

YÜK TRENİ İSTASYONLARINDA HAREKET PLANLAMASI

*Işıl ALEV, Bahar ÇAVDAR, Bilge ÇELİK, Volkan DEMİREL, Ayşegül GÜLLER,
Canan SEPİL*, Yasemin SERİN*

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06531 Ankara,

**sepil@ie.metu.edu.tr*

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye’de yük ve yolcu taşımacılığı işlevlerini yerine getiren Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarının (TCDD) yeniden yapılandırılması çerçevesinde, vagonların manevra alanlarındaki hareketlerinin planlanmasına destek olacak, bir sistem geliştirilmiştir. Öncelikle manevra alanlarının yapısı göz önüne alınarak vagonların bu alanda manevra sayısını enazlayacak şekilde konumlandırılması problemi matematiksel bir model ile temsil edilmiştir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise literatürdeki sezgisel yöntemler uyarlanmıştır. Rassal olarak ortaya çıkabilecek tren gecikmeleri ile yükleme/boşaltma ve bakım/onarım operasyon süreleri gibi öğelerin etkisini gözlemleyebilmek için manevra alanlarının çalışma prensiplerini yansıtan bir benzetim modeli oluşturulmuş ve benzetim modelinin de sezgisel yöntemlerin seçiminde bir karar destek mekanizması olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yük taşımacılığı, demir yolu taşımacılığı, manevra alanı planlaması, sınıflandırma

RAILYARD OPERATIONS PLANNING

ABSTRACT

In this study, within the framework of restructuring of Turkish State Railways, TCDD, which fulfills Turkey’s freight and passenger transportation functions, a support system that will enable effective planning of maneuver movements in rail yards is designed. First, given the structure of rail yards, a mathematical model, that determines the placement of cars in rail yards so as to minimize the number of maneuver movements, is developed. For solving large sized problems, heuristic procedures, adapted from the literature, are implemented. The heuristic procedures are also tested using a simulation model that considers the stochasticity in the environment stemming from delays in train schedules and uncertainties in loading/unloading and maintenance operation durations. It is suggested that the simulation model can also be used as a decision support tool while deciding on the procedure to be implemented in each rail yard.

Keywords: Freight transportation, railroad transportation, railyard planning, classification

* İletişim yazarı

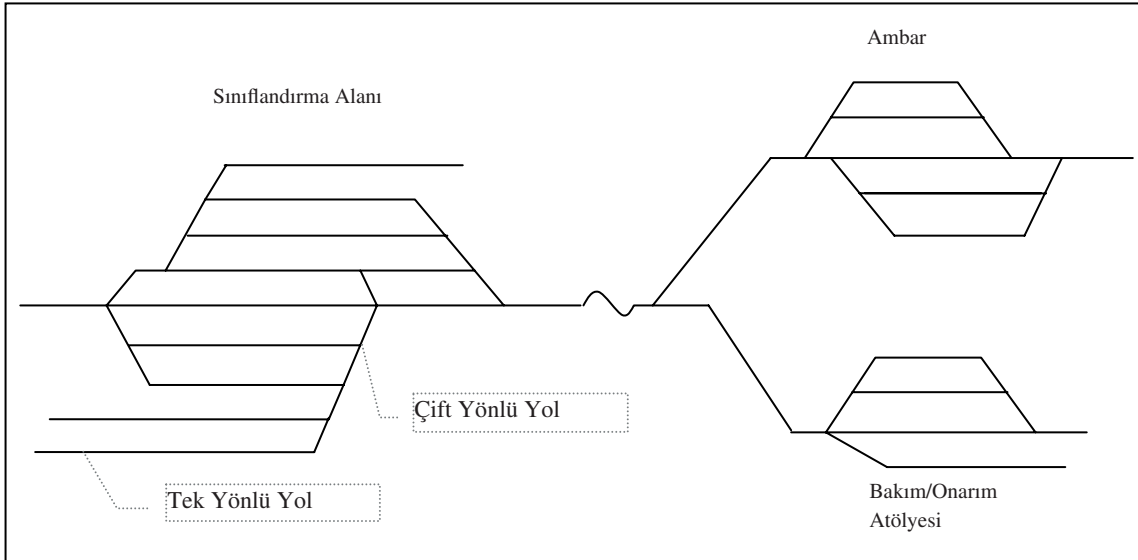
Bilkent Üniversitesi tarafından düzenlenen 29. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi Öğrenci Bildirileri Yarışması’nda birincilik ödülü kazanan çalışmanın ilgili öğretim üyelerinin katkılarıyla düzenlenmiş halini EM Dergisi yayın politikası doğrultusunda yayımlıyoruz.

1. PROBLEM TANIMI VE MEVCUT DURUM

Geçmiş 1856 yılına dayanan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarında (TCDD) demir yolu taşımacılığının, gerek yolcu gerekse yük taşımacılığında, etkililiği ve verimliliğini arttırmasını sağlamak amacıyla yeniden yapılandırma sürecine girilmiş, bu süreç içerisinde TCDD-Havelsan işbirliğinde Kurumsal Yönetim Bilgi Sistemi (KYBS) Projesi geliştirilmiştir. KYBS projesinin alt projelerinden biri olan Kurumsal Kaynak Planlaması (KKP) projesinde ise yük taşımacılığı çizelgeleme probleminin ele alındığı yazılımlar geliştirilmiştir. Çizelgeleme probleminde trenlerin rota ve zaman çizelgeleri, taşınacak yük talepleri göz önüne alınarak hangi yükün hangi vagona, nereden nereye, ne zaman, hangi rotada ve hangi istasyonlarda (*manevra alanlarında*) bekleyerek ulaştırılacağı belirlenerek oluşturulmaktadır (Ahuja vd., 2005). Tren çizelgeleri belirlendikten sonra ise vagonların trendeki sıralamaları belirlenmektedir. Sıralamalar vagonların ağırlıkları, güvenlik kaynaklı özel durumlar ve lokomotifin gücü gibi fiziksel kısıtlara bağlı olarak belirlenir. Yolcu taşımacılığında trenlerdeki vagon sıralamaları trenin kalktığı istasyondan varış istasyonuna kadar değişikliğe uğramazken yük taşımacılığında trenlerdeki vagonların sayıları ve sıralamaları uğradıkları manevra alanlarında

değişmektedir. Manevra alanlarında vagonlar yükleme/boşaltma operasyonları için ambara; periyodik/periyodik olmayan bakım için bakım/onarım atölyesine yönlendirilmekte; ya da başka bir tren tarafından götürülünceye kadar manevra alanında bekletilmektedir. Tüm bu işlemler vagonların manevra alanı içerisinde hareket ettirilmesini gerektirmektedir. Bu çalışmada yük taşımacılığında manevra alanlarındaki vagon hareketlerinin planlanması ele alınmış ve modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin girdileri hiyerarşik olarak bir üst seviyede çözülmüş olan çizelgeleme probleminin çıktılarıdır.

Manevra alanları içerdikleri tren yollarının yapısına ve bu alanlarda yapılan işlemlere göre sınıflandırılabilir. Tren yollarına göre manevra alanı tek yönlü veya çift yönlü olabilir (Petersen, 1977). Tek yönlü manevra alanlarında yola giriş ve çıkış tek yönden yapılabilirken, çift yönlü olanlarda yolun her iki tarafından giriş ve çıkış yapılabilir. Manevra alanları tek ve çift yönlü ulaşımın mümkün olduğu yolları aynı anda kapsayabilir. Manevra alanları sadece vagon hareketlerinin yapıldığı sınıflandırma alanlarından oluşabileceği gibi yükleme ve boşaltma işlemlerinin yapıldığı ambar, bakım/onarım işlemlerinin yapıldığı bakım/onarım atölyesini de içerebilir. Ambar ve



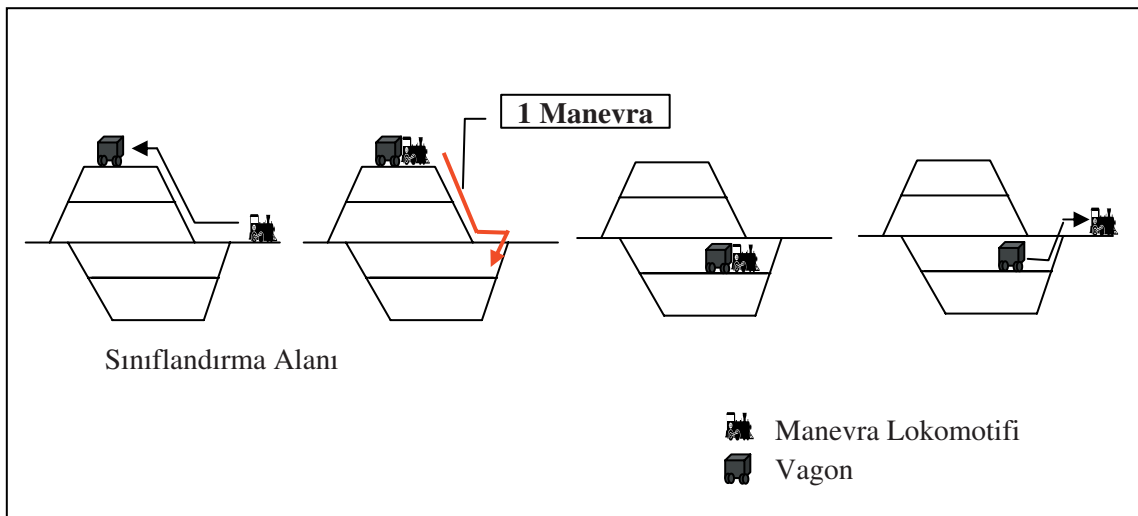
Şekil 1. Manevra Alanı

bakım/onarım atölyesinin kendi yolları bulunabilir. Şekil 1’de sınıflandırma alanı, ambar ve bakım/onarım atölyesi bulunan bir manevra alanı görülmektedir. Bu manevra alanında her bir birimin birbirinden bağımsız yolları bulunmakta ve yollar farklı uzunluklarda ve farklı şekillerde birbirlerine bağlanmaktadır. Bir vagonun sınıflandırma alanında bulunduğu yol ve o yolda bulunduğu nokta o vagonun *konumunu* verir. Bu çalışmada alandaki yollar vagonların sığabileceği eşit büyüklükteki parçalara bölünmüş ve her bir parça bir *pozisyon* olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla bir vagonun konumu o vagonun bulunduğu yol ve o yoldaki pozisyonu olarak tanımlanır (Örn. 3. Yol 5. Pozisyon). Çalışmamızda vagon büyüklükleri arasındaki farktan kaynaklanacak sapmalar ihmal edilmiştir.

Manevra alanlarında yapılan işlemler, gelen trenlerdeki vagonların sınıflandırma için yollara dağıtılması; yükleme veya boşaltma için ambar, periyodik/periodyk olmayan bakım için bakım/onarım atölyesine yönlendirilmesi; vagonların bu alanlardan sınıflandırma alanına geri getirilmesi ve gidecek trenin oluşturulması -tren teşkili- şeklinde sıralanabilir. Manevra alanlarında tüm bu işlemler vagonların bir manevra lokomotifi tarafından taşınması ile gerçekleşir.

Manevra lokomotifinin bir vagon ya da vagon grubunu aldığı andan bıraktığı ana kadar yapılan hareketin tamamı bir *manevrayı* oluşturur (Bkz. Şekil 2). Bir manevranın yapılmasını engelleyen ve manevra yapılabilmesi için çekilmesi gereken vagon(lar) var ise, çekilme işlemleri için ek manevralara ihtiyaç duyulmaktadır.

Manevra alanı içerisinde bulunan ambar ve atölye genellikle ayrı yollara ve ayrı lokomotiflere sahiptirler, dolayısıyla bu merkezler vagon konumlandırması açısından sınıflandırma alanından bağımsız olarak görülebilir. Ancak alana gelen bir trende bulunan ve ambar ve bakım/onarıma gidecek vagonların bu merkezlere gidişleri ve dönüşleri sınıflandırma alanındaki konumlandırmaları etkilemektedir. Sınıflandırma alanı-ambar ve sınıflandırma alanı-atölye arasındaki trafiği gösterebilmek için *sanal trenler* tanımlanmıştır. Ambar ve atölyeye gidecek vagon topluluklarına *sanal giden tren*, buralardan gelen vagon topluluklarına ise *sanal gelen tren* adı verilmiştir. Kullandığımız diğer bir tanım ise *dizi* tanımıdır. Manevra alanı içerisinde girişlerinden çıkışlarına kadar birbirinden hiç ayrılmayan vagon toplulukları *dizi* olarak tanımlanmıştır. Bir diziye ait vagonların geldikleri ve gidecekleri trenler ve bu trenlerdeki sıraları ardışık olacak şekildedir. Bu



Şekil 2. Manevra Hareketi

vagonların birbirlerinden ayrı hareket ettirilmesi fazladan manevraya yol açacağından bu vagonlar manevra alanında bulunduğu sürece birlikte hareket ettirilmeye çalışılır. Çalışmada, geliştirilen modellerde dizi kavramının kullanılmasını sağlamak amacıyla, öncelikle çizelgeleme probleminin çıktılarını kullanan bir dizi oluşturma modülü geliştirilmiştir.

Vagonların sınıflandırma alanlarındaki konumlarına bağlı olarak her bir zaman diliminde yapılacak manevra sayısı belirlenebilir. Bu çalışmanın odaklandığı problem, sınıflandırma alanlarında her bir zaman diliminde hangi vagonların hangi konumlara yerleştirileceğine karar verilmesi problemidir. Manevralara gerek duyulan zaman dilimleri, manevra alanına yeni bir trenin gelme zamanı, sanal trenlerin ambar ve bakım/onarım alanına gidiş/geliş zamanları ve tren teşkil zamanları olarak tanımlanmaktadır. Karar verme probleminde gelen trendeki vagonlar konumlara öyle atanmalıdır ki, vagonlar bir sonraki işlemleri için konumlarından kolaylıkla çekilebilmeli, diğer vagonların hareketlerini zorlaştırmamalıdır.

Mevcut durumda trenlerin çizelgeleri belirli olduğu halde, tren teşkil aşamasında hangi yüklerin, hangi vagonlarla ve hangi sırada taşınacağı kararları, her bir manevra alanında o alanın yöneticisi tarafından alınmaktadır. Trene ait detaylı bilgilerin kesin olarak ancak tren geldiğinde alınabildiği mevcut durumda vagonların sınıflandırma alanında konumlandırılması manevra görevlisinin miyopik olarak verdiği kararlar ile yürütülmektedir. Bunun sonucu olarak verilen kararlar alanda bir sonraki adımda meydana gelecek değişiklikleri göz önüne alma kabiliyetinden yoksundur. Mevcut sistemin zayıflıkları olan manevra alanlarında konumlandırmaların belirli bir sisteme dayanmaması, buna bağlı olarak maliyet ve performans ölçümlerinin yapılamaması, vagonların takip edilememesi ve sistemin uygulayıcı becerisine bağlılığı, problemin ortaya çıkışındaki başlıca nedenlerdir. Çalışmada bu doğrultuda vagon hareketlerinin izlenebilir, uygulanabilir, uygulayıcı performansından bağımsız ve en az manevra ile olacak şekilde planlanması amaçlanmıştır.

KKP projesi kapsamındaki çizelgeleme probleminin çözümü ile birlikte trenlerin özellikleri her günün başında belirli olacaktır. Tren tarifelerinin birbirini tekrarlama ise haftalık periyotlarda oluşmaktadır. Bazı hatlardaki trenler her gün çalışmakta bazı hatlarda ise daha seyrek seferler bulunmaktadır. Geliştirilecek modellerin bir haftalık ufka sahip olması, her gün yeni bilgiler eşliğinde yeniden çözülmesi ve yuvarlanan ufuk esasına göre ele alınması önerilmektedir. Çözüm yöntemlerinin ayrıık olaylar için (Örn. Tren gelişi, Tren teşkili) uygulanması önerilmemektedir, çünkü bu tür bir yaklaşım birbiri ile sıkı ilişkileri olan sistem parçalarını bağımsız olarak ele alacak ve sistemin en iyilenmesine engel olacaktır. Performans ölçüleri haftalık toplam manevra sayısı ve kullanılan yol sayısı olarak belirlenmiştir. İstasyonda her bir manevra yakıt, lokomotif ve zaman gibi kaynakları kullandığı için etkililik manevra sayısını en azlanması ile ölçülmüştür. Kullanılan yol sayısı performans ölçüsüne ise uygulanabilirliği ölçmek için başvurulmuştur.

Eğer manevra alanlarında sanal trenler de dâhil olmak üzere tren geliş ve gidiş zamanları önceden belirli ise ve gecikme söz konusu değilse problem gerekirci (deterministik) bir problem olarak tanımlanabilir. Geliştirilen matematiksel model problemin gerekirci olduğunu varsaymaktadır. Matematiksel modelin çözüm yöntemi olarak uygun olmayacağı büyük boyutlu problemlerde sezgisel yöntemlere başvurulmuştur. Sezgisel yöntemlerin farklı fiziksel yapısı ve trafiği olan istasyonlarda da uygulanabilir olmalarını sağlamak amacı ile bu yöntemlerin varsayımlarını gevşetmek için uyarlamalar yapılmıştır. Rassal olarak ortaya çıkabilecek sanal trenler de dahil olmak üzere tren gecikmelerinin etkisini gözlemleyebilmek için manevra alanlarının çalışma prensiplerini yansıtan bir benzetim modeli oluşturulmuştur.

Makalenin ikinci bölümünde problem için geliştirilen matematiksel model, üçüncü bölümünde uyarlanan sezgisel yöntemler yer almaktadır. Dördüncü bölümde geliştirilen benzetim modeli anlatılmaktadır. Beşinci bölümde uygulama planı açıklandıktan sonra altıncı bölümde sonuç ve beklentilere yer verilmiştir.

2. MATEMATİKSEL MODEL

Bir manevra alanında, belirlenen başarı ölçüleri dahilinde en iyi manevra hareket planını oluşturmak için ilk aşamada matematiksel bir model geliştirilmiştir. Her bir zaman diliminde vagonların sınıflandırma alanındaki konumlarını belirlemek için geliştirilen model, doğrusallaştırılmış bir karışık tamsayı programlama modelidir. Geliştirilen model bir atama problemi olması anlamında yolcu taşımacılığında manevra hareket planı oluşturma modellerine benzemektedir (Bkz. Winter ve Zimmermann, 2000, Lentink vd., 2003). Ancak yük taşımacılığındaki özellikleri göz önüne alması bakımından çok daha detaylı ve özgün bir modeldir. Model, çözümünü kolaylaştırmak için geliştirilmiş yaklaşımlarla aşağıda açıklanmıştır.

Varsayımlar

- Trenlerin alana geliş ve alandan gidiş zamanları önceden belirlidir ve değişiklik olmamaktadır.
- Vagonların ambar ve bakım/onarım işlem süreleri önceden belirlidir.
- Vagonlar manevra alanına tek bir yönden girmekte ve diğer yönden çıkmaktadır.
- Bütün vagonlar ve pozisyon boyutları eşit büyüklüktedir.

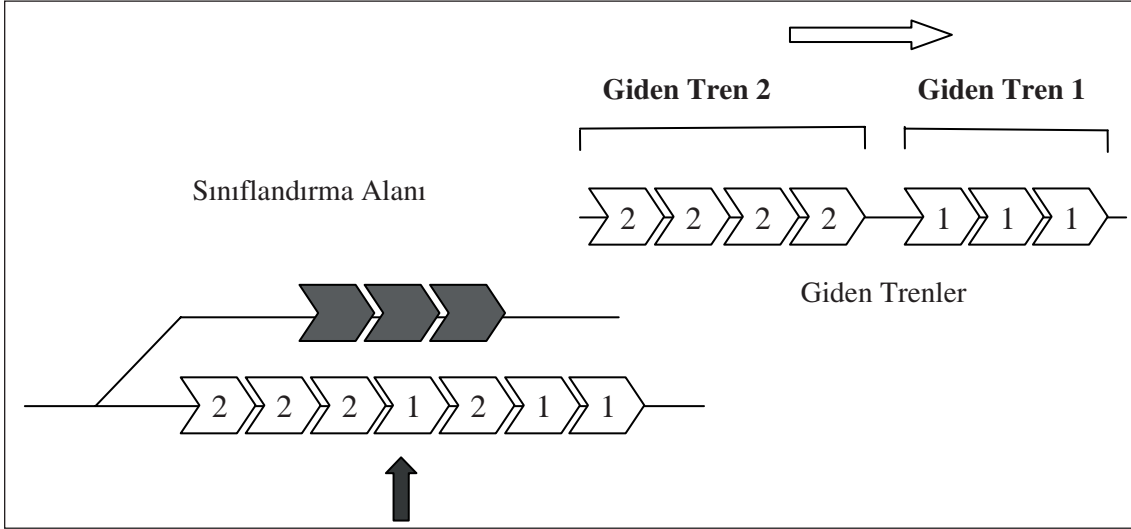
Çözüm Yaklaşımı

- Manevra alanındaki her bir yol eşit sayıda pozisyona bölünmüştür. Pozisyon numaralandırmasına vagonların alana giriş yönünden başlanmıştır.
- Manevralara gerek duyulan zaman dilimleri, manevra alanına yeni bir trenin gelme zamanı, sanal trenlerin ambar ve bakım/onarım alanına gidiş/geliş zamanları ve tren teşkil zamanlarına karşılık gelen ayrık zaman noktaları olarak yer almıştır.
- Problemin daha etkili çözümü için *dizi* kavramından yararlanılmıştır. Dizi kavramının modelde kullanılması için *birincil* ve *ikincil vagon* kavramları tanımlanmıştır. Buna göre; birincil vagon, bir vagon dizisini diğer bir diziden ayırt etmeyi sağlayan dizinin herhangi bir vagonudur. İkincil vagon ise vagon dizisinin birincil vagonu dışındaki vagonlarıdır.

- Başlangıçta manevra alanında bulunan vagon dizilerinin alana gelme zamanları ve geldikleri tren numarası “0” olarak alınmıştır. Modelin çalıştığı süre sonunda alanda kalacak olan vagonların alandan ayrılma zamanları modelin çalışma süresinden daha sonra bir zaman ve gittikleri tren numarası da toplam giden tren sayısından daha büyük olarak alınmıştır.
- Ambar ve bakım/onarım işlemleri sonrasında alana gelen diziler, gelen sanal tren, bu işlemler için alandan ayrılan diziler ise giden sanal tren olarak modelde yer almıştır.
- Dizi numaraları alanda bulunan dizilerden başlanarak verilmiştir ve aynı diziye ait tüm vagonlar aynı dizi numarasını almıştır. Bu şekilde alanda bulunan vagonlarla ilgili yapılacak hesaplamalar kolaylaştırılmıştır.
- Ek manevra yapılmasına yol açan vagon konumlanmaları belirlenmiştir. Bu konumlanmalar sırasıyla aşağıda açıklanmıştır.

Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlanmaları

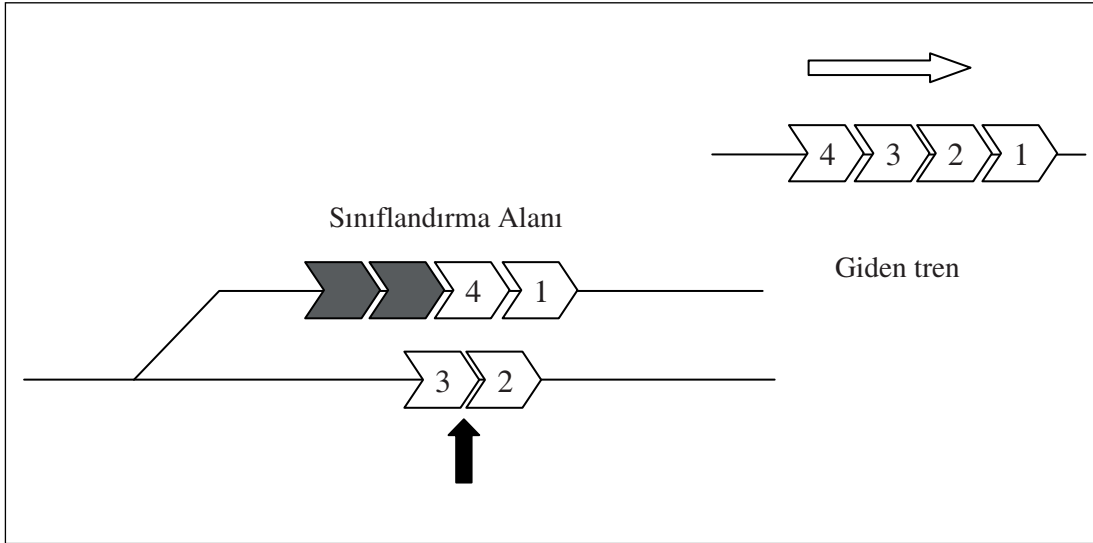
1. Ek manevraya yol açan ilk durum, bir vagon alandan kendisinden önce ayrılacak olan vagonların önüne yerleştirildiği zaman ortaya çıkar. Bu durum küçük bir örnekle aşağıda açıklanmıştır. Şekil 3’te verilen örnekte, şekillerin giden trenlerdeki ve manevra alanındaki vagonları ve üzerindeki sayıların ise vagonların gidecekleri tren numaralarını gösterdiğini; vagonların alan içindeki hareket yönlerinin ok yönünde olduğunu varsayalım. Bir ve iki numaralı giden trene ait vagonların şekilde görüldüğü gibi alana yerleştirilmesi ek manevraya sebep olmaktadır, çünkü bir numaralı giden tren oluşturulurken siyah okla gösterilen vagonun çekilmesinden önce önündeki iki numaralı giden trene ait vagon yoldan çekilmelidir.
2. Ek manevraya yol açan ikinci durum, aynı giden trene ait vagonların bu trendeki sıralarına ters olacak şekilde konumlandırıldığı zaman ortaya çıkar. Şekil 4’te vagon üzerindeki sayıların vagonların gidecekleri trendeki sırası olduğunu



Şekil 3. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlandırılması - 1

varsayalım. Örnekte bu sıraya ters olacak şekilde manevra alanına yerleştirilmiş olan ve siyah okla gösterilen vagonların yerleri giden tren

numaraları olduğunu varsayalım. Bir ve iki numaralı gelen trene ait vagonların şekilde görüldüğü gibi manevra alanına yerleştirilmesi ek



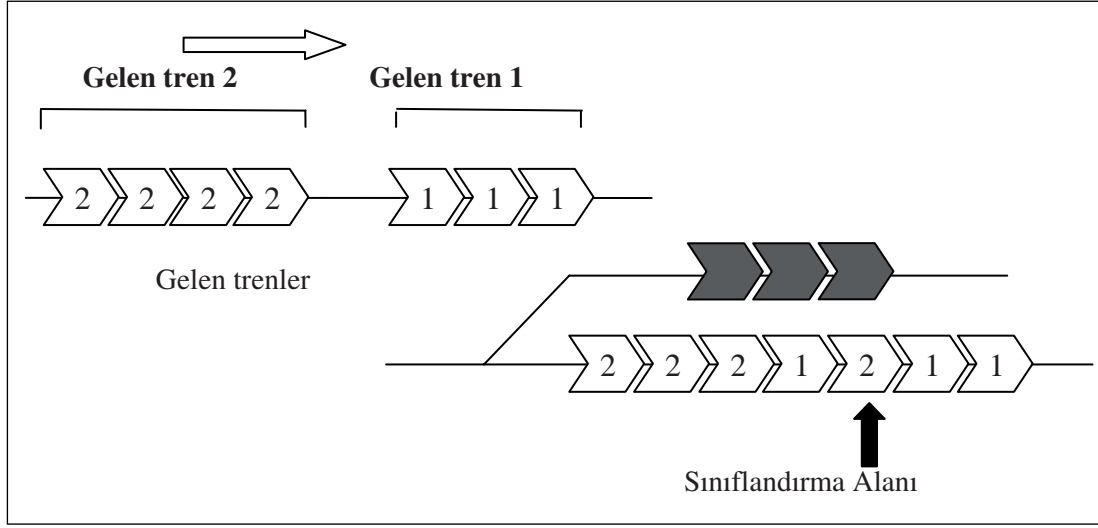
Şekil 4. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlandırılması - 2

oluşturulmadan önce değiştirilmelidir. Bu durum ek manevraya neden olmaktadır.

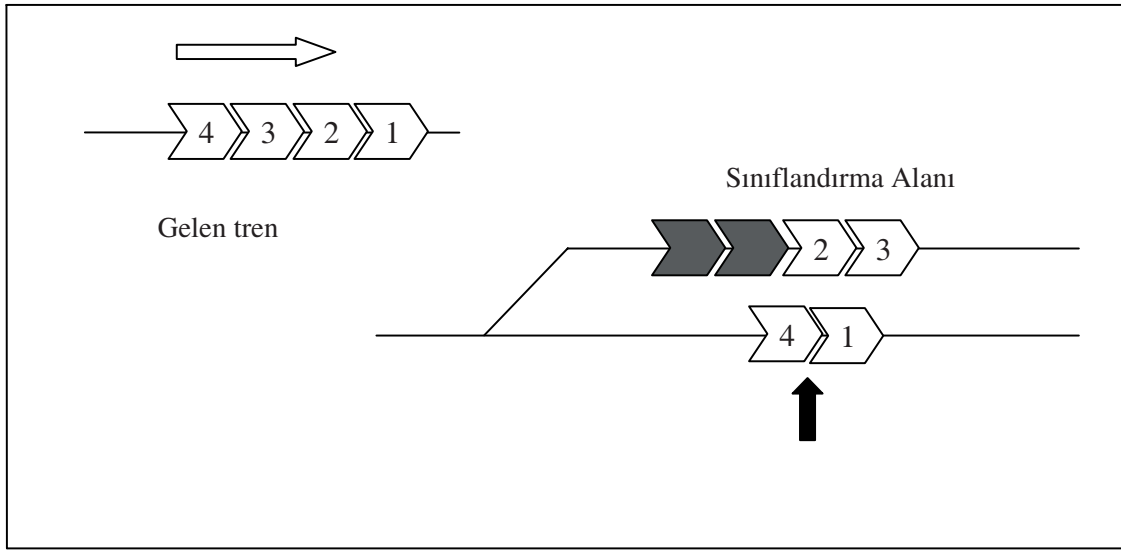
3. Vagonların geldikleri tren numaralarına göre ters şekilde konumlandırılmış olması ek manevraya yol açan üçüncü durumdur. Şekil 5'te vagon üzerindeki sayıların vagonların geldikleri tren

manevraya sebep olmaktadır, çünkü iki numaralı gelen trenin vagonları alana yerleştirilirken okla gösterilen vagonun yerleştirilmesinden önce arkasındaki bir numaralı giden trene ait vagonun hareket ettirilmesi gerekmektedir.

4. Aynı gelen trene ait vagonların bu trendeki



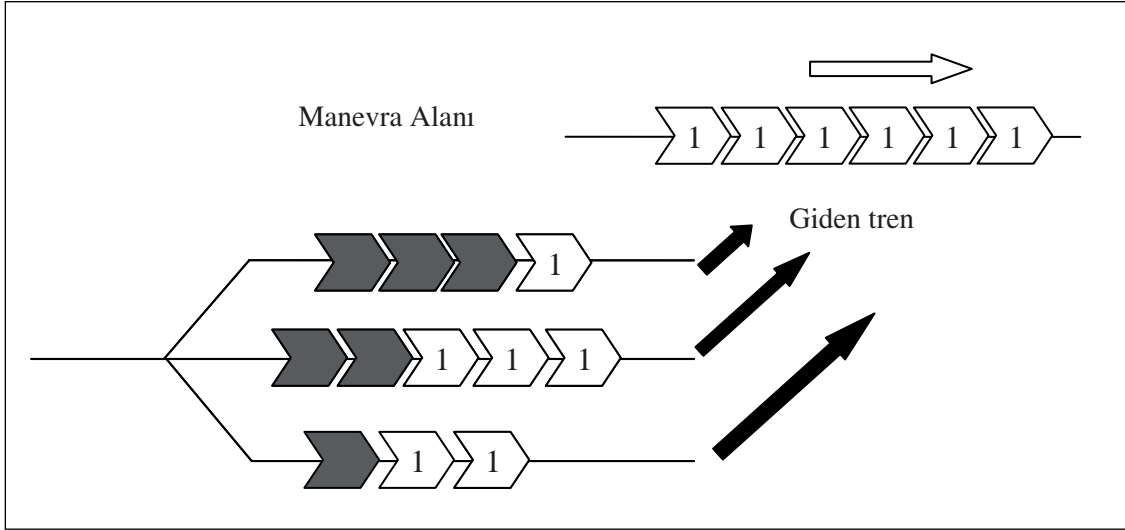
Şekil 5. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlandırılması - 3



Şekil 6. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlandırılması - 4

sıralarına ters olacak şekilde konumlandırıldığı zaman ek manevraya yol açan dördüncü durum ortaya çıkar. Şekil 6'da vagon üzerindeki sayıların vagonların geldikleri trendeki sırası olduğunu varsayalım. Bu sıraya ters olacak şekilde manevra alanına yerleştirilmiş olan ve siyah okla gösterilen vagonların pozisyonları gelen tren vagonları söküldükten sonra değiştirilmelidir. Bu durum ek manevraya neden olmaktadır.

Yukarıda bahsedilen ek manevraya yol açan konumlandırmaların kısıtlarla tespit edilmesinde pozisyon kavramından yararlanılmıştır. Her bir pozisyon sağındaki her bir pozisyon ile sırasıyla gelen tren numaraları, gelen trendeki sıraları, giden tren numaraları ve giden sıradaki sıraları göz önüne alınarak kıyaslanmıştır. Kıyaslanmanın sonucunda o pozisyondaki vagon için ek manevra yapılması gerekip gerekmediği tespit edilmiştir.



Şekil 7. Manevraya Yol Açan Vagon Konumlandırılması - 5

5. Aynı giden trene ait vagonların farklı yollara atanmış olması da ek manevraya yol açan durumlardan biridir. Şekil 7’de vagonların üzerindeki sayıların gidecekleri tren numarasını gösterdiğini varsayalım. Bir numaralı giden tren oluşturulurken, manevra alanına atanmış vagonları sırayla yollardan çekilecek ve ek manevralar yapılacaktır.

Yukarıda bahsedilen durumun kısıtlarla tespiti aynı giden trene ait her bir vagonun atandığı yol sayılarının kıyaslanması ile yapılmıştır. Kıyaslanmanın sonucunda ek manevra yapılması gerekip gerekmediği tespit edilmiştir.

6. Vagonların atandığı yol numarasının zamana bağlı olarak değişmesi vagonların yol değiştirmesi anlamına gelir ve manevra yapılmasını gerektirir. Kısıtlar ile tespit edilen yukarıda bahsedilen tüm vagon konumlanmaları ağırlıkları ile amaç fonksiyonuna sokularak ek manevra yapılması engellenmiştir ve manevra sayısı dolaylı olarak ölçülmüştür. Böylelikle, vagon atamalarının en az manevraya yol açacak şekilde yapılması sağlanmıştır.

Modelin Girdileri

KKP projesi kapsamında çözölen çizelgeleme probleminin sonuçları ile trenlerdeki vagon sıralamaları modelin başlıca girdilerini oluşturur. Bunlar; çözüümü

kapsayan süre dâhilinde alana gelen ve alandan giden vagon özellikleri yani vagonların geldikleri ve gidecekleri tren, bu trenlerin gelme ve gitme zamanları, vagonların bu trenlerdeki sıraları ve vagonların ambar ve bakım/onarıma girme bilgileridir. Tüm bu bilgiler dizi oluşturma modülünden geçirilerek dizi bilgileri olarak modele verilirler. İstasyonların fiziksel yapıları yani alandaki yol sayısı, yol kapasitesi ve konumları da modelin diğer girdileridir. Model girdileri aşağıda gösterilmiştir:

- i = dizi numarası endeksi, $i = 1,2,3,\dots,I$. I çözüm süresi dâhilindeki toplam dizi sayısıdır.
- j = yol numarası endeksi, $j = 1,2,3,\dots,J$. J manevra alanındaki toplam yol sayısını göstermektedir.
- k = pozisyon endeksi, $k = 1,2,3,\dots,K$. K bir yolda bulunan maksimum pozisyon sayısını göstermektedir.
- $E_{jkt} = \begin{cases} 1, & t \text{ anında } j \text{ yolunun } k \text{ pozisyonuna vagon atanabiliyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- t = zaman endeksi, $t = 1,2,3,\dots,T$. T modelin çözüm süresi dahilinde en son meydana gelen olayın sırasını göstermektedir.
- f = gelen tren numarası endeksi, $f=1,2,3,\dots,F$. F modelin çözüm süresince alana gelen toplam tren sayısıdır.
- g = giden tren numarası endeksi, $g = 1,2,3,\dots,G$. G modelin çözüm süresince alandan giden toplam tren sayısıdır.

- $at_i = i$ dizisinin alana gelme zamanı
- $dt_i = i$ dizisinin alandan ayrılma zamanı
- $ta_i = i$ dizisinin alana geldiği tren numarası
- $td_i = i$ dizisinin alandan ayrıldığı tren numarası
- $r_i = i$ dizisinin geldiği trendeki sırası
- $s_i = i$ dizisinin gittiği trendeki sırası
- $l_i = i$ dizisinin vagon sayısı
- $w_i =$ başlangıçta alanda bulunan i dizisinin atanmış olduğu yol numarası
- $vs =$ başlangıçta manevra alanında bulunan vagon sayısı
- $M =$ büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

- $X_{ijkt} = \begin{cases} 1, & i \text{ dizisinin birincil vagonu } t \text{ zamanında } j \\ & \text{yolunun } k \text{ pozisyonuna atandıysa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $Y_{ijkt} = \begin{cases} 1, & i \text{ dizisinin ikincil vagonlarından biri } t \\ & \text{zamanında } j \text{ yolunun } k \text{ pozisyonuna atandıysa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $C_{ijkt} = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } j \text{ yolunun } k \text{ pozisyonuna atanmış} \\ & \text{vagonun hareketi diğer tren vagonları tarafından} \\ & \text{alandan ayrılma zamanına göre engelleniyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $D_{ijkt} = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } j \text{ yolunun } k \text{ pozisyonuna atanmış} \\ & \text{vagonun hareketi diğer tren vagonları tarafından} \\ & \text{alana gelme zamanına göre engelleniyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $N_{ijkt} = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } j \text{ yolunun } k \text{ pozisyonuna atanmış} \\ & \text{vagonun hareketi gideceği trendeki sırasına göre} \\ & \text{aynı giden trene ait vagonlarca engelleniyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $R_{jkt} = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } j \text{ yolunun } k \text{ pozisyonuna atanmış} \\ & \text{vagonun hareketi geldiği trendeki sırasına göre} \\ & \text{aynı gelen trene ait vagonlarca engelleniyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $a_{jktg} = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } j \text{ yolunun } k \text{ pozisyonuna } g \text{ giden} \\ & \text{treninin bir vagonu atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $b_{jktzg} = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } j \text{ yolunun } z \text{ pozisyonuna atanmış} \\ & g \text{ giden treninin vagonunun giden trendeki sırası} \\ & \text{aynı trene ait } k \text{ pozisyonuna atanmış vagonun} \\ & \text{büyükse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $v_{jktf} = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } j \text{ yolunun } k \text{ pozisyonuna } f \text{ gelen} \\ & \text{treninin bir vagonu atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $u_{jktzf} = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } j \text{ yolunun } z \text{ pozisyonuna atanmış} \\ & f \text{ gelen treninin vagonunun gelen trendeki sırası} \\ & \text{aynı trene ait } k \text{ pozisyonuna atanmış vagonun} \\ & \text{büyükse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $P_{itl} = \begin{cases} 1, & \text{aynı giden trene ait } i \text{ ve } l \text{ vagonları } t \\ & \text{zamanında farklı yollara atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $H_{jt} = \begin{cases} 1, & j \text{ yolu } t \text{ zamanında kullanılıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $l_{jt} = \begin{cases} 1, & t \text{ anında } j \text{ yoluna atanmış } i \text{ dizisinin vagon} \\ & \text{sayısı toplam vagon sayısından farklıysa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $q_i = i$ vagonunun manevra alanına geldiği zamanda atandığı yol sayısı
- $L_i = \begin{cases} 1, & i \text{ vagonu alandaki hareketi sırasında ilk} \\ & \text{atandığı yolu değiştirmişse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
- $f_i =$ başlangıçta alanda bulunan i vagon dizisinin birincil vagonunun ilk zamanda değiştirdiği yol sayısı

Kısıtlar

$$\forall i, \sum_j \sum_k X_{ijkt} = 1 \quad \forall i, at_i \leq t < dt_i \quad (1)$$

$$\forall i, \sum_j \sum_k Y_{ijkt} = l_i - 1 \quad \forall i, at_i \leq t \text{ ya da } t < dt_i \quad (2)$$

$$\forall i, \sum_j \sum_k (X_{ijkt} + Y_{ijkt}) = 0 \quad \forall i, at_i > t \text{ ya da } t \geq dt_i \quad (3)$$

$$\forall j, k, t, \sum_i (X_{ijkt} + Y_{ijkt}) \leq B_{jkt} \quad (4)$$

$$\diamond \quad \sum_i (dt_i (X_{ijzt} + Y_{ijzt})) - \sum_i (dt_i (X_{ijk} + Y_{ijk})) \leq M C_{jkt} \quad \forall j, k, z > k, t \quad (5)$$

$$\diamond \quad \sum_{t d_i = g} (X_{ijk} + Y_{ijk}) \leq a_{jktg} \quad \forall j, k, t, g \quad (6)$$

$$\diamond \quad \sum_{t d_i = g} (s_i (X_{ijzt} + Y_{ijzt})) - \sum_{t d_i = g} (s_i (X_{ijk} + Y_{ijk})) \leq M b_{jktg} \quad \forall j, k, z > k, t, g \quad (7)$$

$$\diamond \quad a_{jztg} + a_{jktg} + b_{jktg} - 2 \leq N_{jkt} \quad \forall j, k, z > k, t \quad (8)$$

$$\diamond \quad \sum_i (at_i (X_{ijzt} + Y_{ijzt})) - \sum_i (at_i (X_{ijk} + Y_{ijk})) \leq M D_{jkt} \quad \forall j, k, z > k, t \quad (9)$$

$$\diamond \quad \sum_{t a_i = f} (X_{ijk} + Y_{ijk}) \leq v_{jkcf} \quad \forall j, k, t, f \quad (10)$$

$$\diamond \quad \sum_{t a_i = f} (r_i (X_{ijzt} + Y_{ijzt})) - \sum_{t a_i = f} (r_i (X_{ijk} + Y_{ijk})) \leq M u_{jktf} \quad \forall j, k, z > k, t, f \quad (11)$$

$$\diamond \quad v_{jzcf} + v_{jkcf} + u_{jktg} - 2 \leq R_{jkt} \quad \forall j, k, z > k, t, f, g \quad (12)$$

$$\diamond \quad \sum_k ((l_i - 1) X_{ijk}) - \sum_k Y_{ijk} \leq M I_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (13)$$

$$\diamond \quad \sum_k Y_{ijk} - \sum_k ((l_i - 1) X_{ijk}) \leq M I_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (14)$$

$$\diamond \quad \sum_j \sum_k (J X_{ijk}) - \sum_j \sum_k (J X_{ijk}) \leq M P_{ilt} \quad \forall g, i, l, t \quad td_i = td_l = g \quad (15)$$

$$\diamond \quad \sum_j \sum_k (j X_{ijk}) - \sum_j \sum_k (j X_{ijk}) \leq M P_{ilt} \quad \forall g, i, l, t \quad td_i = td_l = g \quad (16)$$

$$\diamond \quad q_i = \sum_j \sum_k (j X_{ijk}) \quad \forall i, \quad t = at_i \quad (17)$$

$$\diamond \quad q_i - \sum_j \sum_k (j X_{ijk}) \leq M L_i \quad \forall i, \quad at_i \leq t < dt_i \quad (18)$$

$$\diamond \quad \sum_j \sum_k (j X_{ijk}) - q_i \leq M L_i \quad \forall i, \quad at_i \leq t < dt_i \quad (19)$$

$$\diamond \quad f_i = \sum_j \sum_k (j X_{ijk}) - w_i \quad \forall i, \quad i \leq vs \quad (20)$$

$$\diamond \quad f_i = w_i - \sum_j \sum_k (j X_{ijk}) \quad \forall i, \quad i \leq vs \quad (21)$$

$$\diamond \quad \sum_i \sum_k X_{ijk} \leq M H_{jt} \quad \forall j, t \quad (22)$$

$$X_{ijk}, Y_{ijk}, C_{jkt}, D_{jkt}, N_{jkt}, R_{jkt}, a_{jktg}, b_{jktg}, v_{jkcf}, u_{jktf}, P_{ilt}, I_{ijt}, L_i, H_{jt} \text{ ikili} \\ \text{değişken} \quad (23)$$

(1) numaralı kısıt ile her bir dizinin birincil vagonlarının alanda bulunduğu her bir zaman biriminde mutlaka bir pozisyona atanması sağlanmıştır. (2) numaralı kısıt her bir dizinin ikincil vagonlarının alanda buldukları her bir zaman biriminde sayıları kadar pozisyona atanmasını sağlamaktadır. (3) numaralı kısıtla alanda bulunmadığı zamanlarda vagonların hiçbir konuma atanmaması sağlanmıştır. (4) numaralı kısıt ile var olan pozisyonlara en fazla bir vagon atanması koşulu getirilmiştir. (5) numaralı kısıt, her bir pozisyondaki vagonların hareketinin alandan ayrılış zamanına göre diğer vagonlar tarafından engellendiği durumları tespit etmektedir (Bakınız: Şekil 3. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlanmaları-1). (6),(7),(8) numaralı kısıtlar, her bir pozisyondaki vagonların hareketlerinin aynı giden trene ait diğer vagonlar tarafından bu trendeki sıralarına göre engellendiği durumları tespit etmektedir (Bakınız: Şekil 4. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlanmaları-2). (6) numaralı kısıt ile kontrol edilen pozisyonlara aynı giden trene ait vagonların atanıp atanmadığı kontrol edilmiştir. (7) numaralı kısıt ile kontrol edilen pozisyonlara atanmış vagonların giden trendeki sıralarının birbirine göre büyüklüğü hesaplanmıştır. (8) numaralı kısıt, (6) ve (7) numaralı kısıtlara bağlı olarak giden trendeki sıralamaya göre vagonların hareketlerinin engellendiği durumları tespit etmektedir. (9) numaralı kısıt, her bir pozisyondaki vagonların manevra alanına geliş zamanına ters şekilde konumlandığı durumları tespit etmektedir (Bakınız: Şekil 5. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlanmaları-3). (10), (11) ve (12) numaralı kısıtlar, her bir pozisyondaki vagonların aynı gelen trene ait diğer vagonlara göre geliş sıralamasına ters şekilde konumlandığı durumları tespit etmektedir (Bakınız: Şekil 6. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlanmaları-4). (10) numaralı kısıt ile kontrol edilen pozisyonlara aynı gelen trene ait vagonların atanıp atanmadığı kontrol edilmiştir. (11) numaralı kısıt ise kontrol edilen pozisyonlara atanmış vagonların gelen trendeki sıralarının birbirine göre büyüklüğünü hesaplamaktadır. (12) numaralı kısıt, (10) ve (11) numaralı kısıtlara bağlı olarak gelen trendeki sıralamaya ters şekilde yapılan vagon atamasını tespit etmektedir. (13) ve (14) numaralı kısıtlarla

vagon dizisinin bir arada atanmasını sağlamak amacıyla bir yola atanmış olan her bir dizinin vagon sayısının toplam vagon sayısından farklı olup olmadığı belirlenmiştir. Böylelikle dizi vagonlarının aynı yola atanması zorlanmıştır. (5) – (12) kısıtlarıyla da her bir dizi vagonunun arka arkaya atanması zorlanmıştır. (15) ve (16) numaralı kısıtlarla her bir dizinin birincil vagonu üzerinden aynı giden trene ait dizilerin farklı yollara atandığı durumlar tespit edilmiştir. Bu hesaplama, dizilerin birincil vagonları üzerinden yapılmıştır, çünkü vagon dizilerinin aynı yola atanması yukarıdaki kısıtlarla zorlanmıştır (Bakınız: Şekil 7. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlanmaları-5). (17) numaralı kısıt ile her bir vagonun manevra alanına geldiği zamanda atandığı yol numarası hesaplanmıştır. (18) ve (19) numaralı kısıtlar ile dizilerin alandaki hareketleri sırasında ilk atandığı yolu değiştirip değiştirmediği tespit edilmiştir. Bu hesaplama, dizilerin birincil vagonları üzerinden yapılmıştır, çünkü vagon dizilerinin aynı yola atanması yukarıdaki kısıtlarla zorlanmıştır. (Bakınız: Şekil 8. Ek Manevraya Yol Açan Vagon Konumlanmaları-6) (20) ve (21) numaralı kısıtlarla başlangıçta manevra alanında bulunan vagonların buldukları yol ile ilk atandıkları yol arasındaki fark hesaplanmıştır, çünkü bu vagonların ilk aşamadaki yol değişimi yine aynı şekilde manevraya yol açmaktadır. (22) numaralı kısıt ile her bir zaman noktasında her bir yolun kullanılıp kullanılmadığı belirlenmiştir. Modelin karar değişkeni ve kısıt sayısı $I \times J \times K \times T$ mertebesindedir.

Amaç Fonksiyonu

$$\begin{aligned} \text{Enazla } z = & c \sum_j \sum_k \sum_t C_{jkt} + d \sum_j \sum_k \sum_t D_{jkt} \\ & + n \sum_j \sum_k \sum_t N_{jkt} + r \sum_j \sum_k \sum_t R_{jkt} + p \sum_i \sum_l \sum_t P_{ilt} \\ & + l \sum_i L_i + f \sum_i f_i + t \sum_i \sum_j \sum_t l_{ijt} + h \sum_j \sum_t H_{jt}. \end{aligned}$$

Bu fonksiyonda c, d, n, r, p, l, f, t ve h değişik ağırlıkları gösteren parametrelerdir. Bu ağırlıklar manevra planlarını uygulayacak olan kişiler tarafından, manevra alanının fiziksel koşulları ve uygulanmak istenen yöntem göz önünde bulundurularak belirlenebilir. İlk yedi terimin toplamı ile ek manevraya yol açan vagon konumlanmalarının ağırlıklı toplamı hesaplanmıştır. Sekizinci terim, aynı yola atanmayan

vagon dizilerinin tespit edildiği durumların ağırlıklı toplamıdır. Son terim ile kullanılan toplam yol sayısı hesaplanmıştır. Tüm bu terimlerinin toplamını en azlayan amaç fonksiyonu ile ek manevra sayısı ve kullanılan yol sayısı başarı ölçülerini ağırlıkları doğrultusunda en azda tutan zamana bağlı vagon konumları belirlenmiştir.

C_{jkt} , D_{jkt} , b_{jkzlg} , u_{jkzlf} , P_{ilt} , l_{ijt} , L_i , H_{jt} karar değişkenlerinin değerlerinin hesaplanmasında M değeri kullanılmıştır. Kısıtların sıkı hâlde bulunması modelin çözümünü kolaylaştıracağından M değerleri için mümkün olan en küçük değerler kullanılmalıdır. Bu değerler, hesaplanmasında kullanıldıkları karar değişkenleri ile Tablo 1’de verilmiştir:

Tablo 1. Modelin Kısıtlarında Kullanılan M Değerlerinin Alabileceği En Küçük Değerler

Karar Değişkeni	M Değeri
C_{jkt}	$F + G - 1$
D_{jkt}	$F + G - 1$
b_{jkzlg}	Maksimum (S_i) - 1
u_{jkzlf}	Maksimum (r_i) - 1
l_{ijt}	Maksimum (l_i) - 1
P_{ilt}	$J - 1$
L_i	$J - 1$
H_{jt}	$K - 1$

Modelin Çıktısı

Modelin çözülmesi sonucunda başarı ölçülerini dolaylı olarak ölçerek en azlayan zamana bağlı vagon konumları elde edilmiştir. Bu konumlar, uygulayıcı açısından daha anlaşılır olması amacıyla dönüştürücü bir modülden geçirilmiş ve böylelikle manevra hareket planları oluşturulmuştur. Oluşturulan planların manevra sayısı hakkında ilk yedi terimin toplamından fikir elde edilebilir. Bu toplam direkt olarak manevra sayısını vermese de manevra sayısı ile doğrudan orantılıdır. Kullanılan yol sayısı da amaç fonksiyonunun son teriminden elde edilmektedir.

Modelin Uygulanması

- Her bir manevra alanı için model çalıştırılmalı ve modelin çözüm süresine bakılarak modelin uygunluğuna karar verilmez. Eğer uygulayıcı açısından makul çözümler sağlıyorsa belirli çözüm süresi belirlenerek veya en iyi çözümden istenen seviyelerde uzaklaşarak vagon hareketlerinin planlanmasında model kullanılabilir.
- Modelin amaç fonksiyonunda yer alan ağırlıklar, uygulayıcı tarafından manevra alanının fiziksel koşulları ve uygulanmak istenen manevra planı göz önüne alınarak belirlenmelidir.
- Vagonların manevra alanındaki hareket yönleri tek değil ise ilk aşamada manevra alanında bulunan vagonlar alana giriş ve çıkış yönlerine bakılarak sağdan girip soldan çıkanlar ve soldan girip sağdan çıkanlar olmak üzere ikiye ayrılmaya çalışılır. Eğer ayrılabilirse, yollar da bu yönlerin kullanılma oranına göre ikiye ayrılır ve her bir yön için tek olmak üzere iki model çalıştırılmalıdır.
- TCDD bünyesinde yürütülen KKP projesinin tamamlanmasının ardından manevra alanına gelen ve giden trenler ve bu trenlere ait vagon bilgileri her günün sabahında belli olacaktır. Bu kapsamda en iyi manevra planını oluşturabilmek için mevcut problem için modelin bir haftalık ufka sahip olması, her gün yeni bilgiler eşliğinde yeniden çözülmesi ve yuvarlanan ufuk esasına göre ele alınması önerilmektedir.

Uygulama Örnekleri

Modelin çözüm süresine dair veri elde etmek için aynı boyutta farklı problemler çözülmüştür. Beş yol ve sekizer pozisyona sahip sınıflandırma alanı için dört dizi, 10 vagon, iki gelen tren ve bir giden trenin farklı birleşimlerinden beş farklı problem verisi oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonunda kullanılacak olan ağırlıklar belirlenirken sırasıyla vagonların yol değiştirmemesine, aynı diziye ait vagonların bir arada atanmasına, giden trenin oluşturulmasına ve kullanılan yol sayısının en azda tutulmasına öncelik verilmiştir. Bu önceliği sağlayacak şekilde ağırlıklar Tablo 2’deki gibi alınmıştır. GAMS 23.0 programı

Tablo 2. Amaç Fonksiyonunun Problem Kümelerinde Kullanılan Ağırlıkları

Parametre	c	n	d	r	p	l	h	$ı$	f
Değer	5	5	1	1	3	50	2	20	20

Tablo 3. Birinci Küme Problemler İçin Model Çözüm Sonuçları

Problem No	Çözüm Süresi (sn)	Manevra Sayısı	Kullanılan Yol Sayısı
1	1,44	8	2
2	761,00	5	1
3	11,37	7	2
4	13,00	1	1
5	430,00	1	2

kullanılarak çözülen problemde elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Beş yol ve her yolda sekiz pozisyona sahip manevra alanı için beş dizi, 15 vagon, iki gelen tren ve iki giden trenin farklı birleşimlerinden 10 farklı problem oluşturulmuştur. Bu örneklerin çözümünde de amaç fonksiyonunda kullanılacak olan ağırlıklar Tablo 2'deki gibi alınmıştır. GAMS 23.0 programı kullanılarak çözülen modelden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablolardaki sonuçlar incelendiğinde aynı boyuttaki farklı problemlerin birbirinden oldukça farklı çözüm sürelerine ve manevra sayısına sahip olduğu görülmüştür. Çözüm süresi gelen ve giden trenlerin birbirlerine göre sıralarından ve vagonların bu trenlerdeki sıralarından büyük ölçüde etkilenmektedir. Problem verileri incelendiğinde ilk tren ayrılana kadar ve iki trenin ayrılışı arasında gelen tren sayısı arttıkça çözüm süresinin arttığı gözlemlenmektedir.

Tablo 4. İkinci Küme Problemler İçin Model Çözüm Sonuçları

Problem No	Çözüm Süresi (sn)	Manevra Sayısı	Kullanılan Yol Sayısı
1	1,48	6	2
2	12,64	11	2
3	279,00	1	2
4	1,90	2	2
5	7,20	7	2
6	74,00	1	2
7	59,82	6	2
8	4,50	3	2
9	7,99	4	2
10	754,00	5	2

3. SEZGİSEL YÖNTEMLER

Matematiksel model, vagonların yük treni istasyonlarında konumlanmasının en az ek manevra yapılmasını sağlamak amacı ile belirlenmesi için geliştirilmiştir. Ancak, vagon, alandaki pozisyon ve ayrık zaman noktaları sayılarının artması modelin çözüm süresini oldukça arttırabilmektedir. Bu nedenle büyük boyutlu problemlerde model çözüm için etkili bir yöntem olmayabilir. Bu gibi durumlarda çözüm için literatürdeki tren sınıflandırma ve teşkil aşamaları ile ilgilenen yöntemler incelenmiştir. İncelemeler sonucunda Türkiye'deki yük treni istasyonlarında uygulanabilirlik açısından en uygun olan Trene Göre Dizilim (Daganzo, 1985), Üçgensel Dizilim (Daganzo vd., 1983) ve Dahlhaus Dizilimi (Dahlhaus vd., 2000) yöntemleri seçilmiştir. Yöntemlerin ortak özelliği vagon sınıflandırmasını iki aşamada tamamlamalarıdır. İlk aşamada sınıflandırma alanına gelen vagonlar özelliklerine göre belirli kurallar dâhilinde yollara atanırlar. İkinci aşamada ise daha önceden yollara atanmış olan vagonlar çekilerek gidecek tren ya da trenlerin teşkilleri tamamlanır. Sınıflandırma yapılırken vagonların alana geliş zamanlarını değil geliş sıraları göz önüne alınmaktadır.

Trene Göre Dizilim (Daganzo, 1985)

Trene göre dizilim sınıflandırma yöntemi aynı gidecek trene ait vagonların aynı yola atanması esasına dayanır. Sınıflandırma yönteminin ilk aşamasını vagonların alana geliş sıralarına göre yollara dizilmesi oluşturur. İlk aşama tamamlandığı sırada gidecek bir trene ait bütün vagonlar bir yol üzerinde karışık ya da düzenli olarak bulunmaktadır. Trenin teşkil zamanı geldiğinde vagonları karışık sırada bulunan tren yoldan çekilir ve vagonlar yollara ayrılırlar (Trene Göre Dizilim (Daganzo, 1985)). Daha sonra yollara ayrılan vagonlar gidecekleri trendeki sıralarına göre çekilerek gidecek tren oluşturulur. Trene göre dizilim yöntemi trenlerin yerleştirildikleri yolların trenin bütün vagonlarını barındırabilecek kadar uzun olduğunu varsayar.

Üçgensel Dizilim (Daganzo vd., 1983)

Bu yöntem vagonları yollara atama yaparken bir numaralandırma sistemi kullanır. Temel amaç az sayıda yol kullanmaktır. İlgili makalede sınıflandırmanın bloklar üzerinden yapıldığı anlatılmaktadır. Bu sınıflandırma yönteminin sisteme uyarlanmış halinde, dizi kavramı kullanılmıştır. Diziler yollara kendilerine verilen numaralara göre atanırlar. Gidecek d . treninde bulunan dizilerin numaralandırılması $d(d-1)/2 + 1$ 'den başlayarak yapılır. Böyle bir numaralandırılma sistemi dizilere sanal numara vermeyi gerektirir. Sınıflandırma alanına gelen her vagon gideceği bu numaraya göre bir yola atanır. Vagonların sanal numaralarına göre yollara atanması tamamlandıktan sonra üçgensel sınıflandırmanın ikinci aşaması başlayabilir. Vagonlar buldukları yollardan çekilir ve belirlenmiş kurallara göre yeni yollarına atanırlar. İkinci aşama tamamlandığı zaman bütün trenlerin teşkili yapılmış olur.

Dahlhaus Dizilimi (Dahlhaus vd., 2000)

Dahlhaus diziliminde temel amaç vagon sınıflandırılması sırasında mümkün olduğunca az yol kullanmaktır. Üçgensel dizilime benzer olarak burada da vagonlar kendilerine atanan numaralara göre sınıflandırılırlar. Numaralandırma vagonların toplam vagon sayısı kadar sayı kümeleri yazılarak bu kümeler üzerinde gidecekleri trendeki sıralarına göre işaretlenmesi ile yapılır. Yazılan toplam sayı kümesi kadar yol kullanılır ve aynı sayı kümesi içinde işaretlenmiş vagonlar aynı yollara atanır. Teşkil sırasında vagonlar yollardan sırası ile çekilerek gidecek tren oluşturulur. Dahlhaus diziliminde aynı trende gelen vagonların yine hiç ayrılmadan sadece sıraları değiştirilerek aynı trende gittikleri varsayılmaktadır. Böyle bir varsayım üzerinde çalışılan sistem için geçerli değildir. Dahlhaus diziliminin öncesinde trene göre dizilim yönteminin ilk aşamasının uygulanması, yani aynı gidecek trende yer alan vagonların aynı yola atanması bu varsayımı gevşetmektedir. Böylece alana farklı zamanlarda gelen ve aynı gidecek trene ait olan vagonlar bir yol üzerinde geldikleri sıraya göre dizilirler. Tren teşkil zamanında bu karışık sıradaki vagonlar yoldan çekilir ve istasyona yeni gelmiş bir tren gibi

ele alınarak Dahlhaus yöntemi ile yollara dağıtılır ve sırası ile yollardan çekilerek teşkil tamamlanmış olur. Dahlhaus dizilimi programın oluşturulması bu bütünlüşme kuralına göre yapılmıştır.

Sezgisel sınıflandırma yöntemleri farklı problemlerdeki performanslarını değerlendirebilmek amacı ile C programlama dilinde kodlanmıştır. Oluşturulan programlar girdi olarak sınıflandırma alanına gelen vagonların bilgilerini almakta ve bu verilere göre vagonların ilk aşamada atanacakları yollara ve ikinci aşamanın adımlarına karar vermektedir. Bir metin dosyasından sınıflandırma alanına gelen toplam vagon/dizi sayısı, bu vagonların/dizilerin alandan ayrılacakları farklı trenlerin sayısı,

vagonların/dizilerin hangi trende gidecekleri ve gidecekleri trendeki sıraları okunur. Gidecek tren bilgilerine göre vagonlar sınıflandırma yönteminin gerektirdiği şekilde ilk yollarına atanırlar. Bütün vagonların hangi yola atanacağına karar verildiğinde ilk aşama tamamlanmış olur. İkinci aşamada ise kullanılan sezgisel yöntemle özgü bir şekilde tren teşkili sırasında vagonların ne şekilde hareket ettirileceğine karar verilir. Oluşturulan programların çıktısı olarak vagonların sınıflandırma sırasında ilk ve ikinci aşamada alanda ne şekilde konumlandırılacakları, bu sırada yapılan manevra hareketlerinin sayısı ve kullanılan yol sayısı elde edilmektedir.

Sezgisel yöntemlerin karşılaştırmalarını elde

Tablo 5. Sezgisel Sınıflandırma Yöntemlerinin Çözüm Sonuçları

Problem No	Vagon Sayısı	Gelen Tren Sayısı	Giden Tren Sayısı	Sınıflandırma Yöntemi	Manevra Sayısı	Yol Sayısı
1	50	3	4	Trene Göre Dizilim	27	4
2	50	3	4	Üçgensel Dizilim	18	4
3	50	3	4	Dahlhaus Dizilimi	25	4
4	50	5	5	Trene Göre Dizilim	35	5
5	50	5	5	Üçgensel Dizilim	29	5
6	50	5	5	Dahlhaus Dizilimi	33	5
7	50	7	6	Trene Göre Dizilim	26	6
8	50	7	6	Üçgensel Dizilim	10	6
9	50	7	6	Dahlhaus Dizilimi	26	6
10	100	3	4	Trene Göre Dizilim	29	4
11	100	3	4	Üçgensel Dizilim	23	4
12	100	3	4	Dahlhaus Dizilimi	27	4
13	100	5	5	Trene Göre Dizilim	40	5
14	100	5	5	Üçgensel Dizilim	31	5
15	100	5	5	Dahlhaus Dizilimi	34	5
16	100	7	6	Trene Göre Dizilim	26	6
17	100	7	6	Üçgensel Dizilim	14	6
18	100	7	6	Dahlhaus Dizilimi	26	6
19	150	3	4	Trene Göre Dizilim	32	4
20	150	3	4	Üçgensel Dizilim	23	4
21	150	3	4	Dahlhaus Dizilimi	30	4
22	150	5	5	Trene Göre Dizilim	31	5
23	150	5	5	Üçgensel Dizilim	17	5
24	150	5	5	Dahlhaus Dizilimi	31	5
25	150	7	6	Trene Göre Dizilim	27	6
26	150	7	6	Üçgensel Dizilim	14	6
27	150	7	6	Dahlhaus Dizilimi	27	6

edebilmek amacı ile yazılan programlar oluşturulan farklı problemler üzerinde çalışılmıştır. Kullanılan problemlerin özellikleri ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'te incelenebilir.

Çözülen problemlerde Trene Göre Dizilim ve Dahlhaus Dizilimi birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Üçgensel Dizilim daha az yol kullanırken daha az sayıda da manevra yapılmasını sağlamıştır. Çözülen problemlerde Üçgensel Dizilimin en iyi sonucu veriyor olması genelleme yapmak için yeterli değildir. Bir yük treni istasyonunda hangi sınıflandırma yönteminin kullanılacağına karar verilirken performans ölçütlerinin değerlendirmeleri ile birlikte söz konusu yöntemin o istasyonda kullanılabilirliği de göz önüne alınmalıdır. Bazı durumlarda en iyi sonucu veren Üçgensel Dizilim yöntemi yerine performans ölçülerinde kabul edilebilir sapmalarla kullanımı daha kolay ve anlaşılır olan Trene Göre Dizilim yöntemi kullanılabilir.

4. BENZETİM MODELİ

Matematiksel modelde ve sezgisel yöntemlerde gerekirci bir ortam varsayılmıştır. Ancak tren istasyonlarında rassal olarak ortaya çıkabilecek tren gecikmeleri gözlemlenmektedir. Ayrıca ambar ve bakım/onarım işlem süreleri çalışanın performansına olduğu kadar yükün müşterisine de bağlı olduğu için, bu işlemlerin sürelerinde belirsizlikler ve rassallık mevcuttur. Bahsedilen belirsizliklerin ve rassallığın sezgisel yöntemlerin performansları üzerine etkilerini gözlemleyebilmek için bir benzetim modeli kurulmuştur.

Modelin İşleyişi

Modelin ana birimini vagonlar oluşturur. Vagonların tren içerisinde veya manevra sırasında gruplanmasıyla birden çok vagonun oluşan gruplar da bir birim olarak alınabilir. Başlıca olaylar, sanal trenler de dahil olmak üzere bir trenin gelişi veya gidişidir. Vagonlar, bu olaylar arasında yer değiştirerek manevralara gereksinim duyarlar. Manevra gerektiren işlemler, gelen trenin vagonlarının çekilmesi, vagonların ambar ve bakım/onarım alanlarına yönlendirilmesi, vagonların sınıflandırılması ve tren teşkili olarak 3 ana grupta incelenebilir.

Gelen tren işlemleri

Bir tren alana girdiğinde, vagonları sırasıyla çekilerek bir sonraki konumlarına götürülür. Vagonların bir sonraki konumları, ambar ve bakım/onarım ihtiyaçları göz önüne alınarak belirlenir. Bu atamalar farklı durumlarda şu şekilde yapılır:

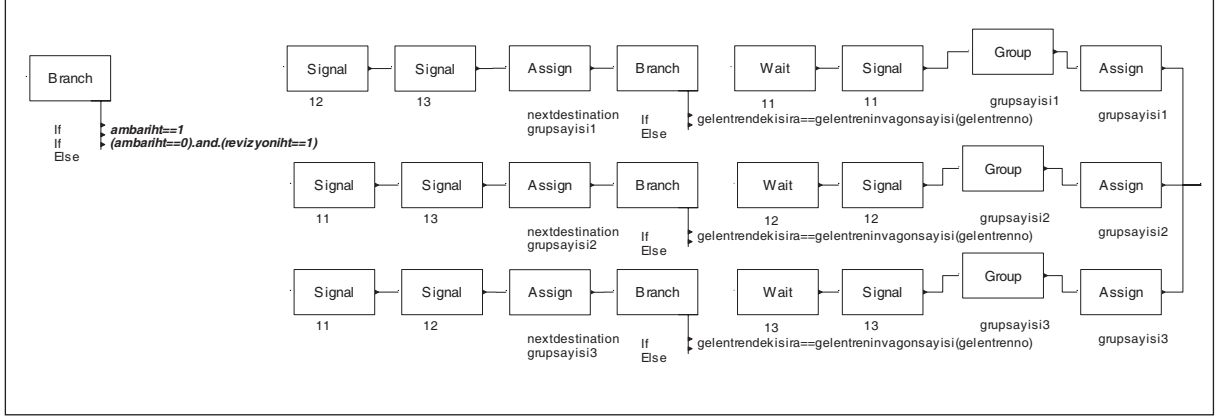
- Vagonun sadece ambar ihtiyacı varsa, bir sonraki konumu manevra alanındaki ambar yolu olarak belirlenir.
- Vagonun sadece bakım/onarım ihtiyacı varsa, bir sonraki konumu manevra alanındaki bakım/onarım yolu olarak belirlenir.
- Vagonun hem ambar hem bakım/onarım ihtiyacı varsa, bir sonraki konumu ambar yolu olarak belirlenir ancak vagon ambarda işlem gördükten sonra bakım/onarıma gönderilir.

Bir vagon, belirlenen sonraki konumuna gönderilmeden önce, gelen trende ondan bir sonraki vagon kontrol edilir. Eğer vagonların sonraki konumları aynıysa gruplanırlar. Bu gruplama işlemi, sonraki konumu farklı olan bir vagona rastlayana kadar devam eder. Ancak o zaman grup manevra lokomotifleriyle bir sonraki konumuna tek seferde götürülür. Bu sayede, manevra lokomotifinin yapmış olduğu manevra sayısı azaltılmış olur. Benzetim modelinde uygulanan gruplama işlemiyle oluşturulan gruplar, daha önce bahsedilmiş olan dizi kavramından farklıdır. Diziler alana girişinden çıkışına kadar hiç ayrılmaması beklenen vagon grupları iken, burada bahsedilen gruplar alan içerisinde, sadece iki nokta arasında taşınırken ayrılmayacak vagon topluluklarıdır. Benzetim modelinde bu gruplama işleminden sorumlu bloklar Şekil 8'de gösterildiği gibidir.

Gelen trendeki vagonların ikinci konumları ambar yolu, bakım/onarım yolu veya sınıflandırma yollarından biri olabilir.

Ambar ve bakım/onarım yolları

Ambar yolu, manevra alanında bulunan ve ambar ihtiyacı olan vagonların, ambara gitmeden önce çekildikleri yoldur. Ambar alanının dolu olduğu durumlarda ambar ihtiyacı olan vagonlar sınıflandırma alanında ambar boşalana kadar bekler.



Şekil 8. Gelen Vagonların Gruplanması

Bu vagonların sınıflandırma alanında beklediği yol ambar yolu olarak ayrılmıştır. Ambar uygun olduğu durumlarda da vagonlar gruplanarak taşınmak için öncelikle ambar yoluna çekilir. Aynı trenle gelen ve ambar ihtiyacı olan vagonlar bu yolda toplanarak gruplanır ve ambar lokomotifine ambara götürülür. Bakım/onarım yolunun işleyişi de ambar yolunkine benzerdir. Ambar ve bakım/onarım yollarını temsil eden bloklar Şekil 9'da gösterilmiştir.

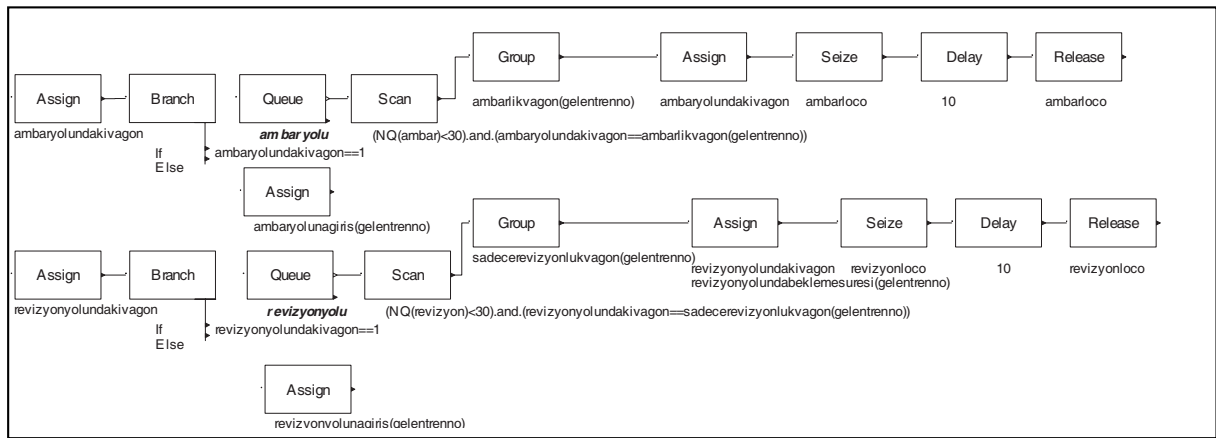
Sınıflandırma yolları

Gelen trende, ambar veya bakım/onarım ihtiyacı olmayan vagonlar sınıflandırma alanına gönderilir. Vagonun konulacağı sınıflandırma yolu, kullanılan yöntemle göre belirlenir. Vagonlar, grup halinde

veya tek olarak sınıflandırma alanına manevra lokomotifine çekilir.

Ambar ve bakım/onarım işlemleri

Aynı trenle gelmiş olan vagonlar, ambarada birlikte işlem görür. İşlemler bittikten sonra, vagonlar eğer bakım/onarım ihtiyaçları varsa bakım/onarıma, yoksa da sınıflandırma alanına ambar lokomotifine götürülürler. Aynı grupta gelmiş vagonlar arasında aynı istikamete gidecek olanlar gruplanarak manevra yaptırılır. Bakım/onarım işlemi de, süresi ve vagonları gruplanışı açısından ambar işlemine benzerlik gösterir. Bakım/onarımda işi biten vagonlar, sınıflandırma alanına bakım/onarım lokomotifine götürülürler. Benzetim modelinde, ambar ve bakım/onarımı temsil eden bloklar Şekil 10'da gösterilmiştir.

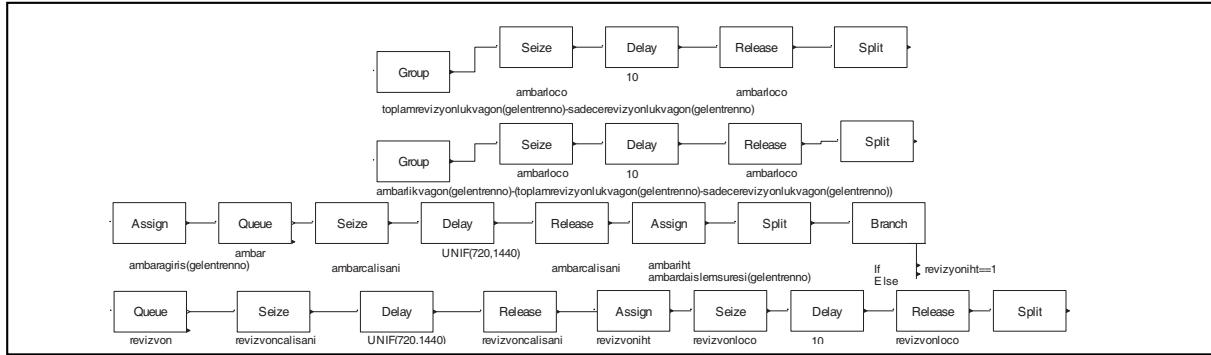


Şekil 9. Ambar ve Bakım/onarım Yolları

Vagonların sınıflandırılması ve tren teşkili

Vagonlar, kullanılan sınıflandırma yöntemine göre manevra alanındaki yollara atanırlar. Sınıflandırma yöntemleri, daha önce bahsedilmiş olan sezgisel yöntemlerden biri olabilir. Her sezgisel yöntem

için, sadece sınıflandırma alanının işlemleri farklı olan ayrı birer benzetim modeli oluşturulmuştur. Sınıflandırma yöntemlerinin işleyişleri detaylı olarak sezgisel yöntemler kısmında açıklanmıştır. Trene göre dizilim ve Dahlhaus diziliminde tren teşkili ayrı bir yol



Şekil 10. Ambar ve Bakım/Onarım İşlemleri

Tablo 6. Benzetim Çözüm Ortalama Sonuçları

Deneme No	Vagon Sayısı	Gelen Tren Sayısı	Giden Tren Sayısı	Sınıflandırma Yöntemi	Ortalama Manevra Sayısı	Ort. Yol Sayısı
1	50	3	4	Trene Göre Dizilim	72	8
2	50	3	4	Üçgensel Dizilim	66	4
3	50	3	4	Dahlhaus Dizilimi	49	6
4	50	5	5	Trene Göre Dizilim	67	7
5	50	5	5	Üçgensel Dizilim	73	5
6	50	5	5	Dahlhaus Dizilimi	49	5
7	50	7	6	Trene Göre Dizilim	72	6
8	50	7	6	Üçgensel Dizilim	33	6
9	50	7	6	Dahlhaus Dizilimi	47	5
10	100	3	4	Trene Göre Dizilim	103	10
11	100	3	4	Üçgensel Dizilim	90	5
12	100	3	4	Dahlhaus Dizilimi	62	5
13	100	5	5	Trene Göre Dizilim	97	9
14	100	5	5	Üçgensel Dizilim	94	5
15	100	5	5	Dahlhaus Dizilimi	63	7
16	100	7	6	Trene Göre Dizilim	67	7
17	100	7	6	Üçgensel Dizilim	36	6
18	100	7	6	Dahlhaus Dizilimi	44	6
19	150	3	4	Trene Göre Dizilim	145	14
20	150	3	4	Üçgensel Dizilim	121	5
21	150	3	4	Dahlhaus Dizilimi	84	7
22	150	5	5	Trene Göre Dizilim	82	10
23	150	5	5	Üçgensel Dizilim	67	6
24	150	5	5	Dahlhaus Dizilimi	56	5
25	150	7	6	Trene Göre Dizilim	75	6
26	150	7	6	Üçgensel Dizilim	41	6
27	150	7	6	Dahlhaus Dizilimi	52	5

üzerinde yapılır ancak üçgensel dizilimde sınıflandırma için kullanılan yollar üzerinde trenler oluşturulur.

Performans Ölçüleri

Benzetim modelinde tutulan istatistiksel değerler, daha önce performans ölçütleri olarak belirtilmiş olan manevra lokomotifinin yaptığı toplam manevra sayısı ve sınıflandırma için kullanılan toplam yol sayısıdır.

Benzetim modeli her bir sezgisel yöntem için sezgisel yöntemlerin anlatıldığı kısımda kullanılan aynı problemler üzerinde çalıştırılmış, 20 yineleme yapılmış ve Tablo 6'daki ortalama sonuçlar elde edilmiştir. Ambar ile bakım/onarım işlem sürelerinin birbiriyle dağılımından geldiği varsayılmıştır.

Sistemdeki rassallığın getirdiği değişiklik altında, sezgisel yöntemler arasında en iyi sonuç veren üçgensel dizilimin üstünlüğü ortadan kalkmıştır. Tablo 6'da da görüldüğü gibi çıkan sonuçlar, problemlerin vagon sayısı, dizi sayısı ve tren sayısı gibi özelliklerine bağlı olarak yöntemlerin performanslarının değiştiğini ve bu nedenle belirli bir sezgisel yöntemin genel olarak en iyi yöntem seçilemeyeceğini göstermektedir. Bir istasyonda kullanılacak sezgisel yöntem ile ilgili karar o istasyonun özelliklerini yansıtan veriler kullanılarak o alana özgü olarak verilmelidir.

5. UYGULAMA PLANI

Bu çalışmada Türkiye'deki manevra alanlarından birinde mevcut sistem üzerinde detaylı bir sistem analizi yapılamamıştır. Bu olgunun başlıca sebeplerinin biri proje sahibinin TCDD değil, Havelsan olması, ve Havelsan'ın projeden beklentisinin jenerik bir hareket planı oluşturulması olmasıdır. Ayrıca Havelsan tarafından yürütülmekte olan KYBS projesi uygulama sürecine yeni geçmektedir. Bu sürecin tamamlanması sonrasında TCDD tarafından hâlen kullanılmakta olan uygulamalar büyük ölçüde değişecek, farklı çizelgeleme yöntemlerinin kullanılması sonucunda yük taşımacılığı ile ilgili mevcut veriler geçerliliğini kaybedebilecektir. Çalışmanın başlangıç aşamasında Ankara manevra alanı birkaç kez ziyaret edilmiş, bu ziyaretlerde alanın halihazırda alanda bulunmaması gereken çok sayıda sabit yolcu ve yük vagonu tarafından işgal edilmiş durumda olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle mevcut

sistemde manevralar yapay bir şekilde çok kısıtlı bir alanda yürütülmektedir.

KYBS projesi uygulama süreci bitiminde bu çalışmada geliştirilen modeller manevra alanı planlaması için kullanılabilir hâle gelecektir. Kullanıcı olarak her bir manevra alanı yöneticisi kendi manevra alanında hangi yöntemin daha uygun olacağına karar verebilir. Bu kararın verilebilmesi için üç tip verinin toplanması gerekmektedir.

Birinci tip veri alanın fiziksel özelliklerini belirten verilerdir. Alandaki yol sayısı, yol uzunlukları, yolların tek/çift yönlü oluşu ile alanda bakım/onarım atölyesi olup olmadığı birinci tip verilerdendir. İkinci tip verilerin içerisinde belirli bir gün içinde alana gelen ve giden tren sayısı, gelen toplam vagon sayısı, her gelen trendeki vagon sayısı, her vagonun ambar ve bakım/onarım gereksinimi, gelen her vagonun gideceği tren, gelen her vagonun gideceği trendeki sırası, gelen trenlerin geliş zamanı, giden trenlerin gidiş zamanı, vagonlar için ambar ve bakım/onarım işlemlerinin bitiş zamanı bulunmaktadır. Üçüncü tip veriler ise benzetim modelinde kullanılmak üzere toplanması ve istatistiksel olarak analiz edilmesi gereken verilerdir. Ambarda gerçekleştirilen yükleme/boşaltma işlem sürelerinin incelenmesi sonucunda planlanan işlem süreleri ile gerçekleşen işlem süreleri arasındaki farklara bakarak gecikmeler ile ilgili verilerin toplanması, benzer şekilde tren geliş ve gidişlerinde oluşan gecikmelerin belirlenmesi ve istatistiksel analizinin yapılması gerekmektedir.

Manevra alanında gözlemlenen gecikmeler ihmal edilebilir düzeylerde ise, manevra alanı yöneticisi hareket planlamasında matematiksel modeli ya da kendi manevra alanı özelliklerine göre en iyi sonuç verecek sezgisel yöntemi kullanabilir. Aksi takdirde, gecikmelerin de göz önüne alınabildiği benzetim modeli kullanılarak manevra alanı için en iyi sezgisel yöntem bulunmalıdır.

Kullanıcıya destek amacıyla iki adet modül geliştirilmiş ve C programlama dilinde kodlanmıştır. Bu modüller yöntem belirleme modülü ile hareket planlama modülüdür (Bakınız Alev vd., 2009). Yöntem belirleme modülü bir alanda sistem ilk

defa uygulanırken veya verilerde büyük ve kalıcı bir değişiklik olduğunda, alanda uygulanacak en uygun sınıflandırma yöntemine karar vermede yardımcı olacak destek sistemini içeren modüldür. Hareket planı modülü ise kullanılan yöntem için gerekli verileri okuyarak belirlenen ufuk dahilinde her bir vagonun alan içerisindeki konumunu çıktı olarak verir.

6. SONUÇLAR VE BEKLENTİLER

- Bu çalışmada, yük treni istasyonlarında trenlerin alana gelişi ile başlayarak istasyondan ayrılmalarına kadar devam eden süreçte yapılan manevra hareketlerinin planlaması için geliştirilen karar destek sistemi sunulmuştur.
- Manevra hareketlerinin planlanmasında vagonların konumları daha sonraki işlemler göz önüne alınarak belirlenmiştir.
- Karar destek sisteminde kullanılan yöntemlerde bir haftalık ufuk tanımlanmış, yöntemlerin her gün yeni bilgiler eşliğinde yeniden çözülmesi ve yuvarlanan ufuk esasına göre ele alınması önerilmiştir. Performans ölçüleri haftalık toplam manevra sayısı ve kullanılan yol sayısı olarak belirlenmiştir.
- Her ne kadar karşılaştırma fırsatı bulunamamış olsa bile yuvarlanan ufuk esasına göre ele alınan yöntemlerin miyopik yaklaşımdan daha iyi sonuç vereceği düşünülmüştür.
- Vagonların ambar ve atölyelere gelişi ve gidişi zamanları da dahil olmak üzere tüm geliş ve gidişler önceden belirli olduğu gerekirci durumlar için bir matematiksel model geliştirilmiş ve küçük boyutlu problemlerde denenmiştir.
- Büyük boyutlu gerekirci ortamlar için literatürde bulunan Trene Göre Dizilim, Dahlhaus Dizilimi ile Üçgensel Dizilim sezgisel yöntemleri uyarlanmıştır. Çözülen test problemlerinde Üçgensel Dizilim yöntemi en iyi sonucu vermiştir, ancak bu durum genelleme yapmak için yeterli değildir.
- Belirsizliklerin ve rassallığın sezgisel yöntemlerin performansları üzerine etkilerini gözlemleyebilmek için bir benzetim modeli kurulmuştur. Test problemleri ile yapılan koşullar sonrasında bir istasyonda kullanılacak sezgisel yöntemin o

istasyonun özelliklerini yansıtan veriler kullanarak seçilmesi gerekliliği sonucuna varılmıştır.

- Kullanıcıya destek amacıyla yöntem belirleme ile hareket planlama modülleri geliştirilmiştir.

TEŞEKKÜR

Proje çalışmamız süresince bizlerden yardım ve desteklerini esirgemeyen HAVELSAN TCDD Kurumsal Kaynak Planlaması Projesi İEBS Modül Lideri Yagup Macit'e, şirket danışmanlarımız İEBS Modül Sorumlusu Şahin Avcıoğlu ve Yeşim Kaya'ya, TCDD Mühendisi Mustafa Kaya'ya, TCDD Ankara Marşandiz Gar Müdürü Mehmet Döner'e, alanda bilgi toplamamıza olanak sağlayan TCDD 2. Bölge Marşandiz Garı tüm çalışanlarına ve ODTÜ Endüstri Mühendisliği Bölümü ailesine, özellikle de Melih Çelik'e teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKÇA

1. Ahuja, R. K., Cunha, C.B. ve Sahin, G. 2005. "Network Models in Railroad Planning and Scheduling". *Tutorials in Operations Research, Emerging Theory, Methods, and Applications*. Dizi Editörü: H. J. Greenberg. Institute for Operations Research and the Management Sciences, Hanover, 54-101.
2. Daganzo, C.F., Dowling, R.G ve Hall, R.W. 1983. "Railyard Classification Yard Throughput: The Case of Multistage Triangular Sorting", *Transportation Research A*, 17,95-106.
3. Daganzo, C.F. 1985. "Static Blocking at Railyards: Sorting Implications and Track Requirements", *Transportation Science*, 20, 189-199.
4. Dahlhaus, E., Horak, P., Miller, M. Ryan, J.P. 2000. "The Train Marshalling Problem", *Discrete Applied Mathematics*, 103,41-54.
5. Alev, I., Çavdar, B., Çelik, B., Demirel, V., Güller, A. 2009. "Rail Yard Operations Planning", Sistem Tasarımı Proje Raporu, ODTÜ Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara.
6. Lentink, R.M., Fiiole, P.J., Kroon, L., Woudt, C.V. 2003. "Applying Operations Research Techniques to Planning of Train Shunting", *Technical Report, ERS-2003-094-LIS*, Erasmus University Rotterdam.
7. Petersen, E.R. 1977. "Railyard Modeling: Part I. Prediction of Put-through Time", *Transportation Science*, 11, 37-49.
8. Winter, T., Zimmermann, U.T., 2000. "Real-time Dispatch of Trams in Storage Yards", *Annals of Operations Research*, 96, 287-315.