

TREN RAYLARINDAN ENERJİNİN GERİ KAZANIMI İÇİN GENETİK ALGORİTMA İLE ZAMAN-PLANI OPTİMİZASYONU

Büşra TURAL *^{ID}

Metin TURAN **^{ID}

İbrahim Ethem DEMİRCİ ***^{ID}

Alınma: 11.02.2020; düzeltme: 26.01.2021; kabul: 11.02.2021

Öz: Bu makalede, Metro İstanbul araçlarından zaman planı uyarlanarak maksimum enerji kazanımının optimize edilmesine yönelik araştırma sonuçları paylaşılmıştır. Yeniden enerji kazanımı (rejeneratif enerji), elektromanyetik frenleme yapan trenlerin ürettiği enerjiyi hatta hareket etmeye hazır durumunda bulunan diğer trenlere aktarması prensibine dayanmaktadır. Yeniden enerji kazanımı elde etmenin en etkili yollarından birisi, trenlerin istasyonlarda bekleme sürelerinde düzenleme yaparak zaman-planı en iyileştirmesinin gerçekleştirilmesidir. Bu oldukça karışık ve elle yapılması mümkün olmayan bir NP problemi olduğundan bu çalışmada bekleme sürelerini bulmak için genetik algoritma kullanılmıştır. Genetik algoritmalar, evrimsel sürece benzer şekilde çalışan arama ve en iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem çok boyutlu ve karmaşık uzayda en iyinin hayatta kalması ilkesine göre en iyi çözümü aramaya dayanır. Her tekrar sonunda en iyi birkaç elit birey bir sonraki nesle aktarılmıştır. Her tekrarda toplam birey sayısı sabit tutulmuş, diğer bireyler ise elit bireylerin çaprazlanması sonucu veya rastgele üretilmesiyle oluşturulmuştur. Agresif mutasyon işlemi, istasyon bekleme sürelerindeki değişimin sifıra eşit olmadığı durumlarda uygulanmıştır. Yapılan simülasyon sonucunda, genetik algoritma ile elde edilen yeni bekleme süreleriyle trenlerin hızlanma ve frenleme anlarındaki örtüşme, referans çalışmaya göre %26 civarında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Referans çalışmada %60 oranında olan trenlerin örtüşme anları bu çalışma ile %76 'ya kadar çıkartılmıştır.

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 research results for optimizing the maximum energy gain are shared by adapting the time plan of Metro Istanbul vehicles. Regenerative energy recovery is based on the principle that energy produced by the trains which make electromagnetic brake is transferred to the other trains that are ready to move. One of the ways to re-energize is to arrange the waiting times of the trains at the stations and to realize the time-plan optimization. Genetic algorithm was used to find station dwell times. Genetic algorithms are search and optimization methods that work similarly to the evolutionary process. This method is based on seeking the best solution according to the principle of survival of the best in multi-dimensional and complex space. At the end of each repetition, several of the best elite individuals were transferred to the next generation. For each repetition, the number of society individuals has been kept

* İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, 34840, Küçükyalı, İstanbul.

** İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, 34840, Küçükyalı, İstanbul.

*** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Maslak, 34467 Sarıyer, İstanbul.

İletişim Yazarı: Metin Turan (mturan@ticaret.edu.tr)

constant, while other individuals have been formed by crossing elite individuals or producing them randomly. Aggressive mutation was applied in cases where the change in station waiting times was not equal to zero. Result in of the simulation, around 26% better results compared to the reference study was obtained.

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

1. GİRİŞ

Günümüzde trafik sorunları ve fosil atıklardan kaynaklanan çevre sorunlarının artması ile birlikte toplu taşımaya verilen önem artmıştır. Toplu taşımının önem kazanması ile metro, hafif raylı sistem ve tramvay gibi ulaşım araçlarına talep artmıştır. Raylı sistemler araç, inşaat ve elektrik tüketimi bakımından yüksek maliyetli sistemlerdir. Maliyetlerin düşürülebilmesi ve projenin geri dönüş süresinin kısaltılabilmesi yeni yatırım kararlarının verilmesi açısından önemlidir. Projelerin geri dönüş maliyetlerini azaltıcı yöntemlerden biri işletme maliyetlerini oluşturan en önemli kalemlerden enerji tüketiminin en aza indirgenmesidir. Bununla birlikte, hali hazırda şehirlerdeki raylı sistemlerin tükettikleri enerji miktarları oldukça yüksektir. Daha verimli enerji tüketimi için, raylı sistemler üzerinde enerji tasarrufu ile ilgili en iyileştirme (optimizasyon) çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Sonuçta, küresel ısınmaya karşı çevreye fayda sağlamış olunurken, ayrıca işletmenin de tasarruf yapması sağlanmış olur. Metro İstanbul 'da 2017 yılında 160 km hat bulunurken, 2019 yılında mevcut hat uzunluğu 233 km'ye ulaşmış, yakın gelecekte ise bu rakamın 1100 km'ye ulaşması hedeflenmektedir. 2019 yılı sonunda elde edilen verilere göre İstanbul'daki tüm metro hatları tarafından tüketilen enerji 300 kWh' tır. Raylı sistemlerde enerjinin yaklaşık olarak yarısını araçlar kullanırken, kalan kısım istasyonlardaki asansörlerde, merdivenlerde, havalandırma ve aydınlatmada kullanılmaktadır.

Demir yolu sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak için akıllı istasyon tasarımları, araçların ağırlıklarının azaltılması, enerji verimli sürüş stratejileri ve enerji optimizasyonu gibi geleneksel çalışmalar yürütülmektedir (A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, ve J. P. Powell, 2014). Şehir içinde kullanılan metro, hafif metro ve tramvay gibi raylı sistem araçlarının iki istasyon arasındaki hızı 80-100 km/h'dir. Bu araçların hareket süreçleri üç aşamadan oluşmaktadır. Yüksek enerji gücü isteyen ivmelenme/hızlanma aşaması, daha düşük enerji gücü isteyen boşa gitme aşaması ve aracın rejeneratif enerji ürettiği frenleme aşamasıdır (Chen, J. F., Lin, R. L., ve Liu, Y. C., 2005).

Bu üç süreç göz önünde bulundurulduğunda yapılabilecek önemli tasarruflardan biri, araçların boşa sürüş tekniği ile maksimum kullanılarak enerji verimliliğinin sağlanmasıdır. Bu yöntemde, araç iki istasyon arasında maksimum hıza ulaştıktan sonra, motorlar kapatılarak aracın sahip olduğu momentum ile birlikte hareketine devam etmesi sağlanmış olur (Wong, K. K., ve Ho T. K., 2004). Wong ve Ho'nun (2004) uyguladıkları bu yöntemle makinist kabinlerine uyarıcı sistem kurmuş, Hong Kong KCRC ve Singapur MRT 'de çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalar sonucunda Hong Kong KCRC ile %3 e varan bir enerji kazancı sağlamıştır. Bir diğer çalışmada, S. Açıkbay (2008) raylı sistem araçlarında tahrik sistemi için kullanılan enerjinin hattın geometrisine, işletmenin mevcut koşullarına, araç ve cer gücü özelliklerine göre değiştiğini öne sürmüştür (Açıkbay, S., 2008). S. Açıkbay ve M. T. Söylemez Yaptıkları çalışma sonucunda, hatlarda kullanılan besleme geriliminin 750 V DC' den 1500 V DC ye çıkarılması ile birlikte %10 oranında bir enerji tasarrufu sağlandığını gözlemlemişlerdir (Açıkbay, S. ve Söylemez, M.T., 2004).

Enerji tasarrufuna ilişkin bir diğer yöntem ise rejeneratif frenlemenin kullanılmasına yöneliktir. Rejeneratif frenleme ile birlikte kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür ve bu yöntem demiryolu sistemlerinde kullanılmaktadır. Rejeneratif frenleme, frenlemeye geçen trenin ürettiği enerjinin kendi iç direnci ile yakılmadan hatta bulunan alıcı konumundaki trene aktarılması ve bu trenin bu enerjiyi kullanması ile gerçekleşir. Rejeneratif enerjinin kullanımı

hattaki trenlerin sefer aralıkları (headway), sayısı ve konumu ile değişim göstermektedir. Trenin frenlemesi esnasında açığa çıkan enerji alıcı durumundaki başka bir tren tarafından kullanılmadığı veya depolanmadığı sürece bu enerji boşa gidecektir. Yapılan çalışmalar sonucunda raylı sistemlerde rejeneratif frenleme ile enerjinin %40 'a varan bir kısmının geri kazılabileceği ortaya çıkmıştır (Gunselmann, Walter, 2005). Rejeneratif frenleme sadece enerjiyi geri kazanmaz, aynı zamanda yakılarak ısı enerjisine dönüşmesi engellenen enerji ile tünellerde, istasyonlarda bulunan havalandırma sistemlerinin çalışma sıklıklarının düşürülmesi sağlanmış olur (Adinolfi, A., Lamedica, R., Modesto, C., Prudenzi, A., ve Vimercati, S., 1998).

Rejeneratif enerjinin kullanımı ile elde edilecek enerji kazancını artırmak üzere, trenlerin istasyonlarda frenleme veya istasyondan hızlanma eşleşmelerinin en fazla süreye denk getirilmesi amaçlanmalıdır. Bunu yapabilmek için ise, trenlerin zaman çizelgelerinin üzerinde çalışılması gereklidir. Bu oldukça karışık ve elle yapılması mümkün olmayan bir NP problemidir.

Rejeneratif frenleme çalışmalarına ilk olarak, 1985 yılında Asnis'in rejeneratif frenleme enerjisi ile ilgili araştırma yapması ile başlamıştır (I. A. Asnis, A. V. Dmitruk, ve N. P. Osmolovskii, 1985). Gordon ve Lehrer (1998) ise, trenlerin koordine olarak çalışmasını inceleyerek, rejeneratif frenleme üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu araştırmıştır (S. P. Gordon ve D. G. Lehrer, 1998).

Tren zaman çizelgesi oluşturulurken, hem işletmenin hem de yolcuların fayda sağlaması dikkate alınır. Amit ve Goldfard (1971) yaptıkları çalışmada tren zaman çizelgeleme problemi için optimizasyon tekniğini uygulamışlardır (I. Amit ve D. Goldfard, 1971). Bu çalışmayla beraber araştırmacılar, yolculuk süresi, gecikme süresi, işletme maliyeti, güvenilirlik, sağlamlık gibi farklı optimizasyon hedeflerine sahip algoritmalar önermeye başlamışlardır. Örneğin, Higgins ve arkadaşları (1996) gecikme süresini ve yakıt süresini en aza indiren bir optimizasyon modeli önermişlerdir (A. Higgins, E. Kozan, ve L. Ferreira 1996). Ghoseiri ve arkadaşları (2004) ise, yolculuk süresi ve yakıt süresini en aza indirecek bir optimizasyon modeli önermişlerdir (K. Ghoseiri, F. Szidarovszky, ve M. J. Asgharpour, 2004). Ayrıca, Yang ve arkadaşları (2008) trenlerin gecikme sürelerini ve toplam yolculuk sürelerini en aza indirmek üzere, her bir istasyonda trene binen veya trenden inen yolcuları değişken olarak kabul eden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir (L. Yang, K. Li, and Z. Gao, 2008). Albrecht (2004) yaptığı çalışmada, enerji tüketimini azaltmak için frenleyen ve ivmelenen trenlerin zaman tablolarını incelemiştir. Albrecht, trenlerin istasyonlardaki bekleme sürelerini artırarak, trenlerin zaman tablosunu yeniden düzenlemiştir. Bu yöntemde amaçlanan, trenlerin çalışma zamanlarını en iyi şekilde planlayarak (koordine ederek) en uygun kombinasyonun bulunmasıdır (T. Albrecht, 2004).

Ramos ve arkadaşları (2008) zaman çizelgesinde optimizasyon işlemi gerçekleştirilirken, trenlerin hızlanma ve frenleme zamanlarının örtüşmesinin maksimum olmasını istemiştir. Maksimum çakışmayı gerçekleştirebilmek için genetik algoritma kullanmışlardır. Bu çalışmada, aynı trafoda bulunan ve karşılıklı iki istasyondaki trenlerin hareketi düşünülerek gerçekleştirilmiştir (A. Ramos, M. Pena, A. Fernández-Cardador, ve A. P. Cucala, 2008). Nasri ve arkadaşları (2010) genetik algoritma kullanarak bir istasyonda bulunan iki treni koordine etmek için en iyi (optimum) yedek (reserve) zaman aralığını buldular. Aynı zamanda trenlerin toplam elektrik enerjisi tüketimini hesaplamak için aynı trafo merkezine sahip bir simülasyon da gerçekleştirdiler (A. Nasri, M. F. Moghadam, ve H. Mokhtari, 2010). Bir başka çalışmada Peña-Alcaraz ve arkadaşları (2012), aynı trafodan beslenen trenlerin hızlanma ve ivmelenme zamanlarının örtüşmesini inceleyen bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde, değişken bekleme süreleri yerine, çalışma süreleri göz önünde bulundurularak zaman tablosu oluşturulmuştur. Bu model daha sonra Madrid Metro hattında simüle edilmiş ve enerji tasarrufunda %7 oranında iyileşme gözlemlenmiştir (M. Peña-Alcaraz, A. Fernández, A. P. Cucala, A. Ramos, ve R. R. Pecharromán, 2012).

Yang ve arkadaşları (2013) diğer çalışmalardan farklı olarak, aynı istasyona ait zıt yönlü trenler üzerinde değil de birbirini takip eden aynı yönlü trenler üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Aynı yönde birbirini takip eden trenlerin hızlanma ve frenleme zamanlarının

örtüşmesini incelemişlerdir. Bu çalışmada genetik algoritma kullanarak en iyi çözüme ulaşmayı hedeflemişlerdir. Çalışmalarını Pekin Yizhuang metro hattında simüle etmişlerdir. Simülasyon sonucunda, trenlerin ivmelenme ve frenlerin örtüşmeleri incelenmiş ve rejeneratif frenleme enerjisinden kazanılan enerjinin en yoğun saatlerde %22, normal saatlerde %15,2 arttığı gözlemlenmiştir (X. Yang, X. Li, Z. Gao, H. Wang, ve T. Tang, 2013). Yang ve arkadaşları (2014) geliştirdikleri bu modelde değişikliğe giderek, bu sefer aynı istasyonda zıt yöne giden trenlerin ivmelene ve frenleme zamanlarındaki örtüşmeyi incelemiştir. Ardışık aynı yöne giden trenleri dikkate almamışlardır. Bu çalışmalarında da bir önceki çalışmalarında olduğu gibi genetik algoritma kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda rejeneratif enerjiden elde edilen enerji kazancının %8,8 oranında olduğu tespit etmişler ve yolcuların istasyonlarda bekleme sürelerinde %3,2 oranında bir azalma yapılabileceğini göstermişlerdir (X. Yang, B. Ning, X. Li, ve T. Tang, 2014).

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, bir model geliştirmişlerdir. İki hedefi bir araya getirmek için doğrusal ağırlıklı uzlaşma yaklaşımı ve bulanık doğrusal programlama yaklaşımı geliştirmişler ve optimizasyon problemini çözmek için genetik algoritmadan faydalanmışlardır (Xu, X., Li, K., Li, X., 2016).

Kampeerawat ve Koseki (2017) demiryolu sistemlerinde rejeneratif enerjinin ve enerji depolama sistemlerinin aktif kullanılması için bir yöntem önerdi. Bu yöntemde tren tarifelerini optimize etmek için genetik algoritma kullandı. Önerilen yöntem uygulandığında, enerji tasarrufu iyileştirilebilir olduğu enerji depolama sistemi olmadan nominal çalışmaya kıyasla %3,6'ya kadar iyileştirilebilir olduğu gözlemlenmiştir (Kampeerawat, W., & Koseki, T. 2017).

Zou ve arkadaşları (2018) çalışmalarında, genetik algoritma ve rejeneratif kinetik enerjiye dayalı çok trenli (multi-train) enerji tasarrufu operasyonu için bir model önermiştir. Yaptıkları çalışma ile sabah ve akşam pik saatler, hareket saati ve toplam araç sayısı dikkate alınarak, toplam enerji tüketimi en düşük olan tren kalkış aralığı için trenin çok boyutlu durum vektörü alt uzayının enerji tüketimi optimizasyon modelini oluşturmuşlardır. Simülasyon uygulaması aracılığıyla programlamanın makul olduğu kanıtlanmıştır. İş yoğunluğunu etkili bir şekilde azaltabilen ve çok trenli akıllı ve enerji tasarrufu sağlayan çözüme ulaşmışlardır. (Zou, B., Gong, L., Yu, N., & Chen, J., 2018).

İbrahim Demirci (2018) yaptığı çalışmada, rejeneratif enerji tasarrufu sağlamak için istasyon bekleme sürelerini değişken olarak kullanmıştır. Trenlerin hızlanma ve frenleme esnasındaki örtüşme oranının en fazla olmasını sağlamak için genetik algoritma ile zaman çizelgesini en iyileştirmeye çalışmıştır. Çalışma, Metro İstanbul Hatlarından Kadıköy-Kartal hattında uygulanmış ve sonucunda yolcu yoğunluğunun en fazla olduğu saatlerde hızlanma ve frenleme anlarındaki örtüşmenin %46'dan %60'a çıktığı, normal saatlerde ise %14'den %30'lara çıktığı gözlemlenmiştir (Demirci, İbrahim Ethem, ve Hilmi Berk Celikoglu, 2018).

Yapılan bir başka çalışma ise yolculuk süresini azaltmaya yöneliktir. Yang ve arkadaşları (2019) yolculuk süresini azaltmak için genetik algoritma kullanarak trenlerin zaman tablolarını oluşturdu ve çalışma sonunda yolcu başında ortalama seyahat süresini 1.07 dakika azalmasını sağladılar (Yang, A., Huang, J., Wang, B., & Chen, Y., 2019).

He ve arkadaşlarının (2020) yaptığı çalışmada, trenlerinin minimum enerji tüketimi ve transfer yolcuları için minimum transfer bekleme süresi bulmak için bir yöntem önermektedir. Yolcuların transfer bekleme sürelerini elde etmek için, rejeneratif enerjinin eşleştirme işleminden esinlenen bir varış zamanı matrisi oluşturulmuşlardır. En iyi arama yeteneği nedeniyle optimizasyon için genetik algoritmayı kullandılar. Önerdikleri yöntemi Nanning demiryolu transit sisteminden seçilen iki metro hattında uyguladılar. Sonuçlar, önerilen yöntemin enerji tasarrufu için iyi bir verimliliğe sahip olduğunu ve iki metro hattı arasındaki transfer bekleme süresini azalttığını göstermektedir (He, D., Yang, Y., Chen, Y., Deng, J., Shan, S., Liu, J., & Li, X., 2020).

Literatürden de görüldüğü üzere rejeneratif enerjiden faydalanmak amacı ile birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu makalede ele alınan problem, İbrahim Demirci (2018) tarafından daha

önce gerçekleştirilen çalışmanın devamı niteliğindedir. Bu makalede rejeneratif enerjinin kazanımını maksimum yapacak en iyi çözümün bulunması için genetik algoritma ile bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada istasyon bekleme sürelerinin minimum ve maksimum değerleri göz önüne alınarak zaman çizelgesi en iyileştirilmiştir. Bekleme sürelerinde değişim, toplam bekleme süreleri için ayrılan süreyi aşmayacak şekilde düzenlenmiştir. Farklı genetik algoritma parametre yöntemleri uygulanmıştır. Yapılan simülasyon sonucunda, referans çalışmaya göre trenlerin hızlanma ve frenleme anlarındaki örtüşmelerinin %26 civarında daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Referans çalışmada trenlerin örtüşme oranları %60 olarak bulunurken bu çalışma ile bu oran %76'ya kadar çıktığı gözlemlenmiştir.

Makalenin bundan sonraki 2. Bölümünde ilgili kavramlardan, 3. Bölümde algoritma ve sistemin işleyiş modelinden ve 4. Bölümde sonuç ve gelecekte çalışma ile ilgili yapılabilecek yeni eklemelerden bahsedilecek şekilde düzeltilmiştir.

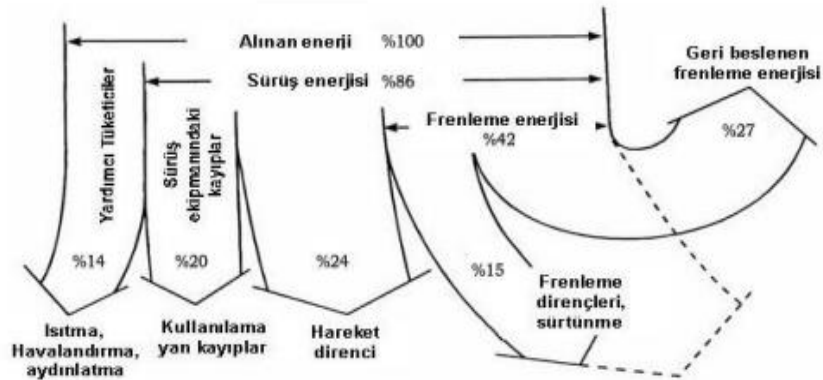
2. İLGİLİ KAVRAMLAR

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. Bunlar;

- Hatların besleme gerilimleri
- Hattın topografyası ve çevresel yapısı
- Trafolar, kompresörler vb. cihazlar
- Araçlara uygulanan sürüş stratejileri
- Araçların frenleme dirençleri
- Araçların kapasitör kullanarak enerji depolaması
- Frenleme enerjisinden elde edilen enerji kazancı
- Aydınlatma, havalandırma ve ısıtma için harcanan
- Araçların taşıdıkları yolcu sayısı

Araçlar frenleme esnasında hatta bulunan katenerden aldıkları enerjinin %42'sini elektrik enerjisine çevirmektedir. Araçların frenlemesi ile oluşan enerjinin yaklaşık olarak %27'si katener sistemine geri verilmektedir. Frenleme esnasında oluşan enerjinin %15'lik bir kısmı ise Şekil 1'de görüldüğü gibi rezistörlerde harcanmaktadır (Amalgamated Report,).



Şekil 1:

Araç Enerji Tüketimi Dağılımı <(Albert,1995)>

2.2. Rejeneratif Frenleme ve Enerjinin Geri Kazanılması

Raylı sistem araçlarının enerji tasarrufu için kullandıkları yöntemlerden biri de rejeneratif frenleme ile elde edilen enerjinin kullanılmasıdır. Burada asıl önemli nokta frenlemeye geçen aracın üretmiş olduğu enerjinin kendi iç direnci ile yakılmadan önce kullanılmasıdır (Daniel Cornic, 2010). Araçların motorları frenleme anında üreteç olarak çalışmaktadır. Araçların frenleme esnasında oluşturdukları kinetik enerji elektrik enerjisine çevrilir. Kinetik enerjiden elektrik enerjisine dönüştürülen enerji trafoya iletilir. Bu enerji farklı yöntemlerle tekrar kullanılabilir. Elde edilen enerji istasyonlarda aydınlatma, havalandırma ve ısıtma sistemleri için kullanılabilir. Bir başka kullanım şekli de elde edilen bu enerjinin araç-üstü sistemlerine iletilmesi ve araç tarafından yardımcı konfor fonksiyonları için kullanılmasıdır. Rejeneratif frenleme ile kazanılan bu enerjinin tamamı kullanılamaz çünkü kazanılan enerji aracın yardımcı konfor fonksiyonlarının talep ettiği enerji miktarından daha fazladır. Diğer bir yöntem ise bu enerjinin trafodan o anda hatta bulunan ve ivmelenmekte olan araca iletilmesidir. Bu makalede rejeneratif frenleme ile kazanılan enerjinin hatta bulunan bir başka araca iletilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır.

Rejeneratif enerji ile kazanılacak toplam enerji, frenleme yapan araçların sayısı, araçların kurulu gücü, araçların frene başladığı esnadaki hızları, frenleme sıklığı gibi parametrelere bağlıdır (Açıkbaş, S. ve Alataş A., 2006).

2.3. Zaman Çizelgesi

Tren zaman çizelgelerinde trenlerin sefer aralıkları, yolcuların ihtiyaçlarına uygun hizmet verecek şekilde oluşturulmalıdır. Tren seferleri planlanırken amaçlanan, hangi trenin ne zaman hangi istasyonda olacağı, istasyonlarda ne kadar süre beklemesi gerektiğinin ve istasyonlar arasında oluşabilecek gecikmelerin tolere edilmesini için yedek zaman aralıklarının belirlenmesidir.

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

Paul 1999 yılında yaptığı çalışma ile tren sefer sürelerinin %5 artırarak yaklaşık %20'lik bir enerji kazancı elde etmiştir (Jong, J. C., ve Chang, E. F., 2005). Yine benzer bir çalışmada tren sürelerinin %10 artırılması sonucu %10'luk bir enerji kazancı elde edilmiştir (Martin, P., 1999).

Tren zaman çizelgelerinde en yaygın kullanılan metot bekleme sürelerinde yapılacak değişiklikler üzerine kurulmuştur. Trenlerin seferleri için zaman tablosu oluşturulurken arızalardan veya yolculardan kaynaklı gecikmeler göz önünde bulundurulur ve maksimum bekleme süreleri de zaman çizelgelerine eklenir. Ekstra bekleme süreleri ile istasyon bekleme süreleri kullanılarak, enerji verimi elde edilecek sürüşler için istenilen bekleme zamanları kullanılabilir (Açıkbaş, S., 2008).

Uygulamada amaç rejeneratif enerjinin kazanımını maksimum yapabilmektir. Rejeneratif frenleme enerjisini kullanarak sağlanacak maksimum kazanç frenleyen tren sayısı kadar ivmelenen tren olduğunda gerçekleşir. Bunun için trenlerin ivmelenme ve frenleme yaptıkları zamanın örtüşmesinin maksimum olması gerekmektedir. İstasyon bekleme sürelerinde yapılacak değişimler ile trenlerin ivmelenme ve frenleme zamanlarının maksimum olduğu çözümün bulunması hedeflenmektedir. En uygun zaman çizelgesini bulabilmek elle yapılması zor bir NP problemi.

2.4. Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar çözüm uzayı büyük olan problemler için biyolojik evrim sürecinin bilgisayar ortamında kodlanması yoluyla, en iyi veya en iyiye yakın çözümün bulunmasına dayanan bir arama yöntemidir. Bu yaklaşım ilk olarak Holland tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır (Holland J.H., 1992).

Genetik algoritmalar karmaşık problemlerin hızlı ve en iyiye yakın olarak çözülmesi için uygulanırlar. Büyük çözüm uzayına sahip problemlerde genetik algoritma kullanılarak kısa sürede çözüme ulaşılabilir. Genetik algoritmalar kısa sürede en iyi çözüme ulaşması ve global çözüm bulma açısından pek başarılı iken, yerel çözüm bulmada başarılı değildir (Gonzales E.L. ve Fernandez M.A.R., 2000).

Genetik algoritmada ilk olarak problemin özelliklerine uygun kromozomlar belirlenir. Popülasyon içindeki bireyler bu kromozomların farklı değerleri ile genellikle rastgele oluşturulur. Popülasyonu oluşturan bireylerin kromozom değerlerinin her biri problemin çözümü için birer adaydır. Hangisinin daha iyi sonuç olduğu probleme özgü belirlenmiş bir iyilik fonksiyonu (fitness function) değeri ile belirlenir. Daha sonra popülasyondaki kromozomlar tıpkı evrim sürecinde olduğu gibi “çaprazlama”(crossover) ve “mutasyon” (mutation) operatörlerine tabii tutularak yeni kromozomlar elde edilir. Bu işlemde amaç daha iyi kromozomlar oluşturmaktır. Bu işlemler, istenen yineleme sayısı boyunca veya tanımlanan hata eşliğine ulaşılan kadar tekrarlanır ve her döngü sonucunda yeni nesiller oluşturulur. Bir döngü sonucunda oluşturulan yeni bireylerden en iyileri “elit bireyler“ (elite chromosome) bir sonraki nesile doğrudan aktarılır ve popülasyon sayısı sabit tutulur (Gonzales E.L. ve Fernandez M.A.R., 2000).

2.4.1. Çaprazlama

Genetik algoritmadaki en önemli operatörlerden biri çaprazlamadır. Seçilen iki kromozomun çaprazlanması ile yeni bireyler oluşturulur. Çaprazlama işleminde amaç ebeveynlerin uygunluk değerinden daha yüksek iyilik fonksiyonu değerine sahip yeni bireyler oluşturmaktır. Literatürde birden fazla çaprazlama yöntemi mevcuttur. En kolay yöntem tek noktalı çaprazlamadır. Bu yöntemde seçilen çaprazlama noktasına kadar genler bir ebeveynden alınırken kalan genler ise diğer bir ebeveynden alınarak yeni birey oluşturulur. Bu yöntem çok noktalı olarak da uygulanabilir. Bu durumda tek noktalı 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” (Murata, T., Ishibuchi, H. ve Tanaka, H. 1996), “Kısmi Planlı Çaprazlama” (Goldberg D., 1989), “Sıraya Dayalı Çaprazlama” (Syswerda, G., 1991) gibi yöntemler de kullanılmaktadır.

2.4.2. Mutasyon

Mutasyon operatörü genetik çeşitliliğin sağlanması açısından kullanılan bir genetik algoritma operatörüdür. Çaprazlama işlemi sonucunda oluşturulan kromozomların genlerinden bir veya birkaç tanesi değiştirilerek yeni kromozomlar elde edilir. Bu operatör oluşan tüm genlere uygulanamaz belli bir oranda uygulanır. Mutasyon oranının düşük olmasından dolayı etkileri kromozomlarda az hissedilir.

2.4.3. Elitizm

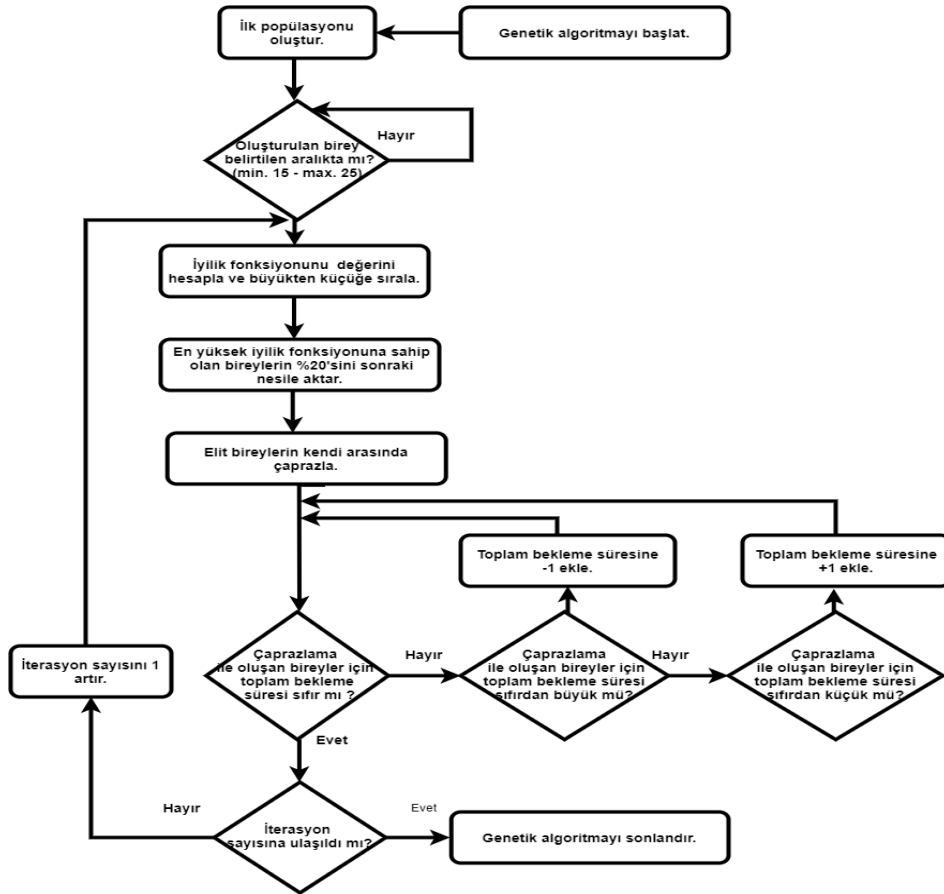
Çaprazlama mutasyon gibi operatörlerin uygulanması sonucunda en yüksek iyilik fonksiyonu değerine sahip bireyin bir sonraki nesile aktarılmasıdır.

2.4.4. Yeni Neslin Oluşturulması

Kromozomlar üzerinde çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanması sonucunda yeni bireyler üretilir. Yeni kromozomların uygunluk değeri popülasyondaki diğer kromozomların iyilik fonksiyonu değeri ile karşılaştırılır. Yeni kromozomların uygunluk değeri diğer kromozomdan daha yüksek olduğu takdirde kromozomlar popülasyondan çıkarılır ve yerini yeni kromozomlar alır. Böylelikle nesil sayısı kadar birey üretilinceye kadar veya durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder (Yeo M.F., ve Agyei E.O., 1998).

3. ÖNERİLEN YAKLAŞIM

Uygulamada amaç rejeneratif enerjinin kazanımını maksimum yapabilmektir. Rejeneratif frenleme enerjisini kullanarak sağlanacak maksimum kazanç frenleyen tren sayısı kadar ivmelenen tren olduğunda gerçekleşir. Bunun için trenlerin ivmelenme ve frenleme yaptıkları zamanın örtüşmesinin maksimum olması gerekmektedir. İstasyon bekleme sürelerinde yapılacak değişimler ile trenlerin ivmelenme ve frenleme zamanlarının maksimum olduğu çözümün bulunması hedeflenmektedir. En uygun zaman çizelgesini bulabilmek elle yapılması zor bir NP problemidir. Uygulamada da NP problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan algoritmalarından olan ve bize en uygun çözümü verecek bekleme sürelerini bulmayı sağlayacak genetik algoritma kullanılmıştır. Şekil 2’de önerilen algoritmanın akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 2:
Geliştirilen Modele Göre Elit Bireyin Belirlenmesi

3.1. İlk Popülasyonun Belirlenmesi

Problemin büyüklüğü göz önünde bulundurularak, başlangıç popülasyonu 20 bireyden oluşacak biçimde ufak tutulmuştur. Popülasyonu oluşturan bireylerin genleri istasyonlarda bekleme süreleri olarak belirlenmiştir. İstasyonda bekleme süreleri normal şartlarda 20 saniye olacak şekilde kabul edilmiştir. Bir tren istasyonda maksimum 25 minimum 15 saniye istasyonda bekleyebilir. Popülasyonlar oluşturulurken istasyonlarda bekleme sürelerinin belirtilen aralıklarda olmasına dikkat edilmiştir. İlk popülasyon bireylerinin genleri, her istasyon için belirlenmiş bekleme sürelerini optimize etmek üzere, minimum(-5) ve maksimum (+5) değer aralığında rastgele bir tamsayı ile belirlenmiştir. Popülasyonun bireylerinin oluşturulurken dikkat edilen bir diğer nokta ise; seyahat boyunca toplam bekleme süresinde değişim olmaması, gen toplamının sıfır olacak şekilde dağıtılmasıdır.

3.2. İyilik Fonksiyonunun Oluşturulması

Problemin Uygulamanın simülasyon süresince, her t birim zamanı için (1 saniye) trenlerin anlık durum bilgisi; ivmelenmede (accelerating), frenlemede (breaking), boşa gidiyor (coasting) ve beklemede (dwelling) olmak üzere her tren için ayrı bir listede tutulmaktadır. Bu listeler kullanılarak, simülasyon süresinin t anında ivmelenen ve frenlenen tren sayıları bulunur. Aynı zaman dilimindeki frenlenen ve ivmelenen trenlerin sayıları birbiriyle karşılaştırılır. Frenleyen ve ivmelenen tren sayılarından minimum olanı maksimum rejeneratif enerji kullanımını ifade eder. Örneğin 100. saniyede frenleyen tren sayısı 5 iken, ivmelenen tren sayısı 3 ise 100. saniyede örtüşen tren sayısı 3 olarak (rejeneratif enerji kazancı 3 tren için sağlanır) bulunur.

Bu durum, tüm simülasyon süresi boyunca her t birim zamanında uygulanarak toplam örtüşen tren sayısı bulunur. İyilik fonksiyonu da örtüşen tren sayısının toplamının, tüm trenlerin toplam frenleme zamanına bölünmesi ile bulunur. Aşağıda Denklem 1’de iyilik fonksiyonunun bulunması gösterilmektedir. Örneğin, simülasyon süresinin 18000 saniye olduğu ve hesaplamalar sonucunda toplam frenleme zamanının 102552 saniye ve toplam örtüşen trenlerin zamanının 71866 saniye olması durumunda iyilik fonksiyonu %0,70 (71866/102552) olarak bulunmuş olacaktır.

t_b : Birim zamanda frenleyen trenlerin sayısı

t_o : Birim zamanda örtüşen (frenleme ve ivmelenme anları) trenlerin sayısı

t : Birim zaman (saniye)

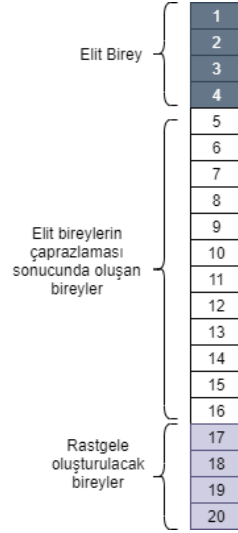
n : Simülasyon süresi (saniye)

$$\text{İyilik Fonksiyonu} = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} t_{on}}{\sum_{t=0}^{t=n} t_{bn}} \quad (1)$$

3.3. Popülasyonun Diğer Bireylerinin Belirlenmesi

3.3.1. Elit Bireyin Belirlenip Bir Sonraki Nesle Aktarılması

Problemin İlk popülasyon bireyleri rastgele oluşturulduktan sonra, bu popülasyondaki bireyler yukarıda açıklanan iyilik fonksiyonu değerine göre sıralanır. En yüksek iyilik fonksiyonu değerine sahip olan birey bir sonraki nesle elit birey olarak aktarılır. Algoritmadaki elit bireylerin seçilme oranı ise Aşağıdaki Şekil 3’de gösterildiği gibi %20 olarak belirlenmiştir (popülasyonda toplam 20 birey bulunmaktadır). Yerel maksimumlarda kalma riski oluşturmasına rağmen, algoritmanın sonuca hızlı yaklaşabilmesi adına bu değer çalışmada yüksek tutulmuştur.



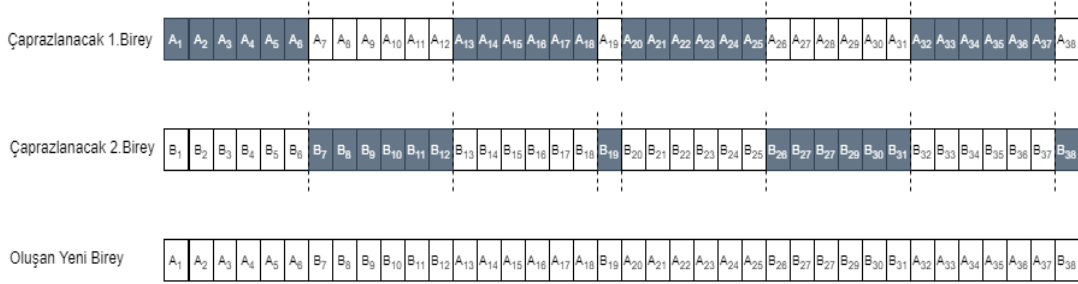
Şekil 3:
Geliştirilen Modele Göre Elit Bireyin Belirlenmesi

3.3.2. Çaprazlama Operatörünün Uygulanması İle Yeni Bireylerin Oluşturulması

İyilik fonksiyonuna göre sıralanıp, en yüksek sonucu veren 4 birey ($20 \cdot 0.2 = 4$) elit olarak bir sonraki nesle aktarıldıktan sonra, diğer bireylerden 12 tanesi çaprazlama yolu ile oluşturulur. Çaprazlama için birden fazla noktadan çaprazlama yöntemi tercih edilmiştir. Çaprazlanacak bireyler elit olarak bir sonraki nesle aktarılan 4 birey olarak belirlenmiştir. Bu bireyler ile oluşabilecek tüm ikili kombinasyonlar göz önünde bulundurularak çaprazlama işlemi gerçekleştirilir (1-2,1-3,1-4,2-1,2-3,2-4,3-1,3-2,3-4,4-1,4-2,4-3).

Çaprazlama algoritması 36 istasyon ve 2 hat sonu dönüş noktası toplam 38 istasyon düşünülerek oluşturulmuştur. Çaprazlama işlemi uygulanırken hat sonu geri dönüş noktaları diğer kromozomlardan ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 4’de görüldüğü gibi geriye kalan 36 kromozom sırasıyla eşit olacak şekilde ($36/6$) altı gruba ayrılır ve hat sonu dönüş noktaları ile birlikte toplam 8 adet çaprazlama noktası elde edilmiş olur. Daha sonra yeni bireylerin kromozomlarının ilk kısmı birinci bireyin ilk çaprazlama noktasına kadar olan kromozomlarından, ikinci kısmı ikinci bireyin ikinci çaprazlama noktasına kadar olan kromozomlarından, üçüncü kısmı ilk bireyin üçüncü çaprazlama noktasına kadar olan kromozomlarından ve geri kalan kromozomlar ise sırasıyla benzer biçimde devam edilerek tamamlanır.

Elit olan ilk 4 bireyin kendi aralarında çaprazlanması sonucunda yeni 12 birey oluşturulmuştur. Popülasyon büyüklüğü 20 olarak belirlendiğinden, yeni popülasyon en elit 4 birey, çaprazlama sonucunda elde edilen 12 birey ve rastgele bir biçimde oluşturulan 4 bireyden oluşturulur. Rastgele bireylerin azlığı en iyiyi aramayı yavaşlatsa da, uygulanan agresif mutasyon operatörü yerel maksimumlardan çıkılmasını sağlamaktadır. Mutasyon operatörü, yeni bireylerin istasyonlardaki toplam bekleme süresi değişiminin sıfır olması kuralını sağlamak üzere aşağıda açıklandığı gibi uygulanır. Örneğin 38 kromozomdan oluşan iki ebeveynin çaprazlanması aşağıdaki şekilde gibidir.



Şekil 4:
Bireylerin Çaprazlanması Ve Yeni Bireyin Oluşturulması

3.3.3. Mutasyon Operatörünün Uygulanması İle Yeni Bireylerin Oluşturulması

Çaprazlama sonucu oluşturulan bireyler içinde toplam bekleme süresindeki değişimin sıfır olması beklenir. Toplam bekleme süresi değişiminin sıfır olmadığı durumlarda bireyler üzerinde mutasyon işlemi uygulanır.

Mutasyon işlemi istasyon bekleme sürelerindeki değişimin sıfıra eşit olmadığı durumlarda gerçekleşmektedir. İstasyon bekleme sürelerindeki değişim değeri bir değişkende (sayaç) tutulur. Bu değişken sıfırdan küçük ise;

Bekleme sürelerindeki değişim, negatif değerli olan genlere (istasyonlara) uygulanır. Bu genlere sırayla bekleme sürelerinin toplamının tutulduğu sayaç sıfır olana kadar +1 eklenir. Tüm genler bir tur geçildiyse ve halen sayaç sıfır değil ise, bu işlem tekrarlanır.

Yine aynı şekilde istasyon bekleme sürelerindeki değişimin sıfırdan büyük olduğu durumlarda ise;

Bekleme sürelerindeki değişim bu sefer, pozitif değerli olduğu genlere (istasyonlara) uygulanır. Bu genlere sırayla bekleme sürelerinin toplamının tutulduğu sayaç sıfır olana kadar -1 eklenir. Tüm genler bir tur geçildiyse ve halen sayaç sıfır değil ise, bu işlem tekrarlanır.

3.3.4. Genetik Algoritmanın Sonlandırılması

Uygulamada algoritmayı sonlandırmak için iterasyon sayısı kullanılmıştır (hata oranı tespit edilmesi güç bir problemdir ve yerel maksimumlar vardır). İstenen iterasyon sayısı sağlanana kadar tüm bu işlemler sırasıyla tekrarlanmaktadır.

Bu çalışmada, veri seti olarak Metro İstanbul hatlarından Kadıköy-Kartal hattının verileri kullanılmıştır (Büşra Tural, 2021). 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 toplam 18 trenin kullanıldığı öngörülmüştür. Ayrıca iki tren arasındaki mesafe 273 saniye ve toplam simülasyon süresi 18000 saniye olarak uygulanmıştır. Simülasyon tüm trenler işlemlere başladığı andan itibaren başlatılmış hesaplamalar bu süre zarfı içinde yapılmıştır.

Genetik algoritmanın 10 iterasyon (daha yüksek iterasyon sonuçlarında yapılan denemeler daha iyi sonuç vermemiştir) boyunca uygulanması sonucunda trenlerin ivmelenme ve frenleme anlarındaki örtüşmenin %76 olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada referans çalışmada da olduğu gibi popülasyon sayısı 20 olarak ele alınmıştır. Referans alınan çalışmadaki (Demirci, İbrahim

Ethem, ve Hilmi Berk Celikoglu, 2018) enerji kazancı miktarı %60 iken, önerilen yöntem ile mevcut durumdan yaklaşık %26 daha fazla enerji tasarrufu sağlandığı görülmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, raylı sistemlerde rejeneratif frenleme enerjisinden maksimum faydalanarak enerji tasarrufunun artırılması amaçlanmıştır. Rejeneratif frenleme enerjisi bir trenin frenlerken oluşturduğu enerjiyi hatta alıcı durumunda bulunan o an ivmelenmekte olan başka bir trene aktarması ile gerçekleşmektedir. Yani bir hatta frenleyen tren sayısı ile ivmelenen tren sayısı ne kadar örtüşüyorsa rejeneratif enerjinin kullanımı da o kadar fazla olur. Önerilen bu modelde, örtüşmenin maksimum olması için istasyon bekleme sürelerinde değişiklik yaparak zaman çizelgesi optimize edilmiştir. En uygun zaman çizelgesini bulabilmek elle yapılması zor bir NP problemi olduğundan enerji kazanımını maksimum yapacak istasyon bekleme sürelerini belirlemek için genetik algoritma kullanılmıştır. Uygulama C# programlama dili ile kodlanarak geliştirilmiştir.

Bu çalışmada istasyon bekleme süreleri belirlenirken özellikle iki noktaya dikkat edilmiştir. Dikkat edilen noktalardan biri bekleme sürelerinin belirlenen aralıkta bir tamsayı olmasıdır. Bu aralık mevcut bekleme sürelerinden minimum(-5) ve maksimum (+5) olacak şekilde belirlenmiştir. Diğer bir nokta ise, istasyon bekleme sürelerinin seyahat boyunca toplam bekleme süresinde değişim olmayacak şekilde düzenlenmiştir. Yapılan bu çalışma ile seyahat sürelerinde değişiklik olmadan geliştirilen genetik algoritma ile sadece bekleme sürelerindeki değişimle enerji kazancı elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Yapılan diğer çalışmalardan farkı zaman tablolarında optimizasyon işlemi yapılırken bekleme sürelerindeki toplam değişimin sıfır olması ve bunun yanında yolculuk süresinde herhangi bir artış olmamasıdır.

Bu çalışma için Metro İstanbul hatlarından Kadıköy-Kartal hattı seçilmiş olup, oluşturulan model bu hattın verileri ile denenmiş ve daha önce yapılan çalışmalara göre %26 daha fazla bir enerji tasarrufu elde edilebileceği görülmüştür.

Makalede bahsedildiği üzere, gelecekte hattı besleyen trafolar göz önünde bulundurularak, istasyon bölgelerine göre daha detaylı ve gerçekçi modelleme yapılabilir. Algoritmada kullanılan çaprazlama ve mutasyon operatörlerinde farklı yaklaşımlarda bulunarak yeni modeller oluşturulabilir. Bizim sabit olmasını istediğimiz yolculuk süresi, bekleme sürelerinde yapılacak değişikliklere bağlı olarak değiştirilerek bize maksimum enerji kazancını sağlayacak zaman tabloları oluşturulabilir. Ayrıca istasyon bekleme sürelerindeki kısıt değerleri değiştirilerek sonuçlar gözlemlenebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

İbrahim Ethem Demirci, Büşra Tural ve Metin Turan kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesinde, Metin Turan ve Büşra Tural geliştirilecek algoritma ile yöntemin belirlenmesinde, Büşra Tural, İbrahim Ethem Demirci ve Metin Turan belirlenen algoritmaya göre çalışmanın gerçekleştirilmesi ve sonuçlarının yorumlanması süreçlerinde katkıda bulunmuştur.

KAYNAKLAR

1. Açıkbaş, S. (2008). Çok hatlı çok araçlı raylı sistemlerde enerji tasarrufuna yönelik sürüş kontrolü (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
2. Açıkbaş, S. ve Alataş A., 2006: Raylı Sistemlerde Enerji Verimli Sürüş. In Türkiye 10. Enerji Kongresi, 29 Kasım
3. Açıkbaş, S., & Söylemez, M. T. (2004). Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation. *Computers in Railways IX*, 951-960. doi: 10.2495/CR040951
4. Adinolfi, A., Lamedica, R., Modesto, C., Prudenzi, A., & Vimercati, S. (1998). Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(4), 1536-1542. doi: 10.1109/61.714859
5. Albert, H., Levin, C., Vietrose, E., & Witte, G. (1995). Reducing energy consumption in underground systems.
6. 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. doi:10.2495/978-1-84564-498-7/01
7. Amit, I., & Goldfarb, D. (1971). The timetable problem for railways. *Developments in Operations Research*, 2(1), 379-387.
8. Asnis, I. A., Dmitruk, A. V., & Osmolovskii, N. P. (1985). Solution of the problem of the energetically optimal control of the motion of a train by the maximum principle. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 25(6), 37-44. doi: 10.1016/0041-5553(85)90006-0
9. Büşra. (2021). Time-Plan Optimization with Genetic Algorithm for Regain of Energy from Train Tracks [Data set]. Zenodo. doi: <http://doi.org/10.5281/zenodo.4467528>
10. Chen, J. F., Lin, R. L., & Liu, Y. C. (2005). Optimization of an MRT train schedule: reducing maximum traction power by using genetic algorithms. *IEEE Transactions on power systems*, 20(3), 1366-1372. doi: 10.1109/TPWRS.2005.851939
11. 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. doi: 10.1109/ESARS.2010.5665264
12. 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. doi: 10.1109/ITSC.2018.8569553
13. 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. doi :10.1016/j.trb.2004.02.004
14. Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search. Optimization, and MachineLearning*.
15. Gonzalez, E. L., & Fernandez, M. A. R. (2000). Genetic optimisation of a fuzzy distribution model. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. doi: 10.1108/09600030010346440
16. 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.

doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.060

17. Gordon, S. P., & Lehrer, D. G. (1998, April). Coordinated train control and energy management control strategies. In Proceedings of the 1998 ASME/IEEE Joint Railroad Conference (pp. 165-176). IEEE. doi: 10.1109/RRCON.1998.668103
18. Günselmann, W. (2005, September). Technologies for increased energy efficiency in railway systems. In 2005 European Conference on Power Electronics and Applications (pp. 10-pp). IEEE. doi: 10.1109/EPE.2005.219712
19. He, D., Yang, Y., Chen, Y., Deng, J., Shan, S., Liu, J., & Li, X. (2020). An integrated optimization model of metro energy consumption based on regenerative energy and passenger transfer. *Applied Energy*, 264, 114770. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114770
20. Higgins, A., Kozan, E., & Ferreira, L. (1996). Optimal scheduling of trains on a single line track. *Transportation research part B: Methodological*, 30(2), 147-161. doi: 10.1016/0191-2615(95)00022-4
21. Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
22. Jong, J. C., & Chang, E. F. (2005). Models for estimating energy consumption of electric trains. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 278-291. doi: 10.11175/easts.6.278
23. Kampeerawat, W., & Koseki, T. (2017). A strategy for utilization of regenerative energy in urban railway system by application of smart train scheduling and wayside energy storage system. *Energy Procedia*, 138, 795-800. doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.070
24. Martin, P., 1999: Train performance and simulation. In Winter Simulation Conference. doi: 10.1109/WSC.1999.816799
25. Murata, T., Ishibuchi, H., & Tanaka, H. (1996). Genetic algorithms for flowshop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 30(4), 1061-1071. doi: 10.1016/0360-8352(96)00053-8
26. 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. doi: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542099
27. 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. doi: 10.1177/0954409711429411
28. 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.
29. Syswerda, G. (1991). Scheduling optimization using genetic algorithms. *Handbook of genetic algorithms*.
30. UITP, 2005: *The Cost Of Energy And How To Reduce It*, Lisbon.
31. Wong*, K. K., & Ho, T. K. (2004). Dynamic coast control of train movement with genetic algorithm. *International journal of systems science*, 35(13-14), 835-846. doi: 10.1080/00207720412331203633

32. 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. doi: 10.1002/atr.1317
33. Yang, A., Huang, J., Wang, B., & Chen, Y. (2019). Train scheduling for minimizing the total travel time with a skip-stop operation in urban rail transit. *IEEE Access*, 7, 81956-81968. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923231
34. Yang, L., Li, K., & Gao, Z. (2008). Train timetable problem on a single-line railway with fuzzy passenger demand. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 17(3), 617-629. doi: 10.1109/TFUZZ.2008.924198
35. 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. doi: 10.1109/TITS.2012.2219620
36. 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. doi: 10.1109/TITS.2014.2303146
37. Yeo, M. F., & Agyei, E. O. (1998). Optimising engineering problems using genetic algorithms. *Engineering Computations*. doi: 10.1108/02644409810202684
38. Zou, B., Gong, L., Yu, N., & Chen, J. (2018). Intelligent scheduling method for energy saving operation of multi-train based on genetic algorithm and regenerative kinetic energy. *The Journal of Engineering*, 2018(16), 1550-1554. doi: 10.1049/joe.2018.8273

