



Tren Frenleme Enerjisinin Maksimum Geri Kazanımı İçin Zaman-Planı Optimizasyonu

Büşra Tural^{1*}, Metin Turan²

¹ İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0003-3645-8761)

² İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0002-1941-6693)

(Bu yayın 26-27 Haziran 2020 tarihinde HORA-2020 kongresinde sözlü olarak sunulmuştur.)

(DOI: 10.31590/ejosat.1115811)

ATIF/REFERENCE: Tural, B. & Turan, M. (2021). Tren Frenleme Enerjisinin Maksimum Geri Kazanımı İçin Zaman-Planı Optimizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Special Issue), 1-9.

Öz

Bu makalede, Metro İstanbul araçlarında kullanılması için zaman planı oluşturularak maksimum enerji kazanımının optimize edilmesine yönelik yapılan araştırma sonuçları paylaşılmıştır. Bu çalışma ile amaçlanan rejeneratif enerji ile enerji kazanımı elde ederek enerji tasarrufu sağlamaktır. Rejeneratif enerji ile sağlanan enerji kazanımı, elektromanyetik frenleme yapan trenlerin ürettiği enerjii hatta bulunan ve hareket etmeye hazır durumunda olan diğer trenlere aktarması ilkesine dayanmaktadır. Trenin frenlemesi esnasında kinetik enerji açığa çıkar ve bu enerji elektrik enerjisine dönüştürülür, elektrik enerjisine dönüşen bu enerji katenera geri iletilir. Katener de hatta alıcı durumunda bulunan diğer bir trene bu enerjii iletir ve böylelikle hatta alıcı durumundaki tren bu enerjii kullanması ile enerji kazanımı sağlanmış olur. Rejeneratif frenleme enerjisinden en etkin bir şekilde yararlanmanın yollarından biri zaman-planı en iyileştirmesi (optimizasyonu) uygulanmasıdır. Zaman-planı en iyileştirilmesi yapılarak maksimum enerji kazanımı sağlayacak istasyon bekleme süreleri bulunur. Trenlerin istasyondaki en uygun bekleme sürelerini bulmak için bu çalışmada genetik algoritma kullanılmıştır. Genetik algoritma, çok boyutlu ve karmaşık arama uzayında en iyinin hayatta kalması ilkesine dayanan arama ve en iyileme yöntemidir. Genetik algoritmalar, evrimsel süreci bilgisayar ortamında taklit ederek problemlerin çözümünü ararlar. Başlangıç bireyleri tanımlanan kısıtlamalara dikkat edilerek rastgele oluşturulmuştur. Uygunluk fonksiyonu en iyileştirilmiş zaman-planını verecek bekleme sürelerini içeren bireyin değerlendirmesi amacıyla kullanılmaktadır. Her yeni nesilde daha iyi bireyler elde etmek üzere, farklı yöntem ve oranlarda elitizm, çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanmıştır. Optimizasyonun nihai haline ulaşması iterasyon sayısı ile sınırlandırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma referans olarak alınan çalışmaya kıyasla %30 oranında daha iyi sonuç elde etmiştir. Referans makalede %60 oranında olan enerji kazanımının, bu çalışma ile %78 oranına kadar çıkartılabildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeniden Enerji Kazanımı, Metro Zaman Planı, Genetik Algoritma.

Time-Plan Optimization with Genetic Algorithm for Regain of Energy from Train Tracks

Abstract

In this article, the results of the research on optimizing the maximum energy gain by creating a time plan have shared for use in Metro Istanbul vehicles. The purpose of this study is to achieve energy savings by obtaining energy gain with regenerative energy. The energy recovery provided by regenerative energy is based on the principle of transferring the energy produced by the trains that make electromagnetic braking to other trains that are found and ready to move. During the braking of the train, kinetic energy is released and this energy is converted into electrical energy, this energy transformed into electrical energy is transmitted back to the catenary. The catenary transmits this energy to another train that is also in the receiver status, and thus, energy gain is achieved, by using this energy in receiver train on the line. One of the ways to utilize regenerative braking energy in the most effective way is to apply time-plan optimization. By optimizing the time-schedule that provide maximum energy gain, the station waiting times is found. Genetic algorithm was used in this study to find the most suitable waiting times of trains at the station. Genetic algorithm is the search and optimization method based on the principle of the best survival in multi-dimensional and complex search space. Genetic algorithms seek the solution of problems by imitating the evolutionary process in a computer environment. Initial individuals were

randomly created by taking into consideration the defined restrictions. The fitness function is used to evaluate the individual which includes the waiting times that give the optimized time-schedule. Elitism, crossover and mutation operators in different methods and proportions have been applied to obtain better individuals in each new generation. The finalization of optimization is limited by the number of iterations. The study carried out has achieved 30% better result than the reference study. It was observed that the 60% energy gain in the reference article can be increased up to 78% with this study.

Keywords: Regain of Energy, Metro Time-Table, Genetic Algorithm

1. Giriş

Günümüzde artan nüfus ile birlikte ulaşım ve çevresel sorunlarda giderek artmaktadır. Nüfusun büyük çoğunluğunun şehir merkezlerinde yaşadığı düşünüldüğünde ulaşım problemlerinin çözülmesinde toplu taşıma ulaşımın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Toplu taşımaya verilen önemin giderek artması ile birlikte metro, tramvay gibi raylı sistem araçlarına duyulan talepte artmıştır.

Gelişmiş ülkelerde raylı sistem araçları diğer toplu taşıma araçlarına kıyasla öncelikli olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi, raylı sistem araçlarının kullanım ömürlerinin ve yolcu kapasitelerinin fazla olması ve çevreye verdiği zararın diğer toplu taşıma araçlarına göre daha az olmasıdır. Fakat bunun yanında raylı sistemler inşaat süreci uzun süren, araç, yatırım ve yüksek maliyetli sistemlerdir. Raylı sistem yatırımlarının artırılması için projelerin geri dönüş sürelerinin kısılması ve sistemin maliyetlerinin düşürülmesi oldukça önem arz etmektedir. En yüksek maliyet faktörlerinden biri de enerji tüketimidir. Kullanılan enerji tüketiminin en aza indirilmesi bu açıdan oldukça önemlidir. Enerji tüketimini daha verimli hale getirmek için, raylı sistemlerde enerji tasarrufuyla ilgili en iyileştirme (optimizasyon) çalışmaları yapılmaktadır. Böylelikle hem çevreye fayda sağlanmış olurken, hem de işletmenin tasarruf yapması sağlanmış olur.

Metro İstanbul 'da 2019 yılında mevcut hat uzunluğu 233 km iken, inşaat halinde 221 km hat ve hedeflenen toplam hat uzunluğu 1100 km'dir. Raylı sistemlerde hat uzunluğu arttıkça tüketilen enerji miktarı da doğru orantıda artmaktadır. Tüketilen enerjinin büyük kısmını araçlar kullanırken, diğer kısmı ise istasyonlardaki merdiven, havalandırma ve aydınlatmada kullanılmaktadır.

Raylı sistemlerde enerji verimliliğini artırmak için bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlar; kullanılan araç ağırlıklarının azaltılması, akıllı istasyon tasarımlarının gerçekleştirilmesi, enerji verimliliğinin artmasını sağlamak için kullanılan sürüş stratejileri ve enerji optimizasyonu gibi çalışmalardır [1]. Bu çalışmalara ek olarak enerji verimliliği için, enerji depolama sistemleri, frenleme enerjisinin geri kazanılması, enerji tasarruflu sürüş yöntemleri, enerji verimli cer sistemleri, optimum trenler arası süre (Headway Time), trenlerde yapılacak hız ayarlamaları, hattın işletilme açısından yeniden yapılandırılarak optimize edilmesi, vb. üzerine yoğunlaşmaktadır.

Enerji tasarrufunu sağlamak için kullanılan yöntemlerden bir diğeri ise rejeneratif frenlemenin kullanılmasıdır. Demiryolu sistemlerinde sıklıkla kullanılan rejeneratif enerji, raylı sistem araçlarının frenleme esnasında açığa çıkarttıkları kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Rejeneratif frenleme enerjisi, frenlemekte olan trenin ürettiği enerjinin yakılmadan hatta hazır durumda bekleyen ivmelenmekte olan başka bir trene aktarılması ve bu trenin o enerjiyi kullanması ile gerçekleştirilir.

Araçların hareket süreleri üç aşamadan meydana gelmektedir. Yüksek enerjinin gerektiği ivmelenme/frenleme aşaması, düşük enerji gücü gerektiren boşta gitme aşaması ve rejeneratif enerjinin üretildiği frenleme aşamasıdır [2]. Rejeneratif enerji kullanımı, trenlerin frenlemeye geçerken ürettiği enerjinin kendi iç direnci ile yakılmadan, hatta alıcı durumunda bulunan trene aktarılması ve trenin de bu enerjiyi kullanması ile gerçekleşir. Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanımı işletilen trenlerin sefer aralıkları (headway), sayıları ve konuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Frenleme ile açığa çıkan bu enerji başka bir tren tarafından kullanılmaz veya depolanmaz ise boşa gidecektir. Rejeneratif frenleme ile sadece enerji kazanılmasının yanında, istasyonlarda bulunan havalandırma sistemlerinin çalışma sıklıklarının da düşürülmesi sağlanır [3].

Tren zaman çizelgelerinin oluşturulmasında, işletme yolcularının da fayda sağlaması dikkate alınır. Zaman çizelgelerinde, genellikle hesaplanmış en düşük sefer sürelerinin oluşabilecek gecikmelerin kapatılmasına olanak sağlayacak yedek zaman aralıklarını da kapsaması önemsenir. 1971 yılında Amit ve Goldfard yapmış oldukları çalışmada, tren zaman çizelgeleme problemi için optimizasyon tekniği uygulamışlardır [4]. Bu çalışma ile, yolculuk süresi, gecikme süresi, işletme maliyeti, güvenilirlik, sağlamlık gibi farklı optimizasyon hedeflerine sahip algoritmalar önerilmeye başlanmıştır.

Rejeneratif enerji kullanılarak enerji kazancını artırmak için, trenlerin istasyonlarda frenleme veya istasyondan ivmelenme anlarındaki örtüşmelerinin en fazla olması hedeflenir. Bunu sağlamak üzere, trenlerin zaman çizelgeleri üzerinde çalışılabilir. Öte yanda, zaman çizelgelerinde en iyileştirme işlemi karışık ve elle yapılması mümkün olmayan bir NP problemidir.

Zaman çizelgesinde en iyileştirme amaçlı birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan birinde, Ramos ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada trenlerin hızlanma ve frenleme zamanlarının örtüşmesinin maksimum olmasını sağlayacak şekilde zaman çizelgesinde optimizasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında genetik algoritma kullanmışlardır [5]. Benzer biçimde Nasri ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada istasyonda bulunan iki treni koordine etmek için en iyi (optimum) yedek (reserve) zaman aralığını bulmak istemiş ve bunun için çalışmalarında genetik algoritmayı kullanmışlardır [6].

Albrecht (2010) ise yaptığı çalışmada, enerji tüketimini azaltmak için frenleyen ve ivmelenen trenlerin zaman tablolarını incelemiş, trenlerin istasyonlardaki bekleme sürelerini artırarak, trenlerin zaman tablolarını optimize etmiştir. Bu sayede, trenlerin çalışma zamanlarını en iyi şekilde planlayarak (koordine ederek), en uygun kombinasyonun bulunmasını sağlamıştır [7].

Yakın zamanda gerçekleşen bir diğer çalışmada Peña-Alcaraz ve arkadaşları (2012), zaman tablosu oluştururken istasyonlardaki değişken olan bekleme sürelerinin yerine, çalışma sürelerini göz önünde bulundurmıştır. Aynı trafodan

beslenen trenlerin hızlanma ve ivmelenme zamanlarının örtüşmeleri incelenmiştir. Geliştirilen model Madrid Metro hattında simüle edildikten sonra %7 oranında enerji tasarrufu gözlemlenmiştir [8].

Arturo Gonzalez-Gil ve Roberto Palacin (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, trenlerin rejeneratif frenleme enerjilerinden daha fazla yararlanabilmenin en önemli yolunun tarife optimizasyonundan geçtiği ve elektronik depolama sistemlerinin rejeneratif enerjinin kullanımı ve tasarruf için en verimli kullanım olduğu belirtilmiştir [9].

Genetik algoritma kullanan bir diğer çalışmayı, Yang ve arkadaşları (2013) aynı hatta aynı yöne giden trenler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu çalışma Pekin Yizhuang metro hattında simüle edilmiş, trenlerin ivmelenme ve frenleme örtüşmeleriyle rejeneratif frenleme enerjisinden kazanılan enerjinin en yoğun saatlerde %22, normal saatlerde ise %15,2 arttığı gözlemlenmiştir [10]. Yang ve arkadaşları (2014) önceki çalışmalarının aksine yeni bir yaklaşımda bulunmuştur. Bu çalışmalarında aynı hatta bulunan fakat farklı yönere giden trenler üzerindeki trenlerin ivmelenme ve frenleme zamanlarındaki örtüşmeyi incelemişlerdir. Yine genetik algoritma kullanılarak yaptıkları çalışma sonucunda edilen enerji kazancının %8,8 oranında olduğu tespit etmişler [11].

Zhao ve arkadaşları (2014) tarafından, metro sistemlerinde zaman çizelgelerini optimize etmek için yaklaşımlı bir optimizasyon modeli önermiştir. Bu modelde amaç, çakışma süresi ile ölçülen rejeneratif enerji ile, enerji kazanımını en üst düzeye çıkarmak ve diğer yaklaşım ise toplam yolculuk süresini en aza indirerek yolcu memnuniyetini artırmaktır. İki hedef ağırlıklandırma yolu ile bir araya getirilmiş ve optimum zaman çizelgesini gerçekleştirmek için Benzetilmiş Tavlama (SA) yöntemi kullanılmıştır [12].

Gong ve arkadaşları (2014) tarafından yakın zamanda gerçekleştirilen diğer bir önemli çalışmada, bekleme süresi kontrolü ile rejeneratif enerji kazanımını en üst düzeye çıkarmak için bir zaman çizelgesi optimizasyon modeli sunulmuşlardır. Ayrıca, istenmeyen bir durum oluştuğunda tren işletiminin planlanan zaman çizelgesine dönmelerini sağlamak için telafi edici bir sürüş stratejisi algoritması önermişlerdir. Optimum bir çözüm bulmak için Genetik Algoritma kullanmışlardır [13].

Enerji verimliliğinin artırılması için yapılan çalışmalardan biri de trenlerin işletme tarafından daha etkin kullanılmasıdır. Xiang Li ve Hong K. Lo (2014) yaptıkları çalışmada günlük metro işletilmesinde, enerji tüketimini en aza indirerek tarife ve hız profillerinin yolcu taleplerini karşılayacak şekilde olmasını sağlayarak gerçekleşeceğini öne sürmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada dinamik tren zaman çizelgeleri oluşturmuşlardır. Öncelikle yolcuların taleplerini öngörme ve tek veya çift yön sefer sürelerini belirlemişler, bir sonra ki tren turu için aynı süreleri belirtilen kistaşlara uygun olarak optimize etmişlerdir. Başlangıçta güzergah kısıtlarına bağlı tren sefer aralıkları, tren hızlanma için harcanan çekiş enerjisini azaltmak için düzenlenmiştir. Bu çalışma Yizhuang hattı (Pekin metrosu)'nda uygulanmış ve sistemin enerji tüketiminin 11% azaldığı tespit edilmiştir. En yoğun sefer saatlerinde, dinamik tarife çizelgeleri ile 7% daha verimli olduğu ortaya konmuştur [14].

Xu ve arkadaşları (2016) mevcut çalışmalardan farklı olarak, çalışma süresini ve her istasyonda kalma süresini kontrol ederek yolcu süresini ve kullanılan enerjiyi en aza indirmek için, objektif bir model geliştirmiştir. İki hedefi bir araya getirmek

için doğrusal ağırlıklı uzlaşma yaklaşımı ve bulanık doğrusal programlama yaklaşımı geliştirmiş ve optimizasyon problemini çözmek için Genetik Algoritmadan faydalanmışlardır [15].

Bu alanda ülkemizde yapılan önemli bir çalışma, İbrahim Demirci'nin 2018 yılında gerçekleştirmiş olduğu genetik algoritmadır. Çalışmada, istasyon bekleme sürelerinde değişiklik yapılarak rejeneratif enerji tasarrufu sağlamak amaçlanmıştır. Genetik algoritma kullanarak trenlerin hızlanma ve frenleme anlarındaki örtüşme oranının en fazla olması hedeflenmiş, en iyi zaman çizelgesi oluşturulmaya çalışılmıştır. Yapılan bu çalışma, Metro İstanbul Hatlarından olan Kadıköy-Kartal hattında uygulanmıştır. Çalışma sonucunda normal saatlerde rejeneratif frenleme ile enerji kazanımının %14'den %30'lara çıktığı ve yolcu yoğunluğunun en fazla olduğu saatlerde bu oranın %46'dan %60'a çıktığı gözlemlenmiştir [16].

Literatürde raylı sistemlerde oluşan rejeneratif enerjiden faydalanmak için birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu makalede açıklanan çalışma, İbrahim Demirci tarafından daha önce gerçekleştirilen araştırmanın devamı niteliindedir. Önerilen yöntemde, genetik algoritma kullanılarak hatta ortaya çıkan rejeneratif enerjinin kullanımını maksimum yapacak en iyi zaman çizelgesinin bulunması hedeflenmiştir. Zaman çizelgesi en iyileştirilirken istasyon bekleme sürelerinin minimum ve maksimum bekleme süreleri göz önüne alınmıştır. Bekleme sürelerinde gerçekleşecek değişim miktarı, bekleme süreleri için ayrılan süreyi geçmeyecek şekilde düzenlenmiştir. Çalışmada farklı genetik algoritma parametreleri kullanılarak zaman çizelgesinde en iyileştirme sağlanmıştır. Çalışmada uygulanan farklı genetik algoritma yöntemleri sonucu, enerji kazancı yaklaşık olarak %78'lere ulaşmıştır (referans makale %60). Bu sonuç, daha önce yapılan çalışmadan %30 daha fazla verimli bir modele ulaşıldığını göstermektedir.

Makalenin 2. Bölümünde ilgili kavramlardan, 3. Bölümde algoritma ve gerçekleştirilen sistemin modelinden ve 4. Bölümde sonuç ve daha sonra bu çalışmadan yola çıkılarak yapılabilecek başka çalışmalara yönelik fikirlerden bahsedilmektedir.

2. İlgili Kavramlar

2.1. Raylı Sistem Araçlarında Enerji Tüketimi

Raylı sistem araçlarında enerji tüketimi işletmeden işletmeye göre değişim gösterebilir. İşletmeler de enerji tüketimine sebep olan birden fazla faktör bulunmaktadır. Raylı sistemlerde araçlarında enerji tüketimi, zamana, hattaki trenlere, yolcu sayısına, hattın geometrisine, trenin hızına vb. bağlı olarak sürekli değişmektedir.

Araçlar frenleme esnasında hatta bulunan katenerden aldıkları enerjinin %42'sini elektrik enerjisine çevirmekte, frenlemesi ile oluşan enerjinin yaklaşık olarak %27'si katener sistemine geri vermektedir. Frenleme esnasında oluşan enerjinin %15'lik bir kısmı ise rezistörlerde yakılarak harcanmaktadır [17].

2.2. Raylı Sistem Araçlarında Enerji Tüketimi

Rejeneratif frenleme enerjisi raylı sistem araçlarının enerji tasarrufu için en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken asıl husus frenlemeye geçen aracın üretmiş olduğu enerjinin kendi iç direnci ile yakılmadan önce kullanmasıdır.[18] Araçlar frenleme esnasında kinetik

enerji oluşturur ve bu enerji elektrik enerjisine çevrilir ve daha sonra trafoya iletilir. Kazanılan enerji istasyonlarda aydınlatma, havalandırma ve ısıtma gibi alt yapı sistemleri tarafından kullanılabilir. Aynı zamanda bu enerji araç-üstü sistemlerine iletilebilir ve araç tarafından yardımcı konfor fonksiyonları için kullanılabilir. Açığa çıkan enerji aracın talep ettiği konfor fonksiyonları enerjisinden daha fazladır. Bu durumda kazanılan enerjinin hepsi kullanılmamış ve boşa gitmiş olur. Kazanılan bu enerjiyi tekrar kullanma yollarından bir diğeri ise o anda hatta bulunan ve ivmelenmekte olan araca trafo tarafından iletilesidir.

Rejeneratif frenleme enerjisi frenlemeye başlama hızına ve cer gücü dağıtım sisteminin alabilirliğine bağlıdır. Frenlemeye başlama hızının düşük olması halinde rejeneratif enerji fren talebini ancak karşılayabilmektedir. Fren giriş hızının yüksek olması durumunda ise, mekanik ve elektrik fren kombinasyonu gereklidir. Bunun nedeni motorun gerekli olan fren kuvvetini sağlama açısından yetersiz kalmasıdır. Frenlemeye başlama hızı arttıkça mekanik fren oranı artar, mekanik fren oranının artması ile rejeneratif enerji kazanımı ters orantılı olduğundan enerji kazanımı azalır. Rejeneratif enerjinin kazanımının maksimum olması için, frenlemeye başlama hızının yüksek ve düşük karakteristikte motor kullanılmasını gerekmektedir [19]. Aynı zamanda rejeneratif enerji ile kazanılacak toplam enerji, frenleme yapan araçların sayısı, araçların kurulu gücü ve frenleme sıklığı gibi parametrelere de bağlıdır[20].

2.3. Zaman Çizelgesi

Tren zaman çizelgeleri oluşturulurken yolcuların ihtiyaçlarına uygun hizmet verecek şekilde olmalıdır. Sefer aralıkları yolcu yoğunluğu ve yolcuların talebine göre oluşturulurken işletmenin bunu karşılayacak nitelikte olmasına dikkat edilmelidir. Trenler için oluşturulan zaman çizelgelerinden (sefer planlaması yapılırken) hedeflenen, hangi trenin ne zaman ve nerede olacağını, hangi istasyonda ne kadar süre beklemesi gerektiğinin ve oluşabilecek gecikmelerin tolere edilmesi için yedek zaman aralıklarının belirlenmesidir.

Tren zaman çizelgelerinin kullanımı ilk olarak Charnes ve Miller (1956) tarafından yük treni hareketlerinin çizelgelemesinde dinamik programlama modeli kullanılması ile başlamıştır. [21]

Lee ve Chen (2003), tren zaman çizelgeleme probleminde genetik algoritma ile 2 çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Seyyar satıcı problemi kullandıkları matematiksel programlama modelini geliştirmişlerdir ve sonuçları çözüm süreleri açısından kıyaslamışlardır. [22]

Ghoseiri ve Morshedsolouk (2006), tren zaman çizelgeleme problemlerinde karınca kolonisi algoritması kullanarak küçük ve orta boyutlu problemlerde çözümler geliştirmişlerdir. Sonuçları seyyar satıcı problemi modeli ile karşılaştırmışlardır.[23]

Dünder ve Şahin (2013), tren zaman çizelgesinde uyumsuzluk çözümü için genetik algoritma (GA) kullanmışlardır. Çalışmalarını yapay sinir ağları algoritması ile kıyaslamışlar ve küçük ölçekli sorunlar için toplam gecikme süresini azaltmayı başarmışlardır.[24]

Rejeneratif enerjinin kazanımı ile zaman çizelgeleri birbiriyle yakından ilişkilidir. İvmelenen ve frenleyen trenlerin örtüşmesini artırmak için zaman çizelgelerinde optimizasyon yapılması gerekmektedir. İki tren arasındaki mesafe 3 dakika ve altında ise frenleme esnasında oluşan enerjinin %85 ile, %95'i

diğer alıcı trenler tarafından kullanılmaktadır[24]. Yapılan çalışmalarda trenler arasındaki sürenin daha fazla olduğu zaman aralıklarında rejeneratif enerjinin büyük kısmının fren rezistörlerinde yakıldığı görülmüştür[25].

Rejeneratif frenleme ile oluşan enerjinin kullanılmasını artırmak için trenlerin ivmelenme ve frenleme zamanlarının koordinasyonunun sağlanması gereklidir. Bunu başarmanın en etkin yollarından biri, istasyonda bekleme sürelerinin, trenlerin ivmelenme ve frenleme zamanlarına maksimum denk getirilecek biçimde düzenlenmesidir.

Tren zaman çizelgeleri bekleme sürelerinde yapılacak değişiklikler üzerine kurulmuştur. Trenlerin seferleri için zaman tablosu oluşabilecek gecikmeler (arızalardan veya yolculardan kaynaklı) düşünülerek oluşturulmalıdır. Bu gecikmeleri tolere etmek için zaman çizelgelerine maksimum bekleme süreleri eklenir. Bu ilave bekleme süreleri ile birlikte istasyon bekleme sürelerinin de kullanılmasıyla, enerji verimi elde edilecek sürüşler planlanabilir. [26].

2.3. Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan meta sezgisel yöntemlerden biridir. Bu yaklaşım ilk olarak Holland tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır. Biyolojik sistemdeki evrim sürecine benzeyen bir arama, en iyi çözümü bulma ve optimizasyon yöntemidir. Optimizasyon problemlerinde kullanılan genetik algoritmalar hızlı ve en iyi çözümün elde edilmesini sağlamıştır.[27].

Genetik algoritmalar karmaşık problemlerin hızlı ve en iyiye yakın olarak çözülmesini sağladıklarından sıklıkla tercih edilir. Bu algoritma sayesinde büyük çözüm uzayına sahip problemler için kısa sürede çözüme ulaşılabılır. Kısa sürede en iyi çözüme ulaşması ve global çözüm bulma yönünden başarılı olmasına rağmen, yerel çözüm bulmada başarılı oldukları söylenemez [28].

Genetik algoritmada ilk olarak problemin parametrelerine uygun olacak şekilde kromozomlar kodlanarak oluşturulur. Problem değişkenine uygun olarak seçilen genlerin bir araya gelmesi ile birey kromozomları, birden fazla bireyin bir araya gelmesi ile popülasyon oluşturulur. İlk popülasyon genellikle rastgele oluşturulur. Popülasyonu oluşturan kromozomların her biri problemin çözümü için birer adaydır. Oluşan popülasyonda en iyi sonucu verecek bireyi belirlemek için iyilik fonksiyonuna (fitness function) ihtiyaç vardır. İyilik fonksiyonu her probleme özgü bir şekilde belirlenir. Belirlenen iyilik fonksiyonunun değerine göre en iyi çözüm belirlenir. Bir döngü sonucunda oluşturulan yeni bireylerden en iyileri “elit bireyler“ (elite chromosome) bir sonraki nesile doğrudan aktarılır. Bireylerde ki kromozomlar “çaprazlama”(crossover) ve “mutasyon” (mutation) operatörlerine tabii tutularak yeni bireyler elde edilir. Bu işlemde amaç daha iyi kromozomlar elde etmektir. Tüm bu işlemler, istenen yineleme sayısı boyunca veya tanımlanan hata eşliğine ulaşılan kadar tekrarlanır ve her döngü sonucunda yeni nesiller oluşturulur. Bütün bu işlemler gerçekleşirken popülasyon sayısı genelde sabit tutulur [28].

2.4.1. Çaprazlama

Çaprazlama operatörü genetik algoritmadaki en önemli operatörlerden biridir. Seçilen iki ebeveynin çaprazlanması sonucunda yeni bireyler oluşturulur. Çaprazlama işleminde amaç yeni bireyler oluşturmaktır. Bunun nedeni ise mevcut ebeveynlerin uygunluk değerinden daha yüksek iyilik

fonksiyonu değerine sahip yeni bireyler elde etmektir. Çaprazlama operatörü incelendiğinde birden fazla çaprazlama yöntemi mevcut olduğu görülmektedir. Bu yöntemlerden en kolayı tek noktadan çaprazlama yöntemidir. Tek noktadan çaprazlama da, seçilen çaprazlama noktasına kadar genler bir ebeveynden alınırken, kalan genler ise diğer bir ebeveynden alınarak yeni birey oluşturulması prensibine dayanır. Diğer bir yöntem ise yine sıklıkla tercih edilen çift noktadan çaprazlamadır. Çift noktadan çaprazlama, tek noktadan çaprazlamaya benzemektedir ama çaprazlama noktaları rastgele belirlenir. Yeni birey ilk noktaya kalan olan genleri bir ebeveynden alırken ikinci çaprazlama noktasına kadar olan genleri diğer ebeveynden alır ve sırayla diğer genler iki ebeveynden elde edilir. Çaprazlama işlemi olarak bu yöntemler haricinde “Pozisyona Dayalı Çaprazlama”[29], “Kısmi Planlı Çaprazlama”[30], “Sıraya Dayalı Çaprazlama”[31] gibi yöntemler de kullanılmaktadır.

2.4.2. Mutasyon

Genetik algoritmada kullanılan diğer bir operatör ise mutasyon operatörüdür. Bu operatör genetik çeşitliliğin sağlanması açısından oldukça önemlidir. Çaprazlama işlemi uygulandıktan sonra yeni oluşan kromozomların genlerinden bir veya birkaç tanesi değiştirilerek yeni kromozomlar elde edilmiş olur. Örnek olarak gezgin satıcı probleminde mutasyon işlemi seçilen iki genin birbiriyle yer değiştirmesi sonucunda yeni bireyin oluşması ile gerçekleştirilmiş olur. Bu operatör genlere düşük bir oranda uygulanır. Mutasyon oranının düşük olmasından dolayı etkileri kromozomlarda az hissedilir.

2.4.3. Elitlik

Elitlik, en yüksek iyilik fonksiyonu değerine sahip kromozomun bir sonraki nesle aktarılmasıdır. Bir popülasyonda genetik algoritma operatörlerinden çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin sırasıyla uygulanması sonucunda probleme özgü belirlenen iyilik fonksiyonunun değeri hesaplanır. Böylelikle en yüksek değere sahip iyilik fonksiyonunu veren kromozom belirlenir ve elit birey olarak bir sonraki nesle aktarılır.

2.4.4. Yeni Neslin Oluşturulması

Kromozomlar üzerinde çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin sırasıyla uygulanmasıyla yeni bireyler elde edilir. Elde edilen yeni bireylerin kromozom iyilik değerleri, popülasyondaki mevcut bireylerin kromozom iyilik değerleri ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda eğer yeni kromozomun iyilik değeri mevcut kromozomlardan iyilik değeri en kötü olandan daha yüksek olduğu takdirde, mevcut kromozom popülasyondan çıkarılır ve yerini yeni kromozom alır. Bu işlem istenilen nesil sayısı kadar veya durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder.[32]

3. Önerilen Yaklaşım

Uygulamada hedeflenen rejeneratif enerjiden kazanılan enerjinin maksimum olmasını sağlamaktır. Bu ise ivmelenen trenler ile frenleyen tren sayısındaki örtüşmenin maksimum olması ile gerçekleşir. Bu örtüşmeyi maksimum yapabilmek için trenlerin bekleme sürelerinde değişiklik yapılarak en iyi çözümün bulunması hedeflenir. En uygun zaman çizelgesini bulabilmek elle yapılması zor bir NP problemidir. Bu sebepten ötürü otomatik olarak oluşturulması önemlidir. Bu amaçla genetik algoritma kullanılmıştır.

3.1. İlk Popülasyonun Belirlenmesi

Problem de kullanılacak değişken istasyon bekleme süreleridir. Bu sebepten popülasyon istasyon bekleme sürelerinden oluşmaktadır. Problemin büyüklüğü göz önüne alınarak başlangıç popülasyonu 20 bireyle oluşturulmuştur. Kromozom oluşturulurken dikkat edilmesi gereken önemli husus, istasyon bekleme sürelerindeki kısıttır. Bir trenin istasyon bekleme süresinin normal değeri 20 saniye olarak belirlenmiştir fakat trenlerin istasyonda bekleyebileceği minimum ve maksimum süreler ise sırasıyla 15 ve 25 saniyedir. Popülasyon oluşturulurken bekleme sürelerinin bu aralıkta olmasına dikkat edilmelidir.

Popülasyonun ilk bireyleri oluşturulurken, her istasyondaki bekleme süresini en iyileştirmek üzere, minimum (-5) ve maksimum (+5) değer aralığında rastgele bir tam sayı seçilir. Mevcut istasyon sayısı (38) kadar gen kullanılarak bireyin kromozomu oluşturulur.

3.2. İyilik Fonksiyonunun Oluşturulması

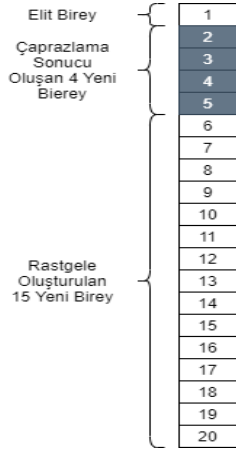
Uygulama simülasyonun her t birim zamanı için (1 saniye) trenlerin anlık durum bilgisi bir listede tutulmaktadır. Bu listede trenin t anında; ivmelenmede, frenlemede, boşta gitmekte ve beklemede olmak üzere 4 ayrı durumu tutulmaktadır. Bu listeler aracılığı ile simülasyon süresindeki herhangi bir t anında ivmelenen ve frenleyen trenlerin süresi bulunabilir. Listelerden elde edilen ivmelenen ve frenleyen tren sayıları arasında karşılaştırma işlemi yapılır. Bu karşılaştırma sonucu ivmelenen ve frenleyen tren sayılarından minimum olanı bize maksimum rejeneratif enerji kullanımını ifade eder. Bir örnekle açıklayacak olur isek; 360. saniyede frenleyen tren sayısı 8 iken, ivmelenen tren sayısı 5 ise 360. saniyede örtüşen tren sayısı 5 olarak (rejeneratif enerji kazancı 5 tren için sağlanır) bulunur.

Bu işlem simülasyon boyunca, zaman çizelgesinin her t birim zamanında uygulanır ve toplam örtüşen tren zamanı elde edilir. Bir kromozomun iyilik değeri, simülasyon boyunca frenleme ve ivmelenme zamanları örtüşen trenlerin toplam zamanının, tüm trenlerin toplam frenleme zamanına bölünmesi ile elde edilir. Bunu bir örnek ile açıklayacak olur isek; simülasyon süresinin 27000 saniye olduğunu varsayarsak ve trenlerin toplam frenleme yaptıkları sürenin 153672 saniye ve örtüşen trenlerin toplam zamanının 98569 saniye olması durumunda iyilik değeri %64 (98569/153672) olarak hesaplanmış olur.

3.3. Popülasyonun Diğer Bireylerinin Belirlenmesi

3.3.1. Elit bireyin belirlenip bir sonraki nesle aktarılması

İlk popülasyonda bireyler rastgele oluşturulur. Oluşturulan bireyler iyilik fonksiyonuna göre büyükten küçüğe göre sıralanır. En yüksek iyilik fonksiyonu değerine sahip olan birey bir sonraki nesle elit birey olarak aktarılır. Algoritmadaki elit bireylerin seçilme oranı ise %5 olarak belirlenmiştir (popülasyonda toplam 20 birey bulunmaktadır). Yerel maksimumlarda kalma riskini azaltmak üzere, elitlik oranı düşük tutulmuştur. Yeni nesil bireylerinin mevcut popülasyondan oluşturulma şeması Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Yeni neslin mevcut popülasyondan oluşturulma şeması

3.3.2. Çaprazlama Operatörünün Uygulanması İle Yeni Bireylerin Oluşturulması

İyilik fonksiyonuna göre sıralandıktan sonra en yüksek sonucu veren birey ($20 \times 0,05 = 1$) elit olarak bir sonraki nesle aktarılır. Daha sonra popülasyondaki diğer 4 birey çaprazlama yolu ile oluşturulur. Popülasyon büyüklüğü 20 olarak seçildiğinden diğer 15 birey rastgele olarak oluşturulur. Bu bireyler istasyonlardaki toplam bekleme süresi değişimi sıfır olacak şekilde oluşturulur. Rastgele bireylerin çok olması en iyi aramayı hızlandırır da öğrenmeyi yavaşlatmaktadır. Rastgele oluşturulan bireylerin fazla olması ise bizi yerel maksimum noktadan çıkarabilmektedir.

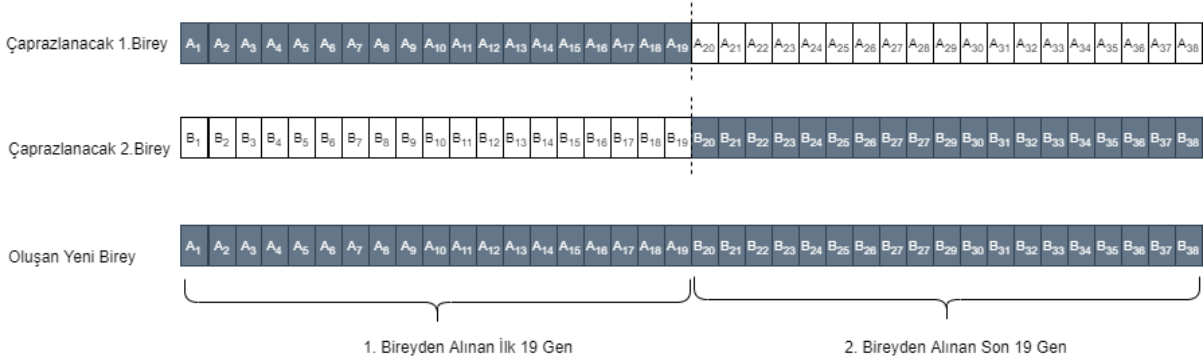
Çaprazlama için tek noktadan çaprazlama yöntemi tercih edilmiştir. Çaprazlanacak bireyler iyilik fonksiyonuna göre

sıralanan bireyler arasından seçilmektedir. İyilik değeri en yüksek olan birey elit olarak aktarılır. Sıralamadaki diğer 4 birey ise atılır. 6,7,8,9 numaralı bireyler çaprazlama için seçilir (öğrenmeyi az tutmak üzere). Seçilen bu bireyler ile çaprazlanacak diğer 4 aday olarak, iyilik değeri en düşük sonucu veren 17,18,19,20 numaralı bireyler seçilir. Popülasyonda yeni nesil için çaprazlama uygulama yöntemi Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Yeni nesil için çaprazlama uygulama yöntemi

Çaprazlama algoritmasında toplam 38 istasyon olduğundan 38 gen bulunmaktadır. Çaprazlama için tek noktadan mutasyon yöntemi seçildiğinden ilk 19 gen bir bireyden alınırken diğer 19 gen başka bireyden alınmaktadır böylelikle çaprazlama sonucunda yeni birey elde edilmiş olur. Tek noktadan çaprazlamanın nasıl uygulandığı Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Tek noktadan çaprazlama

Çaprazlama işlemi sonucu istasyon bekleme sürelerindeki toplam değişimin sıfır olması kuralının dışına çıkmış olabilir. Çaprazlama sonucunda toplam istasyonda bekleme süresi sıfır olmayan bireyler mevcut ise bu bireyler üzerinde mutasyon operatörü uygulanır.

3.3.3. Mutasyon Operatörünün Uygulanması İle Yeni Bireylerin Oluşturulması

Çaprazlama operatörünün uygulanması sonucu oluşturulan bireylerin kromozomlarında toplam bekleme süresi değişiminin sıfır olması istenmektedir. Mutasyon operatörü, istasyonlarda bekleme süresi toplamındaki değişimin sıfır olmadığı durumlarda uygulanmaktadır. İstasyon bekleme sürelerindeki

toplam değişim değeri hesaplanır ve değer bir değişkende tutulur. Bu değişkenin değerine göre 3 durum söz konusudur;

1. Durum : Toplam bekleme süresindeki değişim sıfırdan küçük ise;

Bekleme süresinde eksilen zaman (değişkende tutuluyor), negatif değerli olan genlere (istasyonlara) uygulanır. İlk genden başlayarak sırasıyla değişken sıfır olana kadar tüm negatif genlere 1 eklenir. Bir tur geçildiyse ve halen değişken sıfır değil ise, bu işlem tekrarlanır.

2. Durum : Toplam bekleme süresindeki değişim sıfırdan büyük ise;

Bekleme süresinde artan zaman, pozitif değerli olan genlere uygulanır. İlk genden başlayarak sırasıyla değişken sıfır olana

kadar tüm pozitif genlerden 1 eksiltilir. Bir tur geçildiyse ve halen değişken sıfır değil ise, bu işlem tekrarlanır.

3. Durum : Toplam bekleme süresindeki değişim sıfıra ise;

Bekleme süresindeki toplam değişimin sıfır olması istendiğinden bu durumda mutasyon operatörü uygulanmaz.

3.3.4. Genetik Algoritmanın Sonlandırılması

Genetik algoritmalar iki şekilde sonlandırılabilir. Bunlardan ilki iyilik değerinin istenilen uygunluk değerine ulaşması (hatanın minimuma indirgenmesi), diğeri ise belirlenen tekrar sayısının tamamlanması ile. Hata değeri belirsiz olduğundan, deneysel olarak belirlenen en iyi tekrar sayısı kullanılmıştır.

Bu çalışmada, veri seti olarak Metro İstanbul hatlarından Kadıköy-Kartal hattının verileri kullanılmıştır. Bu hatta kullanılan trenlerin frenleme, ivmelenme, boşta gitme sürelerinin toplamı ile toplam yolculuk süresi 3597 saniyedir. Elde edilen bu süreye istasyonlarda toplam bekleme süresi toplamı olan 960 saniye eklendiğinde, bir trenin toplam parkur süresi 4557 saniyedir.

Simülasyonda gerçeğe yakın olarak toplam 18 trenin kullanıldığı öngörülmüştür. Ayrıca iki tren arasındaki mesafe 273 saniye ve toplam simülasyon süresi 18000 saniye olarak uygulanmıştır. Simülasyon tüm trenler işletilmeye başladığı andan itibaren başlatılmıştır.

Genetik algoritmanın 10 tekrar boyunca uygulanması sonucunda yaklaşık %76, 50 tekrar sonucunda %78 civarında bir enerji kazancı sağladığı gözlemlenmiştir. Tekrar sayısı daha fazla kullanıldığında, sonuçlar değişmemiştir. Referans alınan çalışmadaki [16] enerji kazancı miktarı %60 iken, önerilen yaklaşım ile yaklaşık %30 daha fazla enerji tasarrufu sağlandığı görülmektedir.4. Sonuç ve Öneriler

Gerçekleştirilen bu çalışma ile raylı sistemlerde kullanılan rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum fayda sağlayarak enerji tasarrufunun artırılması hedeflenmiştir. Rejeneratif frenleme enerjisi bir trenin frenlerken oluşturduğu enerjiyi hatta alıcı konumunda bulunan o an ivmelenen başka bir trene iletmesi ile gerçekleşmektedir. Bir hatta frenleyen tren sayısı ile ivmelenen tren sayısı ne kadar fazla eşleşirse rejeneratif enerjinin kullanımı da o kadar fazla olmaktadır. Çalışmada önerilen modelde, ivmelenen ve frenleyen trenlerin örtüşmesinin maksimum olmasını sağlamak üzere istasyon bekleme sürelerinde optimizasyon yapılmıştır. Genetik algoritma kullanarak enerji kazanımını maksimum yapacak istasyon bekleme süreleri bulunmuştur. Uygulama C# programlama dili ile kodlanarak geliştirilmiştir.

İstasyon bekleme süreleri belirlenirken gerçek uygulamada baz alınan iki kurala dikkat edilmiştir. İlk kural her istasyonda yeni bekleme süresi, mevcut bekleme süresinden minimum -5 eksik ve maksimum +5 fazla olabilir. Diğer kural ise, istasyonda bekleme sürelerinin toplamı, seyahat boyunca değişmemelidir.

Bu çalışma için Metro İstanbul hatlarından Kadıköy-Kartal hattı seçilmiş, önerilen model ile bu hattın verimliliğinin daha önce yapılan çalışmalara göre %30 daha fazla iyileştirilebileceği görülmüştür.

Makalede ayrıca bahsedildiği üzere, gelecekte hattı besleyen trafolar göz önünde alınarak, istasyon bölgelerine göre daha detaylı ve gerçekçi modelleme yapılabilir. Algoritmada kullanılan çarpazlama ve mutasyon operatörlerinde farklı

yaklaşımlarda bulunarak yeni modeller oluşturulabilir. Ayrıca istasyon bekleme sürelerindeki kısıt değerleri değiştirilerek sonuçlar gözlemlenebilir.

Kaynakça

- [1] González-Gil, A., Palacin, R., Batty, P., & Powell, J. P. (2014). A systems approach to reduce urban rail energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 80, 509-524.
- [2] Chen, J. F., Lin, R. L., and Liu, Y. C., 2005: Optimization of an MRT train Schedule: Reducing maximum traction power by using genetic algorithms . *Transactions on Power Systems*. Vol. 20, no. 3, pp. 1366- 1372.
- [3] Adinolfi, A., Lamedica, R., Modesto, C., Prudenzi, A., and Vimercati, S., 1998: Experimental assesment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. *Transactions on Power Delivery*. Vol. 13, no. 4, pp. 1536-1542.
- [4] Amit, I., & Goldfarb, D. (1971). The timetable problem for railways. *Developments in Operations Research*, 2(1), 379-387.
- [5] Ramos, A., Pena, M. T., Fernández, A., & Cucala, P. (2008). Mathematical programming approach to underground timetabling problem for maximizing time synchronization. *Dirección y Organización*, (35), 88-95.
- [6] Nasri, A., Moghadam, M. F., & Mokhtari, H. (2010, June). Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems. In *SPEEDAM 2010* (pp. 1218-1221). IEEE.
- [7] Albrecht, T. (2010). Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control. *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, 39.
- [8] Peña-Alcaraz, M., Fernández, A., Cucala, A. P., Ramos, A., & Pecharromán, R. R. (2012). Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(4), 397-408.
- [9] González-Gil, A., Palacin, R., & Batty, P. (2013). Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy conversion and management*, 75, 374-388.
- [10] Yang, X., Li, X., Gao, Z., Wang, H., & Tang, T. (2012). A cooperative scheduling model for timetable optimization in subway systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(1), 438-447.
- [11] Yang, X., Ning, B., Li, X., & Tang, T. (2014). A two-objective timetable optimization model in subway systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(5), 1913-1921.
- [12] Zhao, L., Li, K., & Su, S. (2014). A multi-objective timetable optimization model for subway systems. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT2013)-Volume I* (pp. 557-565). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [13] Gong, C., Zhang, S., Zhang, F., Jiang, J., & Wang, X. (2014). An integrated energy-efficient operation methodology for metro systems based on a real case of Shanghai metro line one. *Energies*, 7(11), 7305-7329.

- [14] Li, X., & Lo, H. K. (2014). Energy minimization in dynamic train scheduling and control for metro rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 269-284.
- [15] Xu, X., Li, K., & Li, X. (2016). A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption. *Journal of Advanced Transportation*, 50(1), 69-95.
- [16] Demirci, I. E., & Celikoglu, H. B. (2018, November). Timetable Optimization for Utilization of Regenerative Braking Energy: A Single Line Case over Istanbul Metro Network. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 2309-2314). IEEE.
- [17] Amalgamated Report, UITP "Reducing Energy Consumption in Underground Systems, International Metropolitan Railways Committee, , www.uitp.org, 1995
- [18] Cornic, D. (2010, October). Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation. In *Electrical systems for aircraft, railway and ship propulsion* (pp. 1-9). IEEE.
- [19] Günselmann, W., & Godbersen, C. (2001). Double-layer capacitors store surplus braking energy. *Railway Gazette International*, 1, 581.
- [20] Açıkbaş, S. ve Alataş A., 2006: Raylı Sistemlerde Enerji Verimli Sürüş. In *Türkiye 10. Enerji Kongresi*, 29 Kasım
- [21] Charnes, A., & Miller, M. H. (1956). A model for the optimal programming of railway freight train movements. *Management Science*, 3(1), 74-92.
- [22] Lee, C. K., & Chen, C. H. (2003). Scheduling of train driver for Taiwan railway administration. *Journal of Eastern Asia Society of Transportation Studies*, 5, 292-306.
- [23] Ghoseiri, K., Szidarovszky, F., & Asgharpour, M. J. (2004). A multi-objective train scheduling model and solution. *Transportation research part B: Methodological*, 38(10), 927-952.
- [24] Dündar, S., & Şahin, İ. (2013). Train re-scheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single-track railways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 1-15.
- [25] Martin, P., 1999: Train performance and simulation. In *Winter Simulation Conference*
- [26] Açıkbaş, S., 2008: Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- [27] Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 560 University of Michigan Press. Ann Arbor, MI, 561.
- [28] Gonzalez, E. L., & Fernandez, M. A. R. (2000). Genetic optimisation of a fuzzy distribution model. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- [29] Murata, T., Ishibuchi, H., & Tanaka, H. (1996). Genetic algorithms for flowshop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 30(4), 1061-1071.
- [30] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search. Optimization, and Machine Learning*.
- [31] Syswerda, G. (1991). Scheduling optimization using genetic algorithms. *Handbook of genetic algorithms*.
- [32] Yeo, M. F., & Agyei, E. O. (1998). Optimising engineering problems using genetic algorithms. *Engineering Computations*.