	0	14
T9	Hızlı	21	108	M1-M3-M4-M6-M7-M9-M10-M12-M14-M15-M16-M18-M20-M21-M22	5,2,8,5,2,3,2,8,6,17,2,3,2,2,5	3	18
T10	Hızlı	7	87	M23-M21-M19-M18-M16-M15-M13-M15-M16-M18-M19-M21-M22	5,2,2,3,2,17,4,17,2,3,2,2,5	0	14

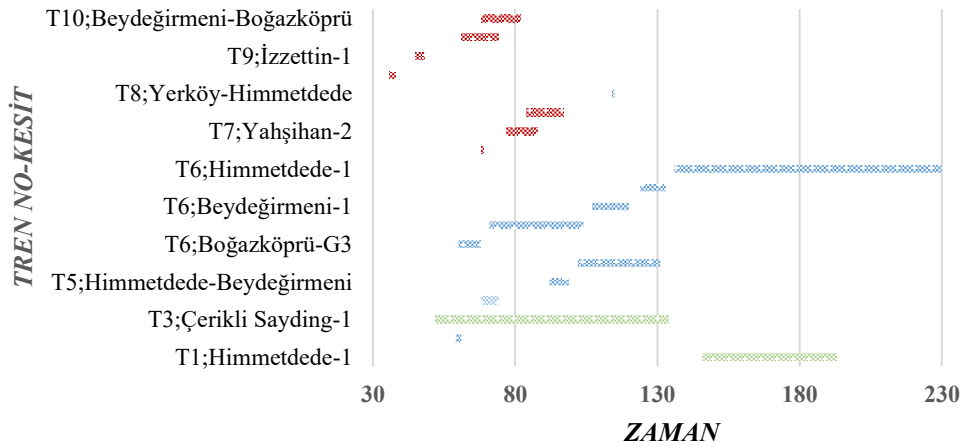
Şekil 5 ve Şekil 6’da, Tablo 3 ve Tablo 4’de bilgileri verilen senaryolara ait bloklanma süreleri grafiksel gösterimle sunulmuştur. Bloklanma grafiği, tablolarındaki sayısal değerleri zamansal ve uzamsal olarak doğrulamaktadır. Bloklanma grafiklerinde tren tipleri renklerle gösterilmiştir. Hızlı trenlerin bloklanma süreleri kırmızı, orta hızlı trenlerin bloklanma süreleri mavi, yavaş trenlerin bloklanma süreleri ise yeşil ile renklendirilmiştir. Her renkli blok, ilgili trenin belirli bir makine kesitinde ne kadar süre beklediğini göstermektedir.

Grafikler incelendiğinde bu bloklanmaların hat üzerindeki belirli dar kesitlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle hızlı trenlerin koridoru geçtiği zaman aralıklarında, genellikle kısa süreli ama kritik noktalarda bloklanmalar oluşmakta ve bu bloklanmaların çoğu trenin kendi gecikme değerine yansımadağ hâlde, sonraki trenlerin bekleme süresini etkilediği ve bloklanmalarına neden olduğu görülmektedir.

Orta hızlı trenlerin bloklanması sıklıkla hızlı trenlere ait bloklanmaların hemen ardından gelmiştir. Orta hızlı trenler koridor boyunca ne hızlı tren kadar kesintisiz ilerleyebilmekte, ne de yavaş trenler kadar geride kalmaktadır. Bu nedenle tıkanma noktalarında en fazla etkileşime maruz kalan tren tipi oldukları görülmektedir.



Şekil 5. Fevzipaşa-Toprakkale senaryo örneği bloklanma süreleri



Şekil 6. Irmak-Boğazköprü senaryo örneği bloklanma süreleri

Farklı tren sayıları ve tren tipi bileşimleri altında PMA modelinin ürettiği test sonuçları Fevzipaşa–Toprakkale koridoru için Tablo 5’te, Irmak-Boğazköprü koridoru için Tablo 6’da gösterilmiştir. Test senaryolarında trenlerin tipleri ve güzergahları rastgele belirlenmiştir. Trenlerin geliş zamanları(r_i), 0 ile tüm trenlerin minimum toplam işlem sürelerinin iki katı arasında ve rastgele seçilmiş, ve varış zamanları(d_i) ise geliş zamanlarına(r_i) toplam işlem sürelerinin 1,2 katı tolerans payı ilave edilerek bulunmuştur. Bu tolerans payının seçilmesindeki amaç model testinde yeterli tren sıklığı sağlayarak darboğaz alanlar oluşturmaktır.

Her senaryoda kısıt sayısı, değişken sayısı, toplam bloklanma süresi, bloklanma yüzdesi, toplam gecikme değeri, çözümün sonlandırma durumu ve çözüm süresi ayrı ayrı raporlanmaktadır. Tren sayısı arttıkça kısıt ve değişken sayılarının, toplam bloklanma süresinin, bloklanma yüzdesinin ve toplam gecikme değerinin düzenli şekilde yükseldiğini göstermektedir.

Tablolardaki ortalama değerler, tren sayılarına göre belirlenen senaryolarda ortaya çıkan sonuçların ortalamasıdır. Örneğin 8 trenli üç adet senaryonun sütun başlıklarına ait ortalamaları verilmiştir.

Tablo 5. Fevzipaşa-Toprakkale koridoru test sonuçları (tolerans faktörü=1,2 ; hat kesit sayısı=11)

No	T.S	Tip S.	Kst.S	Değ.S	Blok(dk)	Blok (%)	Topl.Gecikme (dk) $\sum T_i$	MIP Gap (%)	Ç.S (sn)
1	8	Orta : 3 Yvş: 1 Hızlı: 4	470	209	29	12,7	4	0,0	0,07
2	8	Orta: 2 Yvş: 3 Hızlı:3	587	252	52	19	40	0,0	0,08
3	8	Orta: 3 Yvş: 1 Hızlı: 4	446	197	39	18,7	29	0,0	0,12
Ortalama			501	219	40	16,8	24,3	0,0	0,09
4	10	Orta: 2 Yvş: 4 Eks: 4	813	338	86	0,0	51	0,0	1
5	10	Orta: 4 Yvş: 3 Hızlı: 3	924	380	105	31	114	0,0	11,9
6	10	Orta: 4 Yvş: 3 Hızlı: 3	808	340	51	15,3	91	0,0	2,7
Ortalama			848	353	80,7	24,6	85,3	0,0	5,2
7	12	Orta: 3 Yvş: 6 Hızlı: 3	997	413	106	26	115	0,0	46,8
8	12	Orta: 5 Yvş:1 Hızlı: 4	840	349	103	32,8	67	0,0	2,07
9	12	Orta: 3 Yvş: 8 Hızlı: 1	1.067	439	158	35	180	0,0	499,8
Ortalama			986	408	109,6	28,3	129	0,0	135,4
10	15	Orta: 3 Yvş: 4 Hızlı: 8	1.646	658	132	29,9	188	25,0	3.624,8
11	15	Orta: 7 Yvş: 5 Hızlı: 3	1.588	636	210	41,7	329	55,0	3.622,5

No	T.S	Tip S.	Kst.S	Değ.S	Blok(dk)	Blok (%)	Topl.Gecikme (dk) \sum Ti	MIP Gap (%)	Ç.S (sn)
12	15	Orta: 5 Yvş: 5 Hızlı: 5	1.571	627	125	26	276	39,9	3.621
13	15	Orta: 3 Yvş: 7 Hızlı: 5	1.632	650	227	46,1	252	31,1	3.621
14	15	Orta: 5 Yvş: 6 Hızlı: 4	1.725	683	275	53,5	335	45,0	3.623
Ortalama			1.632	651	193,8	39,4	276	-	3.622,4

Tablo 6. Irmak-Boğazköprü koridoru test sonuçları(tolerans faktörü=1,2 ; hat kesiti sayısı=23)

No	T.S	Tip S.	Kst. S	Değ. S	Blok(dk)	Blok (%)	Topl. Gecikme (dk) \sum Ti	MIP Gap (%)	Ç. S (sn)
1	8	Orta: 2 Yvş: 3 Hızlı: 3	868	376	288	35,9	245	0,0	0,42
2	8	Orta: 2 Yvş: 4 Hızlı: 2	599	274	143	23,1	26	0,0	0,04
3	8	Orta: 2 Yvş: 4 Hızlı: 2	693	310	233	32,6	143	0,0	0,06
Ortalama			720	320	221,3	30,5	138	0,0	0,17
4	10	Orta: 3 Yvş: 3 Hızlı: 4	1.244	518	388	0,0	0,08	0,0	4,3
5	10	Orta: 1 Yvş: 6 Hızlı: 3	1.200	505	536	0,0	0,12	0,0	3,5
6	10	Orta: 6 Yvş: 3 Hızlı: 1	1.191	503	514	53	380	0,0	3,3
Ortalama			1.212	509	479,3	17,6	126,7	0,0	3,7
7	12	Orta: 3 Yvş: 6 Hızlı:3	2.041	819	778	0,0	0,08	0,0	110,6
8	12	Orta: 5 Yvş: 4 Hızlı: 3	1.576	651	408	0,0	0,12	0,0	435,4
9	12	Orta: 4 Yvş: 3 Hızlı: 5	2.498	977	761	63,2	654	0,0	480,5
Ortalama			2.038	816	649,	21,1	218,1	0,0	342,2
10	15	Orta: 7 Yvş: 6 Hızlı: 2	3.291	1.279	1.717	0,0	0,08	49,9	3.624
11	15	Orta: 5 Yvş: 6 Hızlı: 4	2.306	917	678	0,0	0,12	Optimal	1.016,9
12	15	Orta: 3 Yavaş: 3 Hızlı: 9	2.313	922	442	39,6	447	Optimal	1.870,2

No	T.S	Tip S.	Kst. S	Değ. S	Blok(dk)	Blok (%)	Topl. Gecikme (dk) $\sum T_i$	MIP Gap (%)	Ç. S (sn)
13	15	Orta: 3 Yvş: 4 Hızlı: 8	2.973	1162	1.004	76,2	1.323	34,9	3.622,1
14	15	Orta: 9 Yvş: 3 Hızlı: 3	2.416	960	562,3	45,2	881	26,7	3.622,2
Ortalama			2.567	1.015	669,4	53,7	883,7	-	3.038,2

İki tabloda da tren sayısı arttıkça kısıt sayısı, değişken sayısı, toplam bloklanma süresi, bloklanma yüzdesi ve toplam gecikme değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Ancak iki koridor arasında bu artışların büyüklüğü farklıdır.

Toplam bloklanma süreleri, Irmak–Boğazköprü koridorunda her tren sayısı grubunda Fevzipaşa–Toprakkale koridoruna kıyasla daha yüksek seviyelerdedir. Örneğin 8 trenli senaryolarda Fevzipaşa–Toprakkale’de ortalama 40 saniye iken Irmak–Boğazköprü’de bu değer 221,3 saniyedir. Benzer biçimde 10, 12 ve 15 trenli senaryolarda da Irmak–Boğazköprü koridorundaki ortalama bloklanma değerlerinin daha yüksek olduğu tablolarda görülmektedir.

Bloklanma yüzdeleri de iki koridor arasında belirgin fark göstermektedir. Fevzipaşa–Toprakkale’de ortalama bloklanma yüzdeleri tren sayısı gruplarına göre yaklaşık %24–%39 aralığında değişirken, Irmak–Boğazköprü’de aynı gruplar için yaklaşık %30–%53 aralığında seyretmektedir.

Toplam gecikme değerleri incelendiğinde, Irmak–Boğazköprü koridorunda tüm tren sayısı gruplarında Fevzipaşa–Toprakkale’ye kıyasla daha yüksek gecikme toplamalarının olduğu tablo üzerinden görülmektedir. Özellikle tren sayısı arttıkça iki koridor arasındaki gecikme farkı belirginleşmektedir.

Kısıt ve değişken sayıları, Irmak–Boğazköprü koridorunda sistematik olarak Fevzipaşa–Toprakkale’den daha büyük değerler almış olup bu fark tabloda tüm senaryo gruplarında görülmektedir.

Çözüm süreleri açısından bakıldığında, Fevzipaşa–Toprakkale koridorunda 8 ve 10 trenli örneklerde sürelerin oldukça düşük olduğu, 12 trenli senaryolarda yükseldiği ve 15 trenli senaryolarda ise 3600 sn koşturulma süresi sonucunda yüksek gap düzeylerinde durduğu, optimal çözümler elde edilmediği gözlenmektedir. Irmak–Boğazköprü koridorunda ise çözüm süreleri özellikle 12 ve 15 trenli örneklerde Fevzipaşa–Toprakkale’ye kıyasla daha yüksektir. Fakat 15 trenli senaryolarda optimum çözümlere de ulaşılmakla birlikte çok yüksek gap düzeyi ile sonuçlanan senaryolar da bulunmaktadır. Irmak-Boğazköprü koridoru 15 trenli senaryolarda heterojen sonuçlar üretmiştir. Bu sonuç hat topolojisinin karmaşıklığı dışında senaryo farklılıklarının çözüm sonuçlarındaki etkisini göstermiştir.. Irmak–Boğazköprü koridorunda ise çözüm süreleri özellikle 12 ve 15 trenli örneklerde yüzlerce saniyeye ulaştığı için Fevzipaşa–Toprakkale’ye kıyasla daha yüksektir.

7. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, tek hatlı ve çift yönlü iki demiryolu koridorunda tren çizelgeleme problemi karmaşık atölye çizelgeleme yaklaşımıyla modellenmiş ve Lange ve Werner [1] in karma tam sayılı PMA formülasyonu Türkiye demiryolu ağına uyarlanmıştır. Hat kesitleri makineler, trenler işler; istasyon ve saydingerlerdeki paralel hatlar ise paralel makineler olarak tanımlanmış; bloklama

kısıtları öncelik değişkenleri aracılığıyla modele entegre edilmiştir. İşlem süreleri, TCDD 2025 Şebeke Bildirimindeki [14] hat geometrisi ve hız limitlerine dayanan iki aşamalı bir yöntemle türetilmiş ve her iki koridor için ayrıntılı işlem süresi tabloları oluşturulmuştur.

Karşılaştırmalı analiz, aynı PMA modelinin farklı topolojik özelliklere sahip hatlarda oldukça farklı performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Kısa ve daha dengeli istasyon aralıklarına sahip Fevzipaşa–Toprakkale koridorunda PMA modeli hem çözüm kalitesi hem de çözüm süresi bakımından tatmin edici iken; uzun ve dengesiz istasyon aralıklarına sahip Irmak–Boğazköprü koridorunda bloklama etkisi ve hesaplama süresi belirgin biçimde ağırlaşmaktadır. Bu bulgu, tek hatlı koridorlarda kapasite artırımı ve çizelgeleme politikalarının değerlendirilmesinde gerçek topolojiye dayalı Karma Tam Sayılı Programlama modellerinin önemli bir tanı aracı olarak kullanılabilmesini göstermektedir.

Gelecek çalışmalar kapsamında;

- Farklı amaç fonksiyonlarının (toplam gecikme yerine maksimum gecikme, ağırlıklı gecikme vb.),
- Alternatif öncelik kuralları veya sezgisel başlangıç çözümlerinin,
- Farklı paralel hat modelleme yaklaşımlarının Türkiye’ye özgü koridorlar üzerinde sistematik biçimde karşılaştırılması,
- Modelin yolcu talebi, bağlantılı çizelgeler veya bozulma senaryoları ile zenginleştirilmesi

planlanabilir.

Böylece hem TCDD’nin hat kapasitesi yönetimine yönelik karar destek analizleri güçlendirilebilir hem de bloklama kısıtlı tren çizelgeleme literatürüne Türkiye merkezli yeni örnekler kazandırılabilir

Kaynakça

- [1] J. Lange ve F. Werner, "Approaches to modeling train scheduling problems as job-shop problems with blocking constraints," *Journal of Scheduling*, cilt 21, no. 2, pp. 191-207, 2018.
- [2] TCDD, «2024 Sektör Raporu,» 2025.
- [3] M. Carey ve D. Lockwood, "A model, algorithms and strategy for train pathing. *Journal of the Operational Research Society*," cilt 46, pp. 988-1005, 1995.
- [4] M. Dorfman ve J. Medanic, "Scheduling trains on a railway network using a discrete event model of railway traffic," cilt 38, no. 1, pp. 81-98, 2004.
- [5] A. Higgins, E. Kozan ve L. Ferreira, "Optimal scheduling of trains on a single line track," *Transportation Research Part B: Methodological*, cilt 30, no. 2, pp. 147-161, 1996.
- [6] B. Szpigiel, "Optimal train scheduling on a single track railway," *Operations Research*, cilt 72, Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1973, pp. 343-352.
- [7] E. Oliveira ve B. M. Smith, "A job-shop scheduling model for the single-track railway scheduling problem.," Leeds, 2000.
- [8] AA. D’Ariano, Pacciarelli D. ve M. Pranzo (2007) "A branch and bound algorithm for scheduling tr. trains in a railway network.," *European Journal of Operational Research*, cilt 183, no. 2, pp. 643-667.
- [9] O. Gholami, Y. N. Sotskov ve F. Werner, "Fast edge-orientation heuristics for job-shop scheduling problems with applications to train scheduling.," *International Journal of Operational Research*, cilt 2, pp. 19-32.
- [10] S. Q. Liu ve E. Kozan, "Scheduling trains as a blocking parallel machine job shop scheduling problem.," *Computers and Operations Research*, cilt 36, no. 10, pp. 2840-2852, 2009.
- [11] A. Mascis ve D. Pacciarelli, "Job-shop scheduling with blocking and no-wait constraints," *European Journal of Operational Research*, cilt 143, no. 3, pp. 498-517, 2002.
- [12] Y. Akdemir, "Demiryolu tren çizelgeleme probleminin simülasyon–optimizasyon yaklaşımı ile incelenmesi," M.Sc. thesis, Dept. Ind. Eng., Dokuz Eylül Univ., İzmir, Turkey, 2023.

- [13] Ö. Yalçinkaya, “A feasible timetable generator simulation modelling framework and simulation integrated genetic and hybrid genetic algorithms for train scheduling problem,” Ph.D. dissertation, Dept. Ind. Eng., Gazi Univ., Ankara, Turkey, 2010.
- [14] Y. Akdemir, “Demiryolu tren çizelgeleme probleminin simülasyon–optimizasyon yaklaşımı ile incelenmesi,” M.Sc. thesis, Dept. Ind. Eng., Dokuz Eylül Univ., İzmir, Turkey, 2023.
- [15] G. Aydın, “Tek hatlı ve çift yönlü demiryolu hatlarında trenlerin yeniden çizelgenmesi için karma tam sayılı programlama yaklaşımı,” Ph.D. dissertation, Dept. Civ. Eng., Yıldız Tech. Univ., İstanbul, Turkey, 2015.
- [16] R. M. Lusby, J. Larsen, M. Ehrgott, and D. Ryan, “Railway track allocation: Models and methods,” *OR Spectrum*, vol. 33, no. 4, pp. 843–883, 2011.
- [17] V. Cacchiani and P. Toth, “Nominal and robust train timetabling problems,” *European Journal of Operational Research*, vol. 219, no. 3, pp. 727–737, 2012.

Özgeçmiş



Selma SAKA SEZER

Lise eğitimini Bozüyük Mustafa Şeker Anadolu Lisesi’nde, Lisans eğitimini Çankaya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde tamamladı. Yüksek Lisans eğitimine Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği’nde devam etmektedir. 2010 yılından beri TCDD Taşımacılık A.Ş Genel Müdürlüğü’nde çalışmaktadır.

E-Posta: sakasezerselma@gmail.com



Ertan GÜNER

1987 yılında Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 1986 ve 1994 yıllarında Gazi Üniversitesi’nden Endüstri Mühendisliği alanında yüksek lisans ve doktora derecelerini aldı. 2000 yılında Doçent unvanını, 2007 yılında Profesör unvanını alan Güner, halen Gazi Üniversitesi’nde eğitim vermeye devam etmektedir. Araştırma alanları arasında Üretim Planlaması ve Stok Kontrol, Çizelgeleme, Üretim Sistemleri yer almaktadır.

E-Posta: erguner@gazi.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Selma SAKA SEZER: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Selma SAKA SEZER: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Selma SAKA SEZER: Görselleştirme, İnceleme. Ertan GÜNER: Kontrol. Selma SAKA SEZER: Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.