

Raylı toplu taşıma sistemlerinde boşa gitme noktalarının optimizasyonu

Süleyman AÇIKBAŞ*, Adnan KAYPMUZ, Mehmet Turan SÖYLEMEZ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bir raylı taşıma sisteminde enerji tüketimi birçok farklı parametreye bağlıdır. Ancak, bir raylı sistemde tren rotası boyunca hız profilini en uygun hale getirmek, enerji tüketimini azaltmada etkili yöntemlerden biridir. Makalede trenler için boşa gitme noktalarının optimize edilebilmesi için yeni geliştirilmiş bir yöntem sunulmaktadır. Çalışmada önerilen yaklaşım GA (Genetik Algoritma), YSA (Yapay Sinir Ağları), ve çok hatlı ve çok trenli sistem simulasyon yazılımının birlikte kullanımıyla gerçekleştirilmiş olan gerçekçi sistem modellemesini içermektedir. Simulasyon yazılımı araçların regeneratif frenleme yapabilme ve düşük gerilimdeki performansını da modellemektedir. Simulasyon yazılımı, YSA için eğitim ve test verilerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Bu veriler YSA'ların eğitiminde ve bu eğitilmiş YSA'lar ise değişik boşa gitme konumları için yolculuk süresi ve enerji tüketimini tahmin etmede kullanılmıştır. Optimizasyon kısmında hedef yolculuk süresi, hedef enerji tüketimi ve ağırlık faktörleri içeren bir uygunluk fonksiyonu sunulmuş ve YSA'lar bu uygunluk fonksiyonunu hesaplayan optimizasyon prosedürünün hızını arttırmada kullanılmıştır. Uygunluk fonksiyonunu minimize eden en uygun boşa gitme noktalarının belirlenmesinde GA araştırma yöntemi kullanılmıştır. Gerek GA'nın gerekse kullanılan uygunluk fonksiyonunun değişik parametreleri için optimizasyon çalışmalarının tekrar edilmesi işlemi mevcut literatürde bulunan yöntemlerle çok fazla zaman almaktadır. Çalışmada önerilen yöntemde eğitilmiş olan YSA'ların kullanılması ile parametre değişiklikleri için tekrarlanan optimizasyon çalışmalarında simülasyonun kullanılmasına gerek kalmamakta, dolayısı ile yeni parametreler için optimizasyon sonuçları çok hızlı elde edilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Raylı sistem, enerji verimliliği, boşa gitme, yapay sinir ağı, optimizasyon.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Süleyman AÇIKBAŞ. mrkaito@hotmail.com; Tel: (212) 568 99 70.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Raylı sistemlerde enerji tasarrufuna yönelik sürüş kontrolü" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 05.06.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 04.07.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Optimization of coasting points in a mass rail transit system

Extended abstract

Energy consumption of a rail transit system depends on many parameters such as train weight, maximum speed, power supply system voltage level, and operation concepts. One of the most effective methods of reducing energy consumption in a rail transit system is optimizing the speed profile of the trains along the route: Trains consume the maximum energy during flat-out mode operation where they speed up to the maximum speed and keep that speed until it reaches to the braking point which is determined by deceleration rate. This type of operation gives the shortest journey time. A small trade-off from this journey time gives high saving in energy consumption. This subject poses an optimization problem which could be very complicated. In this study, a new efficient method will be presented for optimization of the coasting points for trains in a global manner. The new method suggest using Artificial Neural Networks (ANN) together with classical approach of simulator tool and genetic algorithms.

Trains run along the line according to a timetable. Timetables define the travelling time for every train from every station to station. Timetables always include some slack time for an unexpected time loss which could be caused by faulty equipment, but mostly by passengers. Slack times and station dwell times are very important for providing a punctual service. Delays disturb the punctual operation as well as reducing energy efficiency by consuming the slack times which can be used in normal operation conditions for energy efficient driving.

Simulation software is used for creating training and test data for ANNs. These data are used for training of ANNs. Test data are used to validate the outputs of trained ANNs. The trained ANNs are then used for estimating energy consumption and travel time for new sets of coasting points. Finally, the outputs of ANNs are optimized to find optimal train coasting points. For this purpose, a fitness function with target travel time, energy consumption and weighting factors is proposed. Genetic algorithms were used for this search purposes. An interesting observation is that the use of ANNs increases the speed of optimization, and gives researchers the ability to test different optimization with differing genetic algorithm parameters.

Proposed method is used for optimizing coasting points for minimum energy consumption for a given travel time of first 10 km section of Istanbul Ak-saray-Airport metro line, where trains operate every 150 seconds. The section covers 9 passenger stations, which means 8 coasting points for each line. It has been demonstrated that an 16 input ANN can be trained with acceptable error margins for such a system. The optimization method finds the near optimum points for different target travel times and weight factors of the fitness function.

It was found for the given line configurations that the energy saving potential with coasting schemes for the same amount of time increase is far less in the multi-train case, where trains regenerate and feed each other. In the 3 station case, 4.81% increase in travel time with optimum coasting points compared to the flat-out case creates 30.85% energy saving, whereas in the 5 station case, 4.65% increase in travel time with optimal coasting scheme creates only 18.25% energy saving.

Using ANN and GA in combination speeds up optimization, and bigger line segments with more stations can also be optimized with this proposed method.

A simple way of application of the proposed method is using a Driver Information System (DIS). Aksaray – Airport LRT system has been recently equipped with such a system. It is planned to find the optimum coasting points for different headways, and enter these values into the DIS as time and location dependent values. The DIS will give a warning to the driver for start of coast at these pre-defined locations.

It should be noted, however, that some operational parameters are changing dynamically in real life. The train weights and the station waiting times, for instance, affect the energy consumption and the travel time. Authors are aware of staggering difficulties in finding optimum coasting points online for such operational variants. Nevertheless, the paper reveals the advantages of using ANN, and its possible application to optimization of coasting points for the case of multiple stations and multiple lines, and hopefully paves the road for future research in this direction.

Keywords: Mass rail transit, energy efficiency, coasting, artificial neural networks, optimization.

Giriş

Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği (UITP – www.uitp.com) de üyeleri aracılığı ile şehiriçi raylı toplu ulaşım sistemlerinde enerji tüketimini azaltıcı tedbirler üzerine sürekli çalışmakta ve bu konuda özel toplantılar düzenlemektedir (UITP, 1997).

Enerji tüketimini azaltmak için yapılan çalışmalarını enerji kayıplarını azaltıcı, araç üzerinde ve işletme şartlarında yapılabilecekler şeklinde ana sınıflara ayırabiliriz.

Kayıpları azaltmak için özellikle yeni yapılacak hatlarda besleme gerilimi olarak 1500 VDC seçilmesi hem ilk yatırım hem de işletme maliyetlerinin azaltılması açısından önemlidir. Yapılmış olan bir çalışmada (Açıkbaş ve Söylemez, 2004) aynı şartlar altında 1500 VDC besleme sisteminin cer gücü enerji maliyetinde 750 VDC sisteme göre % 10 azalma sağlayacağı belirlenmiştir. İstanbul Ulaşım AŞ tarafından hazırlanmış olan detaylı bir inceleme raporunda (İUAŞ, 2006) İstanbul'un Anadolu Yakasındaki hatlardan birinin verileri kullanılmış ve 2025 yılı işletme planına göre 1500 VDC sisteminin seçilmesi durumunda tasarruf sağlanacak enerji miktarının yıllık 12.5 milyon kWh olacağı görülmüştür.

Raylı sistemlerde trafo merkezi ve iletim sistemlerinde kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıpları azaltmak için: enerji iletim sistemi olan katener veya 3. Ray sistemleri paralelenebilir. Paralleleme kablolarının sıklığının enerji tüketimi üzerine etkisi araştırılmış ve sonuçları (Açıkbaş ve Söylemez, 2005)'de sunulmuştur. Trafo merkezleri arasında yapılacak 1 veya 2 adet paralelleme ile %2.5 civarında, paralelleme noktalarının arttırılması ile %5'e kadar enerji tasarrufu sağlanabileceği gösterilmiştir.

Araç üzerinde yapılan çalışmalarda araçların boş ağırlığının azaltılması, kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, regeneratif frenleme sistemlerinin yaygınlaşması ve bu enerjinin kullanılmayan kısımlarının araç üstünde depolanmasına yönelik araştırmalar devam etmektedir.

İşletme şartlarının enerji verimliliğine etkisi son 15-20 yılda yazılmış ve yayınlanmış birçok ma-

kalede farklı yollardan incelenmektedir. Boşta gitme (coasting) kontrolünden başlayan yöntemler, otomatik tren işletimi olan sistemlerde senkronize tren işletimine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır.

Belirli bir donanım ve sefer güzergâhına sahip bir tren için enerji tüketim miktarı oldukça değişken değerler gösterebilmektedir. Aracın duruş sayısı ve bunu takip eden ivmelenme hareketleri ve bunlarla birlikte aracın maksimum hızı trenin enerji talebinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Teorik bir bakış noktası ile enerji tüketimi açısından en verimli seyir, düşük hızda ve aradaki duruşların olmadığı bir seyirdir.

Zaman çizelgeleri, müşteri odaklılığının yanısıra enerji verimliliği için de kullanılır. Zaman çizelgeleri genellikle hesaplanmış en düşük sefer süresine eklenmiş olan, tahmin edilemeyen gecikmelerin kapatılmasına imkân tanımak için belirli bir miktar “yedek zaman aralığını” kapsar. Yedek zaman aralıkları dakiklik bakımından da bir anahtar etkendir ve araştırmalar yolcuların çok büyük bir oranının dakikliğe seyahat süresi içindeki ufak bir indirgemenen daha fazla önem verdiğini göstermektedir.

Günümüzde, herhangi bir sürücünün yapabileceğinden daha fazla kesinlikte en iyi sürüş stratejisini hesaplayan ve sürekli olarak güncelleyen sürüş öneri sistemleri vardır. Güçlü benzetim programlarının gelişimi ile mobil haberleşme ağları ve ileri telematik çözümler, tren işletmesi ve tren kontrolünün bütün sistemi etkileyen iyileştirmeleri için çok büyük bir çözüm potansiyeli sunmaktadır.

İstanbul raylı sistem hatları ve enerji tüketimleri

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından İstanbul'da kent içi raylı sistemlerin işletmeciliğini yapmak üzere kurulan İstanbul Ulaşım A.Ş (İUAŞ), 2007 Ekim itibari ile, toplam 59.2 km uzunluğundaki kent içi raylı sistem hatlarının işletmeciliğini yapmaktadır. Günde 750000 yolcunun taşındığı bu hatlarda gerçekleşen elektrik enerjisi tüketimi 2002-2006 yılları için Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Hatların son 5 yıldaki enerji tüketimleri

Yıllara göre hatların aylık ortalama enerji tüketimleri (kWh)				
Yıl	Aks-Hav Metro	Tak-4Lev Metro	Tramvaylar	Toplam
2002	1881400	1268017	928102	4077519
2003	2190612	1294873	963607	4449092
2004	2499968	1461435	1009174	4970577
2005	2656533	1491960	1014507	5163000
2006	2693944	1625311	1225476	5544731

Tablo 1'deki değerler incelendiği zaman enerji tüketim seviyelerinin sürekli olarak artmakta oldukları görülmektedir. Aksaray-Havalimanı hattındaki aylık ortalama enerji tüketim miktarının içinde trenlerin tahriki için kullanılan cer gücü enerji miktarı yaklaşık 2200000 kWh'tır. Dolayısı ile bu miktarda yapılacak olan %1'lik bir tasarruf aylık 22000 kWh, yıllık ise 264000 kWh daha az enerji tüketimi demektir. Bu hatta cer gücü tüketiminde 1 yılda ortalama %5 tasarruf elde edilmesi tramvay hatlarının 1 aylık tüketimine eşdeğer azaltım sağlayacaktır. Tek bir hatta elde edilecek tasarrufun miktarı göz önüne alınarak birçok hattan oluşan komple bir raylı sistem ağında elde edilecek tasarruf miktarı düşünülürse enerji tüketimini azaltma için yapılacak her çalışmanın önemi daha iyi anlaşılacaktır.

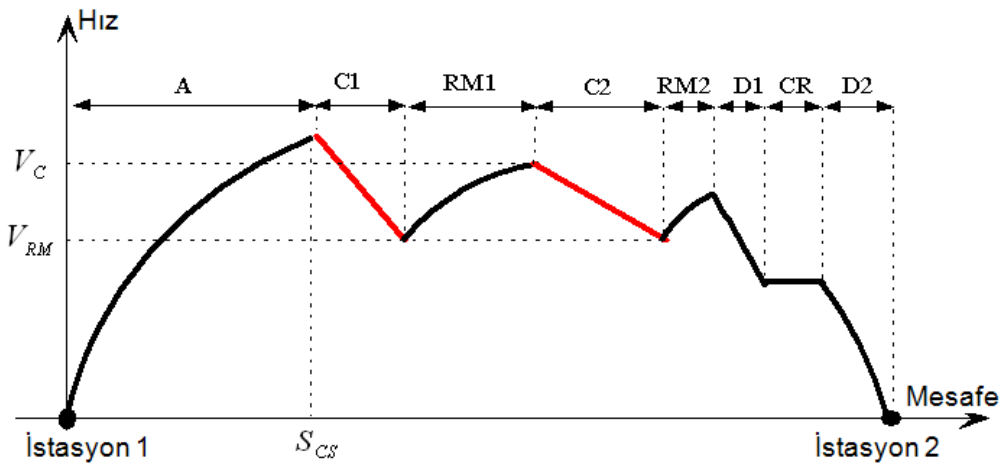
Boşta gitme kontrolü ile enerji tasarrufu çalışmaları

Tam gaz işletmede süre en kısa, ancak enerji tüketimi en fazladır. Boşta gitmeden kasıt trenin

belli bir hızın üstüne çıktığında motorların boşa alınarak trenin kazandığı momentum ile hareket etmesidir.

Doruk saatlerde ve çizelgeden sapılma durumunda zaman önemlidir. Ancak, bunun haricindeki zamanlarda yolculuk süresinin bir miktar uzamasına karşın enerjide sağladığı tasarruf sebebi ile boşta gitme gerçekleştirilir. Bugün bir çok metro hattında boşta gitme belli, sabit noktalarda başlar ve nominal işletme durumu içindir.

Şekil 1'de boşta gitme durumuna ait bir Hız-Yer grafiği verilmiştir. Tren A bölgesinde hız kazanmak için ivmelenir. Genel olarak boşta gitmeye başlamak için belli hıza (V_C) erişme şartı bulunmaktadır. Bu hıza erişilince tren boşta gitmeye başlayabilir (C1 ve C2 bölgeleri). Ancak, bazen trenin belli bir mesafeye erişmeden (S_{CS}) boşta gitmeye başlamasına izin verilmez. Tren boşta giderken belli bir hızın (V_{RM}) altına düşülmesi durumunda tekrar ivme veril



Şekil 1. Boşta gitme durumuna ait hız – yer grafiği

mesi istenir (RM1 ve RM2 bölgeleri). D1 bölgesinde tren hız sınırı için frenlemede, CR bölgesinde tanımlanmış olan hız sınırında süzülmede ve son olarak D2 bölgesinde de istasyonda durmak için frenlemektedir.

Chang ve Sim (1997), ATO sistemine entegre bir boşta gitme kontrolü ile tren hareketlerinin optimizasyonunu genetik algoritma kullanarak yapmayı öneren bir makale hazırlamışlardır. Makalede Predictive Fuzzy Control (PFC)'e dayanan önceki çalışmaların yeterli derecede test edilmediği ve vaka anlatımlarının mevcut olmadığını bildirmekte olup kendi yöntemlerinin ise PFC'ye göre daha hızlı ve kararlı olduğunu belirtmektedirler.

Teorik olarak istasyonlar arası her nokta boşta gitme başlangıç noktası için bir çözümdür. Mesafe sonlu parçalara ayrılabilir bile çözüm kümesi araştırma yöntemleri için oldukça büyük olacaktır. Çözüm uzayının bir kısmı baştan problem dışı bırakılarak daha uygun hale getirilebilir. Örneğin çok düşük hızlarda boşta gitmeye başlama ileride tekrar motor modunu gerektirir. Dolayısı ile daha önceden saptanan bir V_C den daha düşük hızda boşta gitmenin başlaması yasaklanır. Aynı şekilde frenleme bölgesine giren yerlerde de boşta gitme başlangıç noktası seçilmesi anlamlı değildir.

Boşta gitme modu yolculuk süresinde %5'lik bir artış karşılığında %30'lara kadar enerji tasarrufu sağlayabilir. Birçok durumda bu kabul edilebilir bir çözüm oluşturur.

Raylı sistem benzetim programı: SimuX

Raylı ulaşım sistemlerinin tasarım ve analizinde benzetim (simülasyon) büyük bir önem taşımaktadır. Benzetim yardımı ile güç sistemi boyutlandırılabilen, istenilen optimizasyon çalışmaları yapılabilmekte, olası problemler daha sistem inşa edilmeden görülerek çözümlenmekte ve sonuç olarak maliyette önemli azalmalar sağlanabilmektedir. Benzer şekilde mevcut bir sistem üzerinde kullanılan araçların değiştirilmesi veya trenler arası sürenin (headway) kısaltılması gibi büyük modifikasyonlar yapılacağı zaman da si-

mülasyon yardımımıza koşar (Açıkbaş ve Söylemez, 2005). Genel olarak bakıldığında simülasyon programlarının şu amaçlarla kullanılacağı görülür:

- İşletme şartlarında tren performansının belirlenmesi
- Transformatör merkezlerinin ve kesicilerin boyutlandırılması
- Katener sisteminin yeterliliğinin saptanması (Açıkbaş ve Söylemez, 2005)
- Bir trenin pantografındaki maksimum, minimum ve ortalama gerilim değerlerinin bulunması
- Enerji tüketiminin ve kayıplarının saptanması (Açıkbaş ve Söylemez, 2004; 2005)
- Enerji tasarruf programlarının uygulamadan önce test edilmesi (Açıkbaş ve Söylemez, 2007)
- Ray Gerilimi ve Kaçak akım analizi (Söylemez vd., 2005; Söylemez ve Açıkbaş, 2005)
- Farklı besleme şekillerinin test edilmesi (Açıkbaş ve Söylemez, 2005; Söylemez ve Açıkbaş, 2005)
- Regeneratif frenlemenin etkisi ve hattın üretilen bu frenleme enerjisini kabul oranının (receptivity rate) belirlenmesi (Açıkbaş ve Söylemez, 2005; 2007)
- Kısa devre akım ve gerilimlerinin analizi
- Araç zaman çizelgelerinin iyileştirilmesi (İUAŞ, 2006)

Dünyanın çeşitli ülkelerinde raylı sistemlerde benzetim çalışmaları uzun süredir yapılmaktadır (Mellitt vd., 1978; Cai vd., 1995; Goodman, 1998; Yu vd., 2002). Ülkemizde ise daha önce yapılmış olan çalışmalar (Kurtulan, 1992; Ündil, 1994) daha çok tek aracın (ya da dizinin) hareket mekanizmasının simülasyonu ile sınırlı olup tüm sistemi (birden fazla dizi birden fazla yol) ele almamaktadır.

Benzetim programı İstanbul Ulaşım A.Ş. ile yapılan projelerde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar gerçek değerlere büyük yakınlık göstermiştir. İstanbul'daki ve diğer şehirlerdeki yeni hat yapımlarını gerçekleştiren firmalara program yardımıyla hazırlanan raporlar uluslar arası danışmanlık firmalarınca da onaylanmıştır.

İki istasyon (2 PS) arasında tek tren durumunun optimizasyonu

Literatürde bulunan daha önceki çalışmalarda ele alınmış olan bu durum önerilen yöntemle en iyilenmeye çalışılmıştır. Aşağıda test hattına ilişkin veriler verilmiştir. Hattın SimuX gösterimi Şekil 2’de görülmektedir.

Hat uzunluğu: 1 km

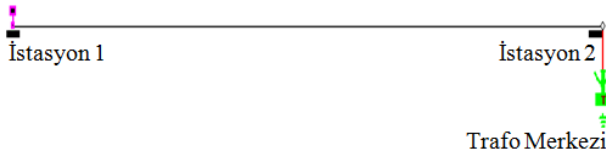
Araç Sayısı: 1 tahrikli araçtan müteşekkil, 23 m.

Trafo merkezi (SS): 1 adet, hat sonunda

Nominal Gerilim: 750 VDC,

Katener sistemi direnci: $4.44 \cdot 10^{-5} \Omega/m$

Maksimum hız: 80 km/h



Şekil 2. Test hattının SimuX gösterimi

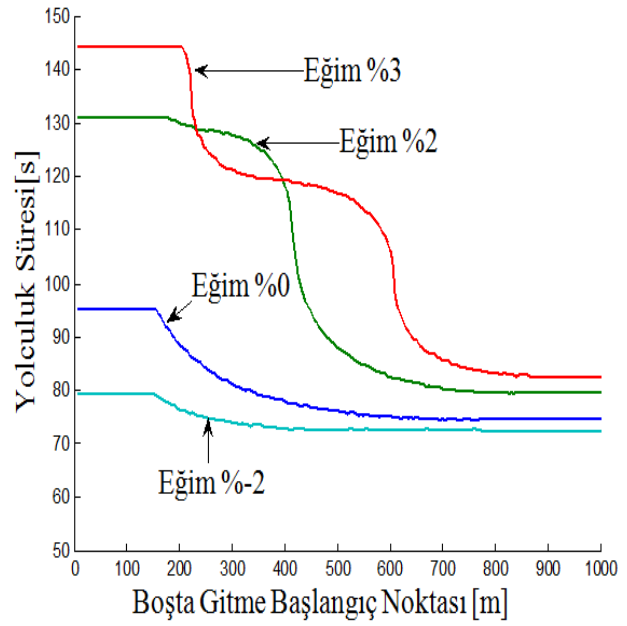
Hattın tam orta noktasında bir eğim değişim noktasının olduğu varsayılarak 121 farklı eğim kombinasyonu için boşta gitmeye başlama noktası değiştirilerek toplamda 24200 adet simülasyon testi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3 ve Şekil 4’te %-2, %0, %+2, ve %+3 sürekli eğimli hat durumları için yolculuk süresi (T) ve enerji tüketimi (E)’nin boşta gitme noktasına göre değişimleri verilmiştir.

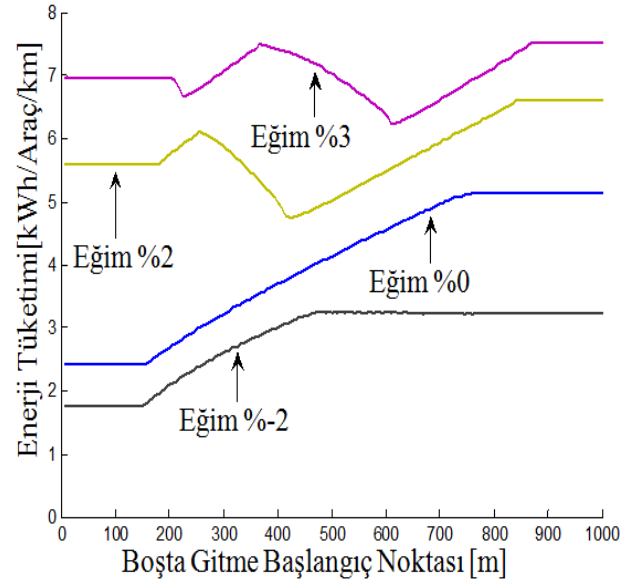
E’nin doğrusallığı yokuş yukarı eğim değerinin yükselmesiyle daha fazla bozulmaktadır. Bunun temel nedeni aracın tekrar ivmelenmeye ihtiyaç duymasıdır. E_{max} değeri %-2 eğim için 3.2 kWh/Araç/km değerinin biraz üstündedir, oysa bu değer %+3 yokuş yukarı tırmanma durumunda 7.5 kWh/Araç/km’ye çıkmaktadır. T_{min} %-2 eğim durumu için 72.5 s iken, bu değer %+3 eğim olması durumunda 82.5 s’e çıkmaktadır. 10 saniyelik fark sadece eğim etkisinden meydana gelmez, düşük gerilimde araç performansının azalmasından da kaynaklanmaktadır.

Şekil 5, %-2, %0, %+2 ve %+3 sürekli eğimlerin tam gaz durumları için zaman-hız grafiğini vermektedir. Artan eğim değeri ile enerji tüke-

timi artarken ulaşılabilen maksimum hız düşmektedir: Tüketim değerleri sırasıyla 3.25 - 5.15 - 6.60 - 7.53 kWh /Araç/km’dir.



Şekil 3. Değişik eğim durumlarında farklı boşta gitme noktaları için T eğrileri

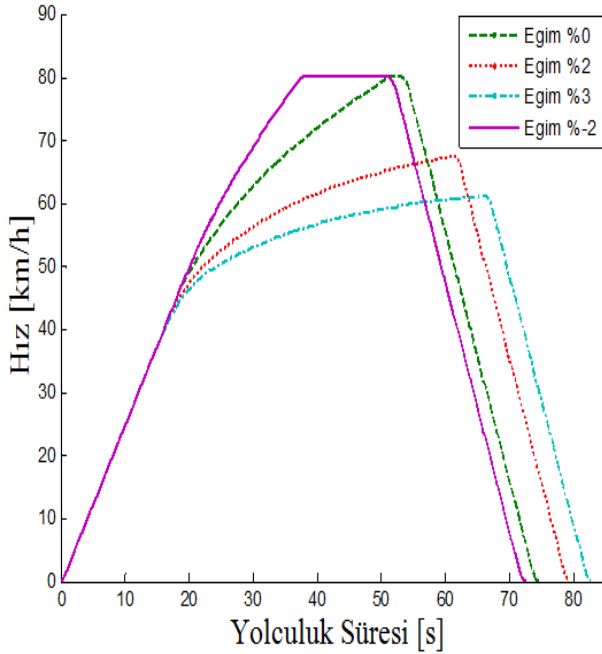


Şekil 4. Değişik eğim durumlarında farklı boşta gitme noktaları için E eğrileri

Farklı hat eğimlerinde verilen zaman artışları için en uygun boşta gitme noktalarının tespiti

İşletmeciler her zaman enerji verimliliği olmayan tam gaz çalışma tarzını kullanmazlar, çünkü

bu tür bir işletme herhangi bir aksaklık için savunmasızdır. Bu yüzden normal işletme şartlarında minimum yolculuk süresine ek zaman denilen bazı ekstra süreler ilave edilir. Bu ek zaman, normal işletim koşulları altında enerji verimliliği için kullanılır, fakat aksama durumunda, oluşan zaman kaybını kapatmak için harcanır. Tanımlanmış olan ek zamanın hat boyunca nasıl dağıtılarak kullanılacağı önemli bir karardır. Ayrıca aynı süre uzamaları için elde edilen enerji tüketim değerleri çok fazla farklılık arz edebilir. Bu sebeple önerilen boşta gitme noktasının hem enerji tüketimi hem de yolculuk süresi üzerine yapacağı etkiyi dikkate alan bir uygunluk fonksiyonu ile uygunluğu test edilmelidir. Uygunluk fonksiyonunu minimize eden şart en uygun değerdir. Çalışmada kullanılan “Uygunluk Fonksiyonu” aşağıda verilmiştir.



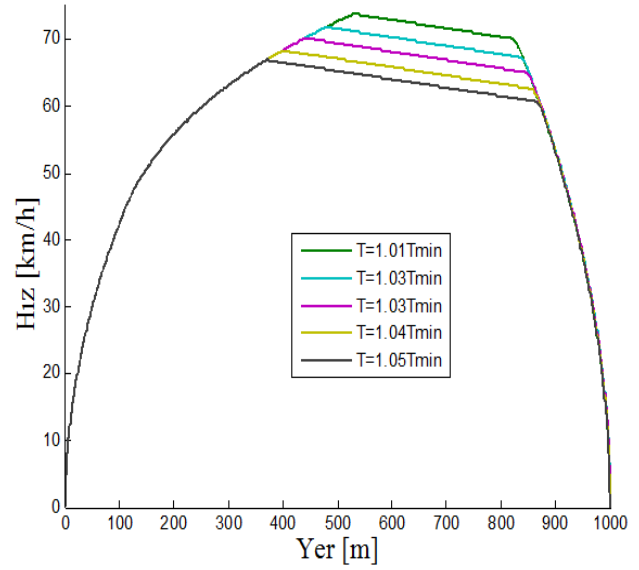
Şekil 5. Değişik eğimler için elde edilen hız – zaman eğrileri

$$f = E \frac{w_E}{E_{Target}} + T \frac{w_T}{T_{Target}} \quad (1)$$

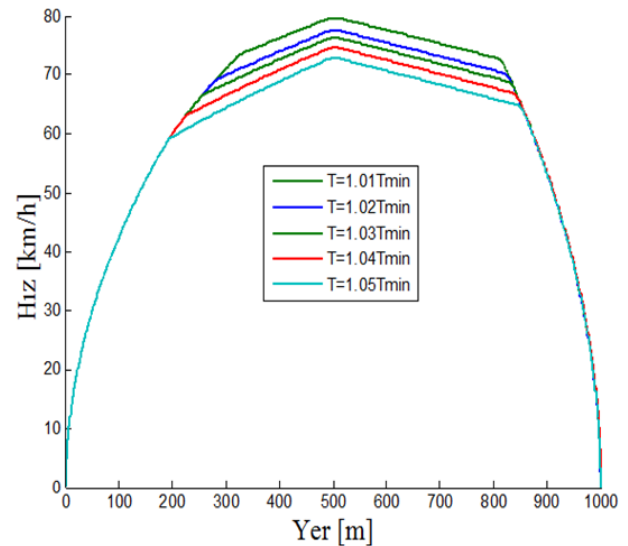
Formülde; E ve T önerilen şart (boşta gitme noktası) için elde edilen enerji ve yolculuk süresidir. w_E ve w_T enerji ve zamana ait ağırlıklardır. Önemleri değerleri ile ters orantılıdır ve genelde $w_E + w_T = 100$ olacak şekilde seçilirler.

E_{Target} ve T_{Target} ise hedeflenen enerji ve yolculuk süresidir.

Çalışmanın bu aşamasında T_{min} 'in %1, %3 ve %5'lik fazlası için en uygun boşta gitme noktaları belirlenmiştir. Tablo 2'de iki farklı eğim kombinasyonu için bulunan en uygun boşta gitme noktaları ve enerji tasarruf değerleri verilmiştir. Şekil 6 ve 7'de bu durumlar için elde edilen optimum hız profilleri verilmiştir.



Şekil 6. Eğim bulunmayan hatta farklı süre artışlarında optimum hız-yer eğrileri



Şekil 7. Eğimli (0-500 m'de %-3, 500-1000 m'de %0.6) hatta farklı süre artışlarında optimum hız-yer eğrileri

Tablo 2. İki eğim kombinasyonu için T_{min} 'e göre süre artışına ait optimum boşta gitme noktaları ve elde edilen enerji tasarruf değerleri

		T_{min} 'e Göre Süre Artışı				
		%1	%2	%3	%4	%5
Eğim1*=%0.0	Xopt (m)	540	490	450	410	380
Eğim2=%0.0	ΔE (%)	16.06	20.40	23.74	27.23	29.83
Eğim1=%-3.0	Xopt (m)	335	290	265	235	205
Eğim2=%0.6	ΔE (%)	25.44	31.39	34.76	39.21	43.78

*Eğim 1 hattın ilk yarısındaki, Eğim 2 ise hattın ikinci yarısındaki eğimi göstermektedir.

Yapay sinir ağları (YSA) ve genetik algoritma (GA) kullanılarak optimizasyon

Genetik algoritma (GA) güçlü bir doğrudan arama yöntemidir. GA, optimize edilmek istenen değişkenler için (bu durumda boşta gitmeye başlama noktaları) rastgele girişleri üretir. Daha sonra bir uygunluk fonksiyonunu çağırır ve bu rastgele atanmış değerler için değerini hesaplar. GA'nın amacı uygunluk fonksiyonun değerini minimize eden değişken değerlerini bulmaktır. Bu işlemi her bir nesil için tanımlanmış olan birey sayısına kadar tekrarlar. GA bir nesil içindeki en düşük uygunluk değeri veren bireylerin bir kısmını bir sonraki nesile aktarır, uygun olmayan sonuçları ise çaprazlamaya veya mutasyona tabi tutar, en kötülerini ise doğrudan eler, bunların yerlerine dışarıdan yeni bireyleri nüfusa dahil eder. Bunların oranları başta tanımlanır. Her nesilde uygunluk değerini en küçükleyen değerlere yaklaşılır, ve tanımlanmış olan nesil sayısına ulaşıncaya veya belli bir nesil sayısı süresince sonuçta bir iyileşme elde edilemeyince GA optimizasyonu biter (Goldberg, 1989).

Literatürde bulunan çalışmalarda GA direkt olarak bir simülasyon programını çağırılmaktadır. Bu da optimizasyon süresinin uzun olmasına yol açmaktadır. Ayrıca, uygunluk fonksiyonunun parametreleri değiştirildiği zaman bütün simülasyon çalışmalarının tekrarlanması gerekmektedir. Örneğin 20 bireylik nüfusun kullanıldığı bir optimizasyonda eğer 100 nesillik bir optimizasyon istenirse toplamda 2000 kez simülasyon gerçekleştirilmek durumunda kalacaktır. 5 farklı hedef süre için optimum noktaların bulunması içinse toplamda 10000 kere simülasyon gerçekleştirilecektir. GA'nın simülator yerine

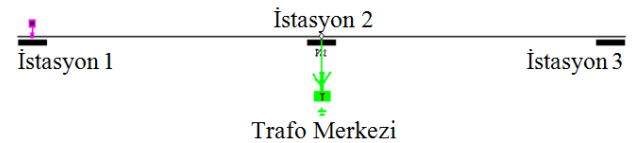
YSA'yı kullanması durumunda bu sorun ortadan kaldırılmış olmaktadır.

YSA'lar biyolojik sinir sistemini taklit etmeye çalışan nöron denilen elemanlardan oluşmaktadır. Nöronlar arasındaki ilişkilerin ağırlık değerleri ile çıkış değeri belirlenmektedir. YSA'lar belli sayıda veri setleri eğitilebilmektedir. Eğitilmiş olan YSA, daha önceden kendisine gösterilmemiş olan girdiler için çıktılarını çok hızlı bir şekilde büyük doğrulukla tahmin edebilmektedir. GA'nın simülator yerine eğitilmiş olan YSA'ları çağırması ile optimizasyon süreci çok hızlı tamamlanabilmektedir.

Üç istasyonlu hatta en uygun boşta gitme noktalarının bulunması

Test hattı ve gerçekleştirilen testler

Üç ve daha fazla istasyon durumu karmaşıktır ve daha geniş çözüm uzayından kombinasyonlarının araştırılmasını gerektirir. Şekil 8'de verilen test hattı 2 km uzunluğundadır ve 51 m, 1000 m, ve 1950 m'lerde 3 istasyon içermektedir. İstasyon bekleme süresi 20 saniye olarak alınmıştır. Tren istasyona girerken ve istasyondan ayrılırken hız limiti 50 km/h'dir. İki istasyon durumundaki araçlardan oluşan 4'lü dizi kullanılmıştır. Katener sistem direnci $6.02 \cdot 10^{-5} \Omega/m$ olarak alınmıştır. Düz olan hat, 820 V DC yüksüz çıkış gerilimi olan bir adet trafo merkezi ile 1000 m'den beslenmektedir.



Şekil 8. Üç istasyonlu test hattının gösterimi

3 istasyonlu bu hatta 2 adet boşta gitme noktası bulunacaktır. 200 adet random boşta gitme noktaları kombinasyonu için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Testlerde $V_C=50$ km/h, $V_{RM}=1$ km/h alınmıştır. Bir kısım test sonucu örnek olarak Tablo 3'te verilmiştir. Tablodaki 2. ve 3. sütun 1. ve 2. boşta gitmeye başlama noktalarıdır. 3. sütundaki değer kWh/Araç/km enerji tüketimini, son sütun ise trenin yolculuk süresini vermektedir.

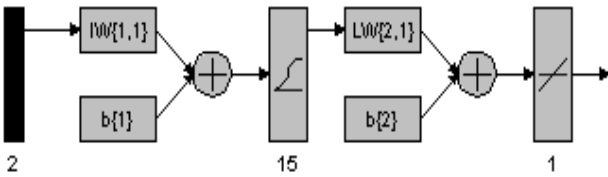
Tablo 3. Bazı farklı boşta gitme noktaları için test sonuçları

Örnek No	X_1	X_2	E	T
1	599.76	1404.7	4.48463	170
2	771.07	1514.42	5.17509	167
3	465.5	1657.62	4.75807	170
4	269.7	1009.67	2.9317	198

Tam gaz işletme durumunda yolculuk süresi (T_{min}) 167 sn, enerji tüketimi (E_{max}) ise 5.7 kWh/Araç/km olarak saptanmıştır. Bu iki değer karşılaştırmalarda baz olarak alınacaktır.

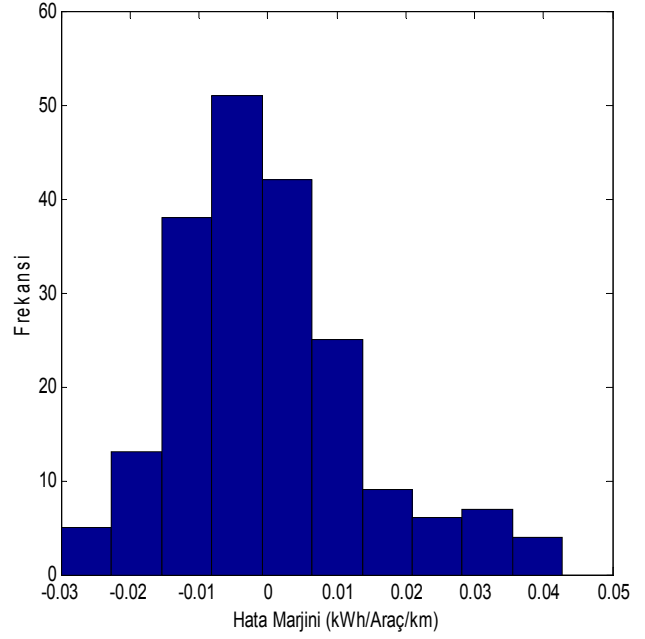
YSA eğitimleri

YSA'ların eğitimlerinde yukarıda bahsolunan 200 adet veri seti kullanılmıştır. Enerji (E) ve yolculuk süresi (T) için iki farklı YSA eğitilmiştir. E için eğitilmiş 2-15-1 YSA Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. E için eğitilmiş 15 nöronlu ağ

Şekil 9'daki ağda 2 giriş (boşta gitme noktaları) bulunmaktadır. Matlab NNTOOL araç kutusu kullanılarak oluşturulan YSA'nın 15 nöronlu gizli katmanının aktivasyon fonksiyonu logsig olarak seçilmiştir. 1 çıkışa sahip çıkış katmanında ise purelin aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. 200 adet eğitim verisi için YSA'nın ürettiği sonuçlardaki hataların histogram dağılımı Şekil 10'da verilmiştir.

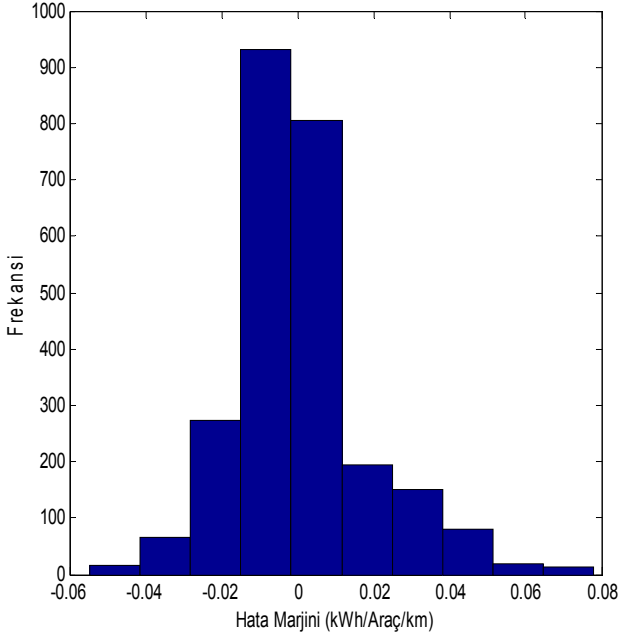


Şekil 10. Eğitim setine ait YSA çıktılarının E değerlerindeki hataların dağılımı

Eğitilmiş YSA'ların sonuçlarının doğruluğu daha önceden eğitimde kullanılmayan veri setleri ile test edilip denetlenmelidir. Bu sebeple, birinci boşta gitme noktası 51-800m arasında 15 metrelik adımlarla, ikinci boşta gitme noktası ise 1015-1750 m arasında 15 metrelik adımlarla değiştirilerek 2550'yi aşkın farklı kombinasyon SimuX ile simule edilmiş ve bu simülasyonların sonuçları eğitilmiş YSA'ya girilmiştir. Bu test verileri için eğitilmiş YSA'nın ürettiği E değerlerinin simülasyon sonuçlarına göre hataları histogram dağılımı Şekil 11'de verilmiştir.

Şekil 11'deki histogramdan görüleceği üzere hedeflerle kıyaslandığında YSA'nın maksimum hata derecesinin %3'ün altında büyük çoğunluğunun ise %2 sınırının altında kaldığı görülmektedir.

Benzeri uygulama T için de gerçekleştirilmiştir. 2-32-1 (32 nöronlu) YSA 200 adet eğitim veri seti ile yukarıda E için bahse olunan hassasiyette öğrenme gerçekleştirmiştir. YSA'ların sonuçlarının hassasiyeti gizli katmanda kullanılan nöron sayısı, eğitimde kullanılan veri seti adeti vb. hususlara bağlıdır. Ancak, bu konunun detayları makalenin konusu dışında olduğu düşünüldüğü için detaya girilmemiştir.



Şekil 11. Test Seti İçin YSA Çıktılarının E değerlerindeki hataların dağılımı

GA ile optimizasyon

Matlab GATool aracı en uygun boşta gitme noktalarının bulunmasında kullanılmıştır. Optimizasyonun hızını artırmak için boşta gitme noktalarının GA tarafından ilk rastgele atanmasında sınırlama getirilmiştir. Bu sınırlandırmalar aracın istasyon duruşu için frenleme yapması gereken veya ilk kalkışta 50km/h'ye ulaşmadığı yerlerin optimizasyon için gerçekleştirilen aramada ihmal edilmesini hedeflemektedir. Bir tam gaz çalışmasının Hız-Yer profiline bakarak bunların değerleri optimizasyon öncesi çalışma ile belirlenebilir. Bu test durumu için $X_1=300-800$ m ve $X_2=1300-1800$ m arasında sınırlandırılmıştır.

GA parametrelerinden, nüfus 20 bireyli, nesil sayısı ise 500 olarak atanmıştır. Dolayısı ile YSA'ların kullanılmaması durumunda bu parametreler ile tek bir inceleme vakasına ait en uygun boşta gitme noktalarının bulunması için 10000 kez simülatör çağırılma durumunda kalıncaktı.

3 adet farklı hedef süre için bulunan en uygun boşta gitme noktaları ve bu noktalar için YSA'ların ve SimuX yazılımının E ve T tahminleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Farklı hedef süreler için bulunan en uygun boşta gitme noktaları ve bunlara ilişkin YSA ve SimuX sonuçları

$T_{Target}=171$ sn	$T_{Target}=174$ sn	$T_{Target}=177$ sn
$X_1 = 541$ m	$X_1 = 431$ m	$X_1 = 352$ m
$X_2 = 1404$ m	$X_2 = 1370$ m	$X_2 = 1359$ m
$E = 4.35$	$E = 3.94$	$E = 3.674$
$T = 171.00$	$T = 173.98$	$T = 176.95$
$\Delta T = 3.01$	$\Delta T = 4.81$	$\Delta T = 6.60$
$\Delta E = 23.72$	$\Delta E = 30.86$	$\Delta E = 35.54$
$E_{SimuX}=4.33$	$E_{SimuX}=3.939$	$E_{SimuX}=3.676$
$T_{SimuX}=171$ sn	$T_{SimuX}=174$ s	$T_{SimuX}=178$ sn

Tablo 4 incelendiği zaman tam gaz durumuna göre yolculuk süresini %3 ($\Delta T=3$) arttıran ($T_{Target}=171$ sn) en uygun boşta gitme noktalarının $X_1=541$ m ve $X_2=1404$ m olduğu görülmektedir. Bu noktalarda boşta geçilmesi durumunda enerji tüketimi tam gaz durumuna göre %23.72 azalacaktır (ΔE). Yolculuk süresinin %6.6 artmasına izin verilmesi durumunda elde edilecek tasarruf miktarı %35'in üzerine çıkmaktadır.

Bu optimum noktalarda boşta gitme durumunda SimuX'un cevapları ise son satırda verilmiş olup, YSA'nın ürettiği sonuçların bu değerlere çok yakın olduğu dikkati çekmektedir.

Ele alınan optimizasyonlarda hat oldukça basit olup simülatörün çözümleri bulması saniyeler mertebesinde olmaktadır. Ancak, optimize edilmeye çalışılan sistem uzadıkça çözüm süresi de katlanarak artmaktadır. 20 km'lik gerçekçi bir hattın simülasyonu 2.0 GHz hıza sahip bir bilgisayarda 5 dakika kadar sürebilmektedir. Dolayısı ile bir GA optimizasyonunda gerçekleştirilecek olan simülasyon sayısı optimizasyon hızına doğrudan etki edecektir. Dolayısı ile önerilen yöntemin uzun hatların optimizasyonunda büyük fayda sağlayacaktır.

Daha uzun hatlarda en uygun boşta gitme noktalarının bulunması

Tamamlanmış olan doktora çalışmasında önerilen yöntemle, Aksaray – Havalimanı metro hattının ilk olarak 5 istasyon, daha sonra ise yaklaşık yarı uzunluğu olan 10 km'lik kısmındaki 9

istasyonlu çift hatlı gerçek bir sistemler istenen hedeflere göre optimize edilebilmiştir.

Çoklu tren durumunun kullanıldığı bu çalışmalarda benzer süre uzamasına yol açan boşta gitme durumlarında elde edilen enerji tasarruf miktarının tek tren durumuna göre daha az olduğu tespit edilmiştir. 3 istasyonlu tek tren durumunda yolculuk süresinin %4.81 uzamasına yol açan en uygun boşta gitme durumunda enerji tüketiminin %30.85 azalacağı tespit edilmiştir. Ancak, yolculuk süresini %4.65 arttıran en uygun boşta gitmede elde edilen tasarruf değerleri 5 istasyonlu durumda %18.25, 9 istasyonlu durumda ise %16.39 çıkmıştır. Bunun sebebi çok istasyonlu ve çok trenli durumlarda regeneratif frenlemenin etkisinin dikkate alınmasıdır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, bir raylı sistemde tren rotası boyunca hız profilini en uygun hale getirmenin, enerji tüketimini azaltmada en etkili yöntemlerden biri olduğu önceki çalışmalara paralel olarak gösterilmiştir.

İstasyonlar arası mesafe içinden en uygun boşta geçme noktasının saptanması için çok büyük bir çözüm uzayının taranması gerekmektedir. İstasyon sayısı, dolayısı ile boşta geçme noktalarının sayısı arttıkça bu çözüm uzayı katlanarak artmakta, optimizasyon için gereken hesap süresi de uzamaktadır. Bu sıkıntılardan ötürü şimdiye kadar yapılmış bilimsel çalışmalarda sadece 2 istasyon arasında tek tren kullanılagelmiştir.

Bu makalede özetlenmeye çalışılan araştırmada trenlerin boşta gitme noktalarının verilen bir hedef yolculuk süresi için mümkün olduğunca hızlı bir şekilde optimize edilebilmesi için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yaklaşım GA (Genetik Algoritma), YSA (Yapay Sinir Ağları), ve çok hatlı ve çok trenli sistem simülasyon yazılımının birlikte kullanımını içermektedir.

Simülasyon yazılımı, YSA için eğitim ve test verilerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Eğitilmiş YSA'lar değişik boşta gitme konumları için yolculuk süresi ve enerji tüketimini tahmin etmede kullanılmıştır. Optimizasyon kısmında

hedef yolculuk süresi, hedef enerji tüketimi ve ağırlık faktörleri içeren bir uygunluk fonksiyonunun kullanılması önerilmiştir. Uygunluk fonksiyonunu minimize eden boşta gitme noktalarının belirlenmesinde GA araştırma yöntemi kullanılmıştır. Uygunluk fonksiyonunda değişik ağırlık değerleri, GA'nın farklı parametreleri ile optimizasyonlar gerçekleştirmek için eğitilmiş olan YSA'ların kullanılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir.

Önerilen yöntemle yapılacak bir optimizasyon çalışmasının sonuçları gerçek hatlara uygulanabilir. Manuel sürüslü sistemlerde bunu gerçekleştirmenin en basit şekli sürücülerin bir sürücü bilgilendirme sistemi ile uyarılarak trenlerin saptanan noktalarda boşta alınmalarının sağlanmasıdır.

Yöntemin faydası özellikle işletmeye alınacak yeni hatlarda ortaya çıkmaktadır: Sürücüler yeni açılan hattı tanıyarak zaman için en iyi olmasa da iyi sayılabilecek bir enerji verimli sürüş yöntemini uzmanlıkları ile geliştirebilmektedirler. Önerilen yöntemle bu deneme yanılma yöntemi yapılmadan birinci günden itibaren enerji tasarruflu sürüş gerçekleştirilebilir. Aynı husus otomatik sürüş kontrollü sistemlerde tasarruf miktarının daha da iyileştirilmesi için kullanılabilir. İstanbul Büyükşehir Belediyesinin mevcut raylı sistem ağını 550 km'ye çıkartma planları düşünüldüğü zaman konunun önemi daha net anlaşılabilir.

Ayrıca, geliştirilen hibrit yöntemin başka çalışmalarda da kullanılabileceği düşünülmektedir. Yeni hatlarda olası trafo merkezi yerleşim düzenleri içinden, izin verilen minimum tren gerilimi ve maksimum ray gerilimi koşulları çerçevesinde, enerji tüketimini minimize eden yerleşimin bulunması, trafo yerlerinin optimize edilmesi ele alınabilecek olası konular arasındadır.

Kaynaklar

Açıkbaş, S. ve Söylemez, M.T., (2004). Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation, *Computers in Railways IX*, WIT Press, Dresden, Germany, 951-960.

- Aıkbaş, S. ve Syilemez, M.T., (2005). Raylı toplu taşımda enerji verimliliği ve katener sistemlerinin paralellenmesi, Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Turkey.
- Aıkbař S. ve Syilemez M.T., (2005). Upgrading the rolling stock-its effects on the traction power supply system, IEE International Conference on Railway Engineering, Hong Kong, China, paper no: B1-3.
- Aıkbař S. ve Syilemez M.T., (2007). Energy wise driving of a mass transit train, 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey.
- Aıkbař, S. ve Syilemez, M.T., (2005). Catenary system paralleling and its effect on power consumption and regenerated energy recuperation, 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey.
- Aıkbař, S. ve Syilemez, M.T., (2007). Parameters affecting braking energy recuperation rate in DC rail transit, ASME/IEEE Joint rail conference, Colorado, USA.
- Cai, Y., Irving, M.R. ve Case S.H., (1995). Modeling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems, *IEE Proceedings*, Electrical Power Applications, **142**, 5, 323-328.
- Cai, Y., Irving, M.R. ve Case S.H., (1995). Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking, *IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution*, **142**, 5, 445-452.
- Chang, C.S. ve Sim, S.S., (1997). Optimising train movements through coast control using genetic algorithms, *IEE Proceedings*, Electrical Power Applications, **144**, 1.
- Goldberg, D.E., (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Boston.
- Goodman, C.J., Siu, L.K. ve Ho, T.K., (1998). A review of simulation models for railway systems, International Conference on Developments in Mass Transit Systems, IEE, 80-84.
- İUAş - İstanbul Ulaşım Ař, (2006). Kadıky – Kartal metro hattı enerji tkretimini 750 VDC ve 1500 VDC durumları iin karşılaştırılması, Dahili rapor, İstanbul.
- İUAş, (2006). Aksaray – havalimanı hafif metro hattı istasyon giriş ve ıkışlarındaki hız sınırının ve ara maksimum ivme değerinin arttırılmasının etkileri, Dahili rapor, İstanbul.
- Kurtulan, S., (1992). Bir elektrikli ulaşım sisteminin modellenmesi ve simlasyonu, *Doktora Tezi*, İT Fen Bilimleri Enstits, İstanbul.
- Mellit, B., Goodman, C.J. ve Arthurton, R.I.M., (1978). Simulator for studying operational and power-supply conditions in rapid-transit railways, *IEE Proceedings*, Electrical Power Applications, **125**, 4, 298-303.
- Yu, D., Lo, K.L., Wang, X. ve Wang, X., (2002). MRTS traction power supply system simulation using Matlab/Simulink, Vehicular Technology Conference, IEEE, 308-312.
- Syilemez, M.T., Aıkbaş, S. ve Kaypmaz, A., (2005). Controlling rail potential of DC supplied rail traction systems, *TBİTAK ELEKTRİK Journal ELECO 2005 Special Edition*.
- Syilemez, M.T. ve Aıkbař, S., (2005). Comparison of stray currents and rail voltage profiles between 750VDC and 1500VDC power supply systems using simulation, *IEE International Conference on Railway Engineering*, Hong Kong, China, paper no: B5-2.
- UITP, (1997). *Public transport: The environment and economic efficiency*, Part 2, UITP 52. International Congress, Stuttgart, Germany.
- ndil, S., (1994). Bir elektrikli ulaşım taşitinin bond graf metodu ile simlasyonu ve geici rejim analizi, *Doktora Tezi*, YT Fen Bilimleri Enstits, İstanbul.
- Yu, D., Lo, K.L., Wang, X. ve Wang, X., (2002). MRTS traction power supply system simulation using Matlab/Simulink, Vehicular Technology Conference, IEEE, 308-312.