

Sabit-Blok Sinyalizasyon Sistemlerinde Makas Enerji Tasarruf ve Eş-Yaşlandırma Kriterlerine Göre Güzergâh Seçimi

Okan ŞEREMET¹, Mustafa Seçkin DURMUŞ^{*2}, İlker ÜSTOĞLU³

¹ Cloud Nesil, Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Geliştirme Merkezi, Denizli, Türkiye

² Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elk.-Elektronik Müh. Bölümü, Denizli, Türkiye

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elk.-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Müh. Bölümü, İstanbul, Türkiye

(Alınış / Received: 05.02.2018, Kabul / Accepted: 04.06.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 28.06.2018)

Anahtar Kelimeler

Sabit-blok sinyalizasyon sistemleri,
Enerji tasarrufu,
Makas eş-yaşlandırma,
Trafik kumanda merkezi

Özet: Günümüzde raylı sistemlerin giderek yaygınlaşması ve hızlı gelişim göstermesi, bu sistemlerin ihtiyaç duydukları enerji miktarının artmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte, zaten ilk yatırım maliyetleri yüksek olan raylı sistemlerin, bakım, onarım maliyetleri ve enerji tüketim seviyeleri de yüksek değerlere ulaşmıştır. Raylı sistemleri etkin kullanan yönetimler bu maliyetlerin azaltılması ve yatırımların daha uzun ömürlü olması için Ar&Ge merkezleri ve üniversiteler ile birlikte birçok çalışma yürütmektedir. Bu çalışmada, sabit-blok sinyalizasyon sistemi ile işletilen bir demiryolu depo sahasında bulunan trenler için güzergâh seçimi (rota rezervasyonu) iki farklı kriter göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. İlk kriter, güzergâh üzerinde konum değiştirecek (çevrilecek) toplam makas sayısının hesaplandığı enerji tasarruf kriteri, ikinci kriter ise, makasların konum değiştirme sayılarının (makas yaşı) birbirlerine eşitlenmeye çalışıldığı makas eş-yaşlandırma kriteridir. Her iki algoritma gerçekleştirilmiş ve rasgele dispeçer davranışları ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları ile önerilen algoritmaların enerji tasarrufu sağladığı ve maliyetleri düşürdüğü doğrulanmıştır.

Route Selection in Fixed-Block Signaling Systems According to Point Energy Saving and Co-Aging Criteria

Keywords

Fixed-block railway signaling systems,
Energy saving,
Point co-aging,
Traffic control center

Abstract: Nowadays, the expansion and the rapid development of railway systems result with the increase in the amount of the energy needed by these systems. However, maintenance, repair costs and energy consumption levels of railway systems which already have high initial investment costs, have reached high-order. Governments which effectively use railway systems have many studies with universities and R&D departments to decrease these maintenance costs and increase the lifetime of investments. In this study, route selection (reservation) for the trains in a depot area which is operated by fixed-block signaling system is realized according to two different criteria. The first criteria is energy saving in which the total number of points on a route is calculated, the second criteria is point co-aging in which the total number of point movements (point age) are equalized to each other. Both algorithms are realized and compared with random dispatcher behaviour. It is verified by the simulation results that the proposed algorithms decreases the costs and provides energy saving.

1. Giriş

İnsanlığın enerjiye olan ihtiyacı, medeniyetlerin gelişimi ve yaşam standartlarıyla paralel olarak artış göstermektedir. Bu artışı kirlilik, çarpık kentleşme ve ulaşım sorunları takip etmektedir ki günümüzde nüfusun ve göçlerin de artmasıyla ulaşım, özellikle de

kalabalık nüfusa sahip büyük şehirlerde çözülmesi gereken büyük bir problem haline gelmiştir [1]. Bu amaçla gelişmiş ülkeler ve şehirler, enerjiyi verimli kullanan, emniyetli, çevreye duyarlı ve hızlı toplu ulaşım sistemlerini kullanmakta ve geliştirmektedir [2, 3]. Aynı zamanda ülkelerin gelişmişlik seviyesini belirlemede bir kriter olan raylı sistemler de bu amaç

*İlgili yazar: msdurmus@pau.edu.tr

doğrultusunda en çok tercih edilen ulaşım sistemlerinden bir tanesidir [4].

Ancak raylı sistemler her ne kadar yukarıda sayılan avantajlara sahip olsalar da yaygınlaşmaları ve yüksek hızlara ulaşmaları nedeniyle ihtiyaç duydukları enerji miktarı büyük boyutlara ulaşmıştır [5]. Bu nedenle, enerji tüketiminin azaltılması veya enerjinin daha etkin şekilde kullanılmasına yönelik çalışmalar [6-9] gerek demiryolu araçlarında [10], gerekse demiryolu ekipmanlarında [11, 12] farklı yöntemlerin geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır [13-15]. Ayrıca, toplu taşıma sistemi olarak kullanılmaları bu sistemlerde emniyet kavramını oldukça önemli hale getirmiştir [16]. Emniyetin temin edilebilmesi için demiryolu saha ekipmanlarının bakımları periyodik olarak yapılmak zorundadır [17]. Bu nedenle, raylı sistem işletmeleri yüksek ilk yatırım maliyetlerine ek olarak, enerji ve bakım maliyetlerine de ek bütçe ayırmaktadırlar.

Bu çalışmada ise, saha ekipmanlarından en önemlisi olan makasların arıza kontrolü, enerji tasarrufu (en az sayıda makasın çevrileceği güzergâhın belirlenmesi) ve eş-yaşlandırma (sahada bulunan tüm makasların yer değiştirme sayılarının eşitlenmesi) kriterlerine göre dispeçere en uygun güzergâh tavsiyesinde bulunan bir kumanda merkezi yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen kumanda merkezi yazılımında enerji tasarruf, makas eş-yaşlandırma ve bu iki kriterin aynı anda değerlendirildiği üçüncü bir algoritma bulunmaktadır. Yukarıda bahsi geçen enerji tasarrufu, makas eş-yaşlandırma ve her iki algoritmanın ortak kullanıldığı durum için benzetim çalışmaları yapılmış ve önerilen algoritmaların doğrulukları gösterilmiştir.

Literatürde enerji maliyetlerinin düşürülmesine yönelik olarak yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmadaki temel hedef demiryolu araçlarında özellikle de demiryolu araç tahrik sistemlerinde kullanılan enerji maliyetlerinin düşürülmesinden ziyade sabit-blok demiryolu sahalarında kullanılan makaslar tarafından harcanan enerjinin güzergâh tanzimi yapılırken azaltılmasına yönelik bir çalışma olmasıdır.

Çalışma şu bölümlerden oluşmaktadır: 1. bölümde literatür araştırması, demiryolu sinyalizasyon sistemlerinin yapısı ve bileşenlerinden bahsedilmiştir. 2. bölümde arıza, enerji ve bakım ile ilgili problemlerin tanımları ve çözüm olarak üretilen algoritmalar anlatılmıştır. 3. bölümde bu algoritmaların bilgisayar ortamında çalıştırılması ve benzetim için seçilen Esenler Tren Deposu hakkında bilgiler verilmiş, benzetim sonucu elde edilen veriler grafiksel olarak ifade edilmiş ve irdelenmiştir. Son olarak 4. bölüme çalışmada elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. Problemin Tanımı ve Geliştirilen Çözüm

Demiryolu makasları trenin emniyetli olarak yolculuk yapmasında hayati öneme sahip bileşenlerden bir tanesidir [18]. Trenler, karayolu araçlarından farklı olarak, raylar arasında makaslar yardımıyla geçiş yapabilmektedir [19], [20]. Makaslarda meydana gelebilecek bir arıza trenin raydan çıkması veya kopması gibi istenmeyen durumlar ile sonuçlanabilir. Bu nedenle, elektrikli demiryolu makasları dışarıdan yanlış bir müdahale veya sabotaj tehlikesine karşı özel olarak tasarlanmaktadır.

Sabit-blok sinyalizasyon sistemlerinde, dispeçer (görevli memur) tarafından sinyal sistemine güzergâh talebi yapıldığında öncelikle sahadaki sinyal, makas gibi ekipmanlarda herhangi bir arıza olup olmadığı sinyal sistemi tarafından kontrol edilmektedir. Herhangi bir ekipmanda arıza tespit edilmesi durumunda ilgili ekipmanla ilgili veya ilgili ekipmanı içeren tüm talepler sinyal sistemi tarafından reddedilmekte ve trafik kumanda merkezindeki sorumlu dispeçere bildirilmektedir. Eğer talep edilen ekipmanlarda veya talep edilen güzergâh üzerinde bulunan ekipmanlarda herhangi bir arıza yok ise daha önceden tanımlı emniyet kriterleri kontrol edilerek güzergâha ait giriş sinyalinin uygun renk bildirimi vermesi sağlanmakta ve trenin geçişi gerçekleştirilmektedir [21], [22].

Dispeçerler güzergâh seçimi işlemlerinde genel olarak boş olan yolu seçmekte, güzergâhın açılabilmesi için çevrilmesi gereken makas sayısı ile ilgilenmemektedirler. Bu nedenle, trenler daha az makas çevrilerek gidebilecekleri bir noktaya fazla makas çevrimi içeren güzergâhı kullanarak gitmektedirler. Demiryolu makasları ilk çevrim anında şebekeden oldukça yüksek akım (~20A) çekmektedirler. Bu da, konum değiştiren bir makasın başlangıç anında saniyede 960Watt gibi bir güç tüketmesine sebep olmaktadır (yaklaşık olarak 0.40 TL'ye karşılık gelmektedir). Çevrilen makas sayısının artması çekilen akımın artmasına, dolayısıyla daha fazla enerji tüketilmesine sebep olmaktadır. Makas çevrim sayısı en az olan güzergâhın belirlenmesi ile bu enerji tüketiminin önüne geçilebilmektedir.

Bu çalışmada önerilen ilk algoritma, en az makas çevrimi ile gidilecek olan noktaya treni ulaştıracak güzergâhı belirleyerek enerji tasarrufu sağlamaktadır. Enerji tasarruf kriterince her aday güzergâha tanzim edilmesi durumunda üzerinde konumu değişecek makas sayısına göre ceza puanı verilmektedir. Makas konum değişim sayısı arttıkça aday güzergâhın aldığı ceza puanı artacaktır ve tavsiye listesinde alt sıralara düşecektir. En az ceza puanını alan güzergâh birinci sıraya yerleşecektir.

Dispeçer alışkanlıklarından bir tanesi de sürekli aynı güzergâhın kullanılması ve ilgili güzergâh üzerinde bulunan makasların sahada bulunan diğer makaslara

göre daha fazla çevrilmesi ile daha erken ömürlerinin tükenmesidir. Demiryolu makaslarına genel olarak 6 aylık veya 1 yıllık periyodik bakımlar yapılmaktadır. Konum değiştirme sayısı fazla olan makaslar daha erken yıpranmaktadır. İşletme sırasında arızalanan bir makas olursa periyodik bakım süresi beklenmeden ayrıca bakım ekibi yönlendirilmektedir. Bakım süreci başladığında veya arıza durumlarında makasın üzerinde bulunduğu hat, makas kullanılır hale gelene kadar ulaşıma kapatılmaktadır. Bu da işletmeye ek bakım maliyeti getirmektedir.

Bu çalışmada önerilen ikinci algoritma, saha üzerinde bulunan makasların çevrim sayılarını (makas yaşı) göz önünde bulundurmak ve makas çevrim sayılarını birbirlerine yaklaştırarak makasları eş-yaşlandırmaktadır. Böylece, herhangi bir makasın fazla kullanım nedeniyle belirlenen süreden önce arızalanma ihtimalini düşürerek ek bakım ihtiyacı oluşmasının önüne geçilmesi planlanmaktadır. Eş-yaşlandırma algoritmasında güzergâh üzerinde bulunan bütün makasların yaşı hesaba katılarak bir ceza puanı belirlenmektedir. Güzergâh üzerindeki makasların yaşı ne kadar büyükse, yani makas ne kadar çok kullanılmış ise, aldığı ceza puanı artacaktır. Böylelikle daha düşük yaştaki makaslara konum değiştirme fırsatı verilerek makaslar eşit bir şekilde kullanılmış olacaktır. Makas yaşı ilgili makasın o gün içerisinde kaç kere konum değiştirdiğini ifade etmektedir.

Bu çalışmada önerilen üçüncü algoritma ise yukarıda tanımlanan iki algoritmanın ceza puanlarının beraber kullanıldığı, hem enerji tasarrufu hem de makas eş-yaşlandırma kriterinin göz önünde bulundurulduğu bir çözümdür.

Eğer güzergâh üzerinde arızalı bir ekipman var ise, yukarıda belirtilen üç algoritma çalıştırılırken ilk olarak üzerinde arızalı ekipman olan güzergâhlar aday güzergâh listesinden çıkarılmakta ve geriye kalan aday güzergâhlar üzerinden seçilen kritere (eş-yaşlandırma, enerji tasarrufu veya her ikisi) göre farklı algoritmalar çalıştırılarak hesaplamalar yapılmaktadır.

2.1. Arızalı ekipman kontrol algoritması

Arızalı ekipman kontrol algoritması aday güzergâhların içinde ray bloğu, sinyal ve makas arızası olanları tespit edip aday güzergâh listesinden çıkarmaktadır. Arızalar giderildiğinde tekrar güzergâh talebi yapıldığında bu güzergâhlar tekrar aday listesine girebilmektedir. Arızalı ekipman kontrol algoritması Şekil 1’de verilmiştir.

2.2. Enerji tasarrufu algoritması

Enerji tasarrufu kriterine göre en az makas çevrim sayısına sahip güzergâh bulunarak maliyetin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Algoritma, treni

hedeye götürecektir aday güzergâhların makas değişim sayısını göz önünde bulundurarak güzergâhlara ceza puanı vermektedir. En az ceza puanını alan aday güzergâh tavsiye listesinde en üst sıraya yükselmektedir.

Makas değişim sayısı hesaplanırken makas çevrim algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma, enerji tasarruf algoritmasının bir parçasıdır ve aday güzergâhın tanzimi için gerekli makas konumları ile sahadan alınan güncel makas konumları karşılaştırılmaktadır. Aynı isme sahip makasların konumları farklı ise makasın konumun değişmesi gerektiği anlaşılakta ve ilgili aday güzergâhın makas çevrim sayısı bir artırılmaktadır.

```

1:Start
2:Class Point
3: bool isFault
4:Class Track
5: bool isFault
6:Class Signal
7: bool isFault
8:Class Route
9: List<Point> points
10: List<Track> tracks
11: List<Signal> signals
12:end Class
13:Function CheckFault(List<Route>Allroutes)
14:CandidateRoutes = null
15: if (Allroutes != null)
16: for each (route in Allroutes)
17: for each (points in route)
18: if points.isFault
19: break
20: end if
21: end for
22: for each (tracks in route)
23: if tracks.isFault
24: break
25: end if
26: end for
27: for each (signals in route)
28: if signals.isFault
29: break
30: end if
31: end for
32: if there is no fault in route
33: CandidateRoutes[+]<-route
34: end if
35: end for
36:end if
37:end function
38:end

```

Şekil 1. Arızalı ekipman kontrol algoritması

Şekil 2’de örnek olarak oluşturulmuş, sekiz adet güzergâh içeren bir demiryolu sahası verilmiştir. Bu güzergâhların üzerinde bulunan makaslar ve bu güzergâhların tanzimi için makasların konumlarının nasıl olması gerektiği bilgisi de Tablo 1’de gösterilmektedir. Güzergâh 1’in tanzimi için değişmesi gereken makaslar, güzergâh 1 satırıyla en alt satırdaki saha güncel makas konumlarının karşılaştırılmasıyla elde edilmektedir. Güzergâh 1 örneğinde 9, 12, 23 makaslarının konumlarının değişmesi gerektiği ve güzergâh 1 aday güzergâhının toplam makas çevrim sayısı üç olarak hesaplanacağı açıkça görülmektedir. Tablo 1’deki “-” işareti o makasın aday güzergâh tarafından kullanılmadığını, “N” makasın normal konumunu ve “R” makasın sapan konumunu temsil etmektedir. Tablo 1’in en alt

satırında ise makasların sahadaki o andaki durumunu ifade etmektedir.

Makas çevrim algoritmasına göre en düşük makas çevrim sayısı ceza limiti olarak belirlenmekte ve bu limiti aşan aday güzergâhlar ceza almaktadır. Bir güzergâhın aldığı ceza puanı makas çevrim sayısı ile ceza limitinin farkına eşittir.

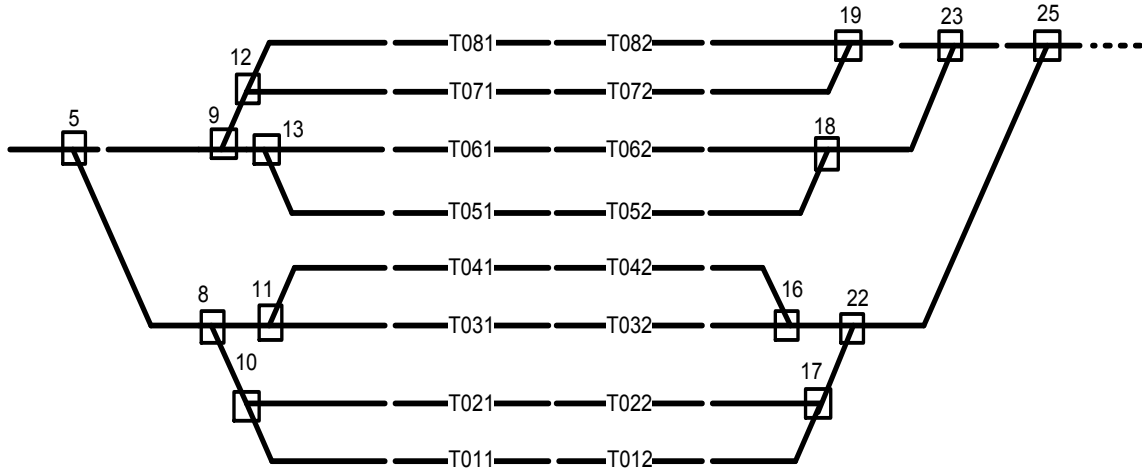
$$E_i = Z_i - L \quad (1)$$

Burada, L : En düşük makas çevrim sayısı, Z_i : i . aday güzergâhın tanzimi için gerekli olan makas çevrim sayısı ve E_i : i . aday güzergâhın enerji tasarruf ceza puanını ifade etmektedir.

Tablo 1'de güzergâh 3 için herhangi bir makasın konum değiştirmesine gerek olmadığı için makas

çevrim sayısı sıfırdır ve en düşük çevrim sayısına sahiptir. Çünkü Tablo 1'in son satırındaki saha güncel makas konumlarıyla birebir eşleşmektedir. Makas çevrim algoritması ceza limitini sıfır olarak belirleyecek ve diğer aday güzergâhların makas çevrim sayılarını sıfırdan çıkarıp bu güzergâhların ceza puanını belirleyecektir. Güzergâh 1 örneğinde üç makasın değişmesi gerektiği için enerji tasarruf algoritmasının güzergâh 1'e vereceği ceza puanı üç olacaktır. Bu şekilde her aday güzergâha ceza puanı verilip puanı düşük olandan yüksek olana doğru bir sıralama yapılmaktadır. Tablo 1'de verilen güzergâhlar için sıralama Tablo 2'de verilmiştir. Enerji tasarrufu algoritması Şekil 3'de verilmiştir.

Tablo 1'de verilen güzergâhlar için sıralama Tablo 2'de verilmiştir. Enerji tasarrufu algoritması Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Örnek demiryolu sahası

Tablo 1. Örnek güzergâh makas ve saha makas konumları (N-makasın normal konumu, R-makasın sapan konumu)

Güzergâh/Makas	5	8	9	10	11	12	13	16	17	18	19	22	23	25
Güzergâh 1	N	-	R	-	-	N	-	-	-	-	N	-	N	N
Güzergâh 2	N	-	R	-	-	R	-	-	-	-	N	-	N	N
Güzergâh 3	N	-	N	-	-	-	N	-	-	N	-	-	R	N
Güzergâh 4	N	-	N	-	-	-	R	-	-	R	-	-	R	N
Güzergâh 5	R	N	-	-	R	-	-	R	-	-	-	N	-	R
Güzergâh 6	R	N	-	-	N	-	-	N	-	-	-	N	-	R
Güzergâh 7	R	R	-	R	-	-	-	-	R	-	-	R	-	R
Güzergâh 8	R	R	-	N	-	-	-	-	N	-	-	R	-	R
Saha	N	N	N	R	N	R	N	R	R	N	N	N	R	N

Tablo 2. Enerji tasarruf kriterine göre aday güzergâh tavsiye listesi (N-makasın normal konumu, R-makasın sapan konumu)

Güzergâh Sıralaması	Ceza Puanı (E_i)	Değişmesi Gereken Makaslar
Güzergâh 3	0	-
Güzergâh 4	2	13, 18
Güzergâh 1	3	9, 13, 23
Güzergâh 2	3	9, 19, 23
Güzergâh 5	3	5, 11, 25
Güzergâh 6	3	5, 16, 25
Güzergâh 7	4	5, 8, 22, 25
Güzergâh 8	6	5, 8, 10, 17, 22, 25
Saha	N	N

```

1: Start
2: Class Point
3: string name
4: string position
5: end Class
6: Class Route
7: Point[ ] Points
8: int pointCycleCount
9: end Class
10: Function
CalculatePointCycleCount(List<Route>CandidateRoutes)
11: List<Route> CandidateRoutes
12: List<Point> Allpoints
13: int pointCycleCount ← 0
14: if ( CandidateRoutes != null )
15: for each ( route in CandidateRoutes )
16:   for each ( point1 in route.Points )
17:     for each ( point2 in Allpoints )
18:       if ( point1.Name equal point2.name )
19:         if ( point1.position !=
point2.position )
20:           pointCycleCount++;
21:         end if
22:       end if
23:     end for
24:   route.pointCycleCount ← pointCycleCount
25: end for
26: pointCycleCount ← 0
27: end for
28: end if
29: end

```

Şekil 3. Enerji tasarrufu ceza puanı algoritması

2.3. Makas eş-yaşlandırma algoritması

Makas eş-yaşlandırma kriterine göre makasların çevrim sayıları (makas yaşı) birbirine yaklaştırılarak, makas ömürlerinin uzatılması ve planlanan periyodik bakımdan daha erken bakıma giren makasların sayısının azaltılarak bakım maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Makas eş-yaşlandırma algoritması sahada bulunan bütün makaslara yaşlarına göre ceza katsayısı atamaktadır. Bir makasın ceza katsayısı, ilgili makasın çevrim sayısının talep geldiği anda sahadaki bütün makasların çevrim sayılarının ortalamasına bölünerek elde edilmektedir. Çevrim sayısı büyük olan makasın ceza katsayısı da büyük olmaktadır.

$$C_i = \frac{Y_i}{A} \quad (2)$$

Burada, C_i : ilgili makasın ceza katsayısını, Y_i : ilgili makasın çevrim sayısını ve A : sahada bulunan tüm makasların talep geldiği anda hesaplanan yaş ortalamasını ifade etmektedir. Tablo 1'de verilen bütün makasların yaşları ve (2) denklemine göre hesaplanan makas ceza katsayıları Tablo 3'de gösterilmektedir.

Makas eş-yaşlandırma kriterine en uygun güzergâh tavsiye edilirken aday güzergâhların üzerindeki makasların ceza katsayıları toplanarak her güzergâha bir ceza puanı verilmektedir. Ceza puanları düşükten yükseğe doğru sıralanarak bir tavsiye listesi oluşturulmakta ve en düşük ceza puanına sahip aday güzergâh ilk sırada yer almaktadır. İlgili güzergâh tanzim edildiğinde konum değiştiren makasların yaşı bir arttırılmaktadır.

$$T_i = \sum_{i=1}^{r_i} \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij} \quad (3)$$

Burada, r_i : toplam güzergâh sayısını, n_i : i . aday güzergâhın üzerinde bulunan makas sayısını, T_i : i . aday güzergâhın ceza puanını ve C_{ij} : i . aday güzergâhın j . makasının ceza katsayısını göstermektedir.

Tablo 1 ve Tablo 3'den alınan veriler ele alınarak aday güzergâh ceza puanları (3) denklemine göre hesaplanıp sıralama yapıldığında Tablo 4 elde edilmektedir. En düşük ceza puanını alan aday güzergâh tavsiye listesinde en üst sıraya çıkmaktadır. Bu örnekte makas eş-yaşlandırma kriterine göre en uygun aday güzergâh 1 veya güzergâh 2 olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Makas yaşları ve ceza katsayıları

Makaslar	Makas Çevrim Sayısı (Y_i)	Ceza Katsayıları (C_i)
PM5	27	0,779
PM8	43	1,241
PM9	32	0,924
PM10	55	1,587
PM11	76	2,194
PM12	21	0,606
PM13	54	1,559
PM16	21	0,606
PM17	33	0,952
PM18	43	1,241
PM19	14	0,404
PM22	24	0,693
PM23	23	0,664
PM25	30	0,866
Ort. (A)	34,647	

Tablo 4. Aday güzergâh ceza puanları

Güzergâhlar	Ceza Puanları
Güzergâh 1	4,243
Güzergâh 2	4,243
Güzergâh 3	6,032
Güzergâh 4	6,032
Güzergâh 7	6,119
Güzergâh 8	6,119
Güzergâh 5	6,379
Güzergâh 6	6,379

Tablo 4'te güzergâh 1 ve güzergâh 2 aday güzergâhları ve sıralı şekilde devam eden aday güzergâhların aynı ceza puanlarını almaları bu güzergâhların üzerinde aynı makasların bulunmasından kaynaklanmaktadır (Bkz. Tablo 1). Dispeçer tarafından güzergâh 1 seçilmesi durumunda güzergâhın üzerindeki konumu değişen makasların yaşları bir arttırılmaktadır. Tablo 5'te güzergâh 1 tanzim edilirken sahada konum değiştirmesi gereken makaslar koyu renkle gösterilmektedir.

Tablo 5. Güzergâh 1'in tanzimi için sahada konum değiştirmesi gereken makaslar

Güzergâh/Makas	5	8	9	10	11	12	13	16	17	18	19	22	23	25
Güzergâh 1	N	-	R	-	-	N	-	-	-	-	N	-	N	N
Saha	N	N	N	R	N	R	N	R	R	N	N	N	R	N

Tablo 6. Güncellenmiş makas yaşları ve ceza katsayıları

Makaslar	Makas Yaşları (Y_i)	Güncel Ceza Katsayıları (C_i)	Önceki Ceza Katsayıları (C_i)
PM5	27	0,775	0,779
PM8	43	1,235	1,241
PM9	33	0,948(+)	0,924
PM10	55	1,579	1,587
PM11	76	2,182	2,194
PM12	22	0,632(+)	0,606
PM13	54	1,551	1,559
PM16	21	0,603	0,606
PM17	33	0,948	0,952
PM18	43	1,235	1,241
PM19	14	0,402	0,404
PM22	24	0,689	0,693
PM23	24	0,689(+)	0,664
PM25	30	0,861	0,866
Ort. (A)	34,824(+)		

Güzergâh 1 tanzim edildiğinde sahada konumu değişen makasların yaşlarının (Y_i) ve sahadaki tüm makasların ortalama yaşının (A) arttığı görülmektedir. Yaşı artan makasların (2) denkleminde göre ceza katsayıları da artmaktadır. Bununla birlikte, güzergâh 1 tanziminde konum değiştirmeyen makasların ceza katsayıları (C_i) makas yaş ortalaması arttığı için azalmaktadır. Sonuç olarak, ceza katsayıları azalan makaslara sahip olan aday güzergâhlar sıralamada üst sıraya yükselmektedir. Güzergâh 1 tanzim edildikten sonra güncellenen makas yaşları Tablo 6'da verilmiştir.

Güzergâh 1 tanzim edilip sonlandırıldıktan sonra dispeçer'in yeni bir güzergâh açma talebinde bulunması halinde aday güzergâh ceza puanlarının değişimi ise Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Makas yaşları ve ceza katsayıları

Güzergâhlar	Güncel Ceza Puanları (T_i)	Önceki Ceza Puanları (T_i)
Güzergâh 1	4,307	4,243
Güzergâh 2	4,307	4,243
Güzergâh 3	6,059	6,032
Güzergâh 4	6,059	6,032
Güzergâh 7	6,088	6,119
Güzergâh 8	6,088	6,119
Güzergâh 5	6,346	6,379
Güzergâh 6	6,346	6,379

Burada güzergâh 1 ve güzergâh 2'nin ceza puanının artması normal bir durumken güzergâh 3 ve güzergâh 4'ün 0,057'lik bir ceza puanı artışı beklenmeyen bir durum olarak düşünülebilir. Bu durum güzergâh 1, güzergâh 2, güzergâh 3 ve güzergâh 4'ün üzerinde ortak makasların olmasından ve bu makasların konum değiştirmesinden kaynaklanmaktadır (Bkz. Tablo 1). Güzergâh 1 veya

güzergâh 2'deki makas konum değişimi, güzergâh 3 ve güzergâh 4 üzerindeki ortak makasların ceza katsayılarını (C_i) ve dolayısıyla aday güzergâh ceza puanlarını (T_i) da etkilemektedir. Güzergâhların sahip oldukları ortak makas sayıları arttıkça tanzim edilmeyen komşu güzergâhların da ceza puanı artmaktadır. Ancak bu durum eş-yaşlandırma algoritmasının hatalı sonuç üretmesi gibi bir duruma sebep olmamaktadır. Makas eş-yaşlandırma algoritması Şekil 4'te verilmiştir.

2.4. Ağırlıklı ceza algoritması

Ağırlıklı ceza algoritması, enerji tasarrufu ve makas eş-yaşlandırma algoritmalarının aday güzergâhlara verdikleri ceza puanlarının belirli katsayılar ile çarpılmasıyla elde edilen ceza puanına göre güzergâh tavsiyesinde bulunmaktadır. Böylece, hem enerji tasarrufu yapılması hem de makasların eş-yaşlandırılmasına olanak sağlanmaktadır.

$$P_i = [(-1)^{f_i}][\alpha T_i + (1 - \alpha)E_i] \quad (4)$$

Burada, P_i : i . güzergâhın ağırlıklı ceza puanını, f_i : i . güzergâhın arıza kontrol değişkenini, T_i : i . güzergâhın eş-yaşlandırma ceza puanını, E_i : i . güzergâhın enerji tasarrufu ceza puanını ve α : ağırlıklı ceza algoritması katsayısını ifade etmektedir. f_i kontrol değişkeni arızalı ekipman kontrol algoritmasının (Şekil 1) çalışması sonucu dönen değere göre "1" ya da "2" değerini almaktadır. Herhangi bir aday güzergâhın sahadaki ekipmanlarından bir veya daha fazlasında arıza olması durumunda f_i değişkeni "1" değerini alarak ilgili aday güzergâhın ağırlıklı ceza puanının (P_i) negatif bir reel sayıya eşit olmasını sağlamaktadır. Böylece, geliştirilen yazılım ilgili güzergâhın dispeçere tavsiye edilmesinin uygun olmadığına karar vererek ilgili güzergâhı tavsiye

listesinden çıkarmaktadır. Güzergâhta herhangi bir arıza olmaması durumunda ise f_i değişkeni 2 değerini alarak P_i değerinde herhangi bir değişikliğe neden olmamaktadır.

α katsayısı ilgili güzergâhın eş-yaşlandırma ceza puanı ile çarpılarak yeni bir ceza puanı elde edilmektedir. Bu katsayı, kullanıcının seçimine göre 0.15, 0.85 ve 0.5 değerlerini alabilmektedir. Ağırlıklı ceza algoritması Şekil 5'te verilmiştir.

```

1:Start
2:Class Point
3: int PointAge
4: double coefficientOfPoint
5:end Class
6:Class Route
7: double Co_AgingPenaltyScore
8: List<Point> Points
9:end Class
10:Function CalcAverageofPointAges (List<Point>
Points)
11: double sumOfPointAge ← 0
12: for each ( point in Points )
13: sumOfPointAge +← point. PointAge
14: end for
15: return sumOfPointAge / Points.Count
16: end function
17:Function CalcCoefficientofPoint( List<Point>
Points )
18: double Average =
CalcAverageofPointAges (AllPoints)
19: for each( point in Points )
20: point.coefficientOfPoint=point.PointAge /
Average;
21: end for
21: end function
23:Function CalcPenaltyScoreCo_AgingMode
(List<Route> CandidateRoutes)
24: for each(candRoute in CandidateRoutes)
25: candRoute.Co_AgingPenaltyScore ← 0
26: for each(point in candRoute.Points)
27: candRoute.Co_AgingPenaltyScore +←
point.coefficientOfPoint
28: end for
29: end for
30: end function
31: end

```

Şekil 4. Makas eş-yaşlandırma algoritması

```

1:Start
2:Class Route
3: int f
3: double TtlPenaltyScore
4: double Co_AgingPenaltyScore
5: double EcoPenaltyScore
6:end Class
7:Function CalcTotalPenaltyScore
(List<Route> CandidateRoutes, double a)
8: for each (route in CandidateRoutes)
9: route.TtlPenaltyScore ← 0
10: route.TtlPenaltyScore ← route.f
(a*route.Co_AgingPenaltyScore
+(1 -
a)*route.EcoPenaltyScore)
11: end for
12: end function
13: end

```

Şekil 5. Ağırlıklı ceza algoritması

3. Örnek Çalışma

3.1. Esenler depo sahası

Metro İstanbul AŞ. M1 Hattı yolcu taşımacılığında kullanılan metro araçları ve hat bakım araçları

Esenler yerleşkesindeki depo sahasına park edilmektedir. Aynı zamanda yerleşke de bulunan atölyede araç bakımları yapılırken, yıkama yolunda da araç temizlikleri yapılmaktadır. Depo sahası 105 ABB aracının parkı için kullanılmaktadır (Şekil 6). Araçlar sahaya 2 ayrı giriş noktasından (nizamiyeden ve yıkama bölgesi) giriş yapabilmektedir. Bu girişler, 29 adet makas ile genişlemekte ve toplamda 14 yol üzerine araçlar park etmektedir.

3.2. Trafik kumanda merkezi yazılımı

Trafik kumanda merkezi yazılımı C# programlama dili kullanılarak.NET ortamında geliştirilmiştir. Dispeçerin güzergâh, makas, sinyal ve ray ekipmanları ile ilgili taleplerini bilgisayar üzerinden değerlendirerek dispeçere bilgi verebilmekte ya da taleplerini yerine getirebilmektedir. Bölüm 2'de tanımlanan algoritmalar, geliştirilen yazılım ile test edilebilmektedir. Geliştirilen yazılıma ait kullanıcı ara yüzü Şekil 7'de verilmiştir. Saha ekipmanları siyah ekran üzerinde çeşitli çizimler ile temsil edilmektedir. Beyaz renk çizgiler ray bloklarını, kare şeklindeki kutular makasları, kutuların içindeki "R" veya "N" sembolleri makasların konumlarını, küçük dikdörtgenler içindeki renkli daireler sinyalleri temsil etmektedir. Ayrıca her ekipmanın altında, üstünde veya yanında ismini belirten etiketler bulunmaktadır. Bu ekipman çizimlerinin üstlerine farenin sol veya sağ tuş ile tıklanınca çeşitli talepler yapılabilmektedir.

3.2.1. Güzergâh talebi yapma ve tavsiye listesi

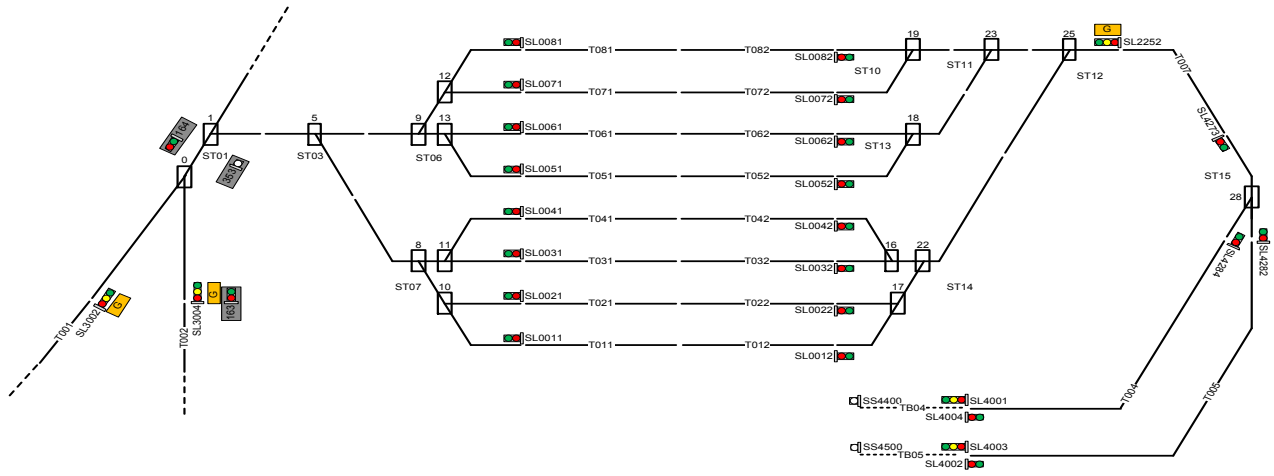
Geliştirilen trafik kontrol merkezi yazılımı ara yüzü üzerinden dispeçer talep yapmak istediği güzergâhın sırasıyla başlangıç sinyali ve varış sinyaline tıkladığında Bölüm 2'de tanımlanan algoritmalar çalıştırılmakta ve treni hedefe ulaştıracak güzergâhlar aday güzergâh olarak ekranın sağ üst köşesinde listelenmektedir.

Aday güzergâh tavsiye listesindeki en uygun ilk üç güzergâh en iyiden başlayarak mavi, sarı ve turuncu renkler ile Şekil 8'deki gibi gösterilmektedir. Bu renkler aynı amaçla ray blokları ve makaslar üzerinde de kullanılmaktadır. Örneğin SL3004 - SL4003 sinyalleri seçilmesi durumunda oluşan tavsiye listesinde makasın sarı renk yanıp sönmesi tavsiye listesindeki en uygun ikinci güzergâh için o makasın konum değiştirmesi gerektiğini belirtmektedir. Makas üzerinde mavi ve sarı renk, mavi ve kırmızı renk veya kırmızı ve sarı renklerin beraber yanıp sönmesi o makasın aday güzergâhlarını ikisi için de aynı konuma gelmesi gerektiğini belirtmektedir (Şekil 9).

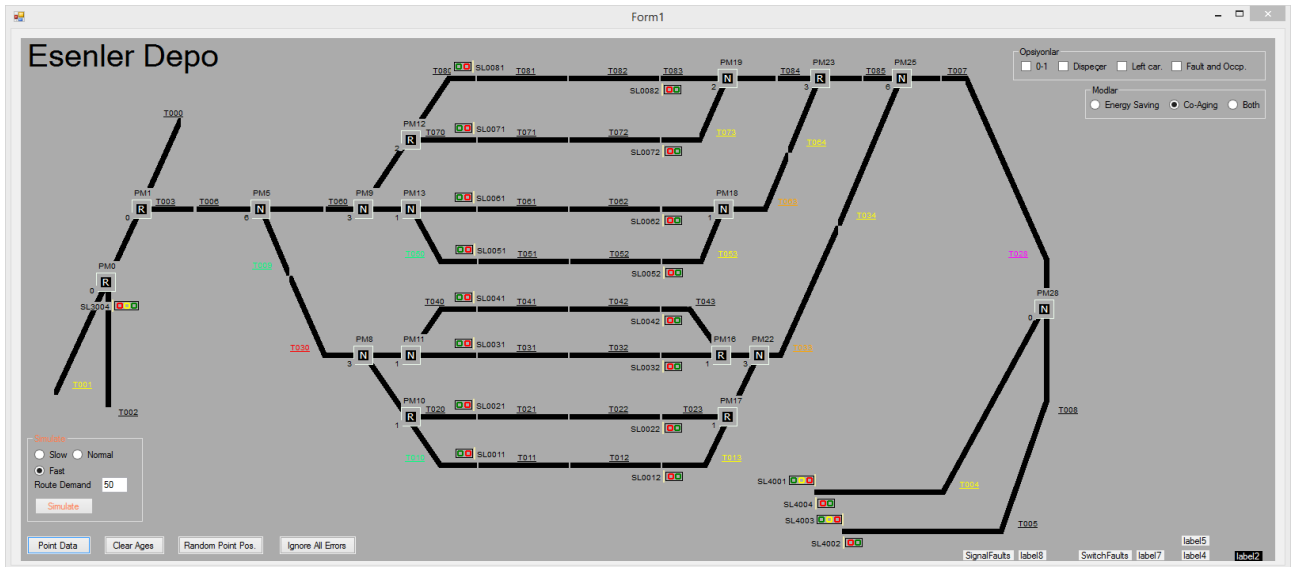
Kumanda merkezi arayüzünde sağ üst köşede bulunan aday güzergâh tavsiye listesinde beş adet sütun bulunmaktadır. Birinci sütun güzergâh isimlerini, ikinci sütun eş-yaşlandırma ceza puanını, üçüncü sütun enerji tasarrufu ceza puanını dördüncü sütun ağırlıklı ceza puanını ve beşinci sütun makas çevrim sayısını göstermektedir. Dispeçer aday

güzergâh tavsiye listesinden herhangi bir aday güzergâha çift tıklayarak güzergâh talebini onaylayabilmektedir. Güzergâh tanzim edildikten sonra yeşil renk ile gösterilmekte ve tavsiye

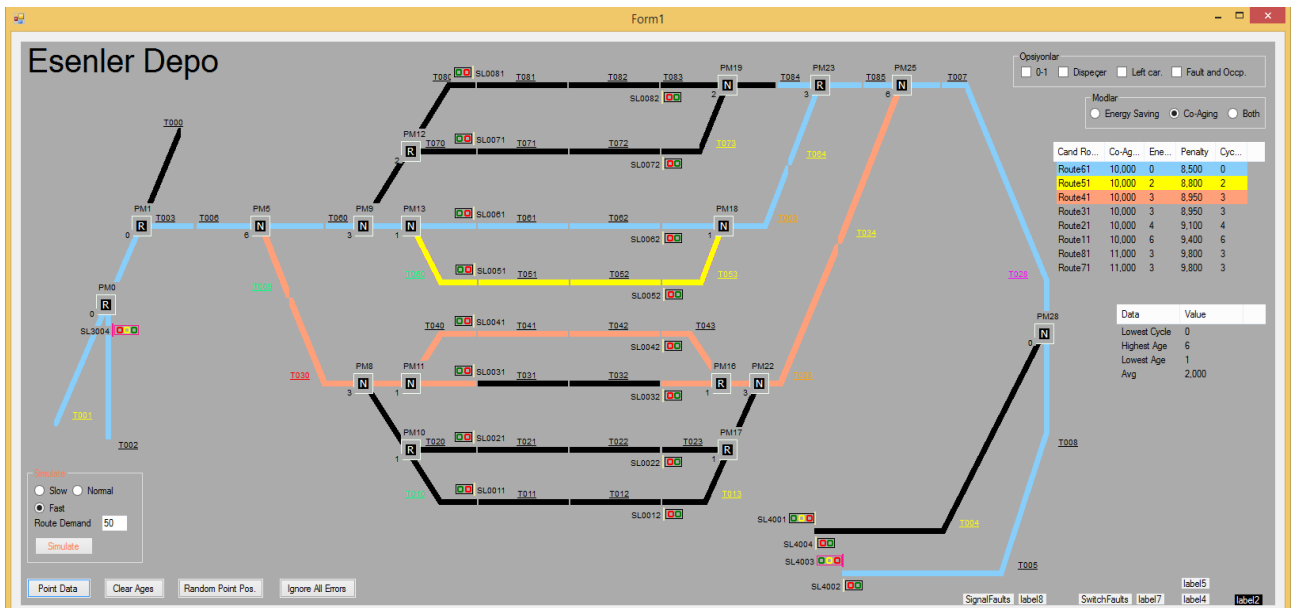
edilmekte olan diğer güzergâhlar tekrar beyaz renklerine geri dönmektedir. Güzergâh tavsiye listesi ve güzergâh seçimi sonrası kumanda merkezi arayüzü sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir.



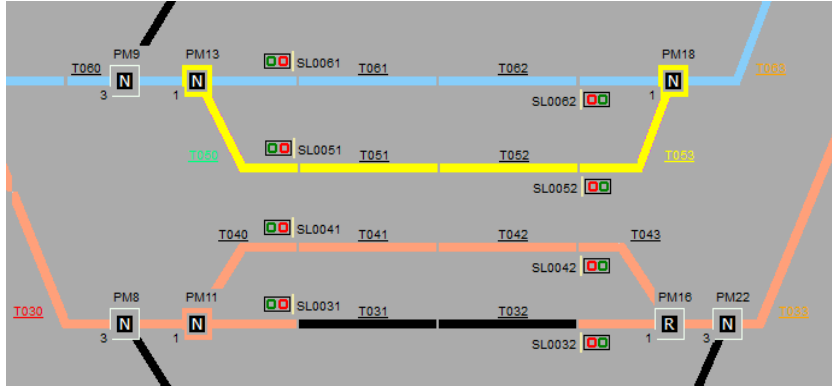
Şekil 6. Esener depo sahasının bir bölümünün şematik gösterimi



Şekil 7. Trafik kumanda merkezi dispeçer arayüzü



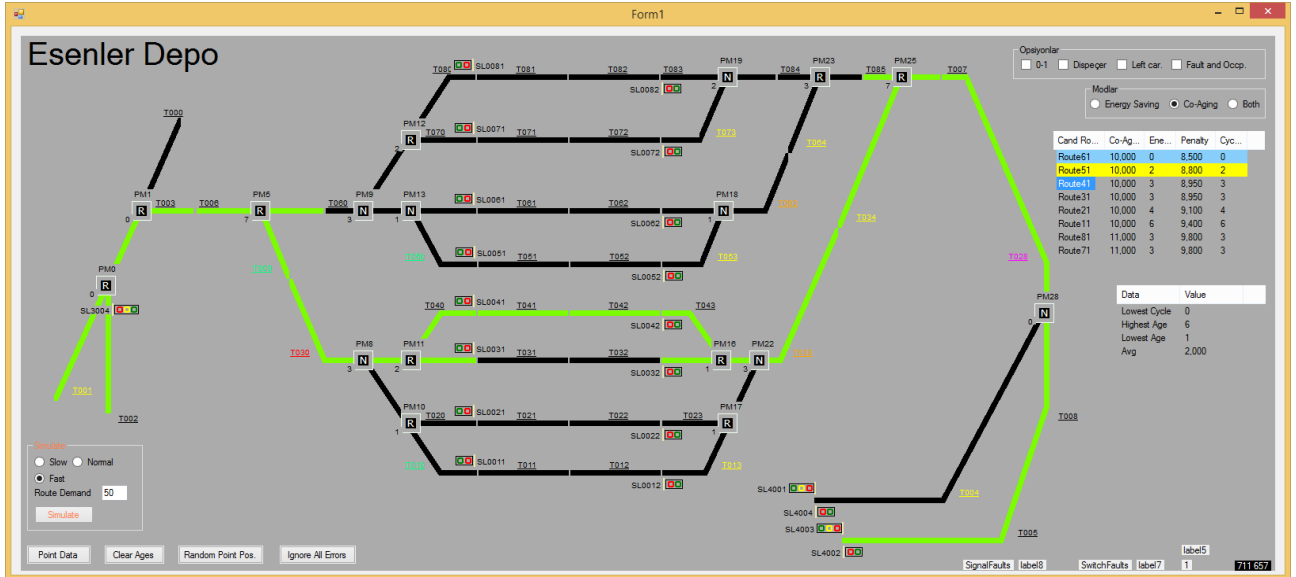
Şekil 8. Güzergâh talebi sonrası tavsiye listesi



Şekil 9. Konum değiştirmesi gereken makaslar

Cand Ro...	Co-Ag...	Ene...	Penalty	Cyc...
Route61	10,108	0	8,592	0
Route51	10,108	2	8,892	2
Route21	10,108	4	9,192	4
Route41	10,568	3	9,432	3
Route31	10,568	3	9,432	3
Route11	10,108	6	9,492	6
Route81	11,027	3	9,823	3
Route71	11,027	3	9,823	3

Şekil 10. Güzergâh tavsiye listesi



Şekil 11. Tanzim edilmiş güzergâh

3.3. Benzetim çalışmaları

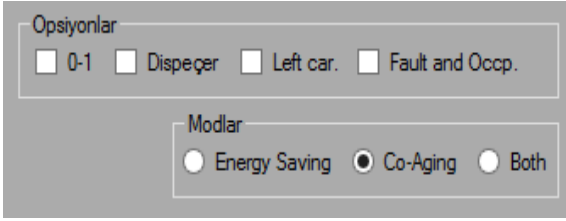
Bu çalışmada önerilen yöntemlerin doğruluğunu gösterebilmek amacıyla, Bölüm 2'de tanımlanmış olan algoritmaların koşturulabileceği bir platform oluşturulmuştur. Benzetim sonuçlarını gerçek saha işletmesine yakınlaştırabilmek amacıyla da dört ayrı seçenek eklenmiştir. Koşturulmak istenilen algoritma Şekil 12'de gösterildiği gibi ilgili kutucuk işaretlenerek seçilebilmektedir. Güzergâh talebi yapmadan önce bu mod bölümünden istenilen algoritma seçilerek tavsiye listesi oluşturulmaktadır. "Both" isimli onay kutusu enerji tasarruf ve eş-yaşlandırma algoritmalarının bir arada kullanıldığı ağırlıklı ceza algoritmasını ifade etmektedir.

Şekil 12'de verilen seçenekler panelinde "0-1" isimli onay kutusu işaretlendiğinde Bölüm 2'de

tanımlanmış olan ağırlıklı ceza puanı hesaplama algoritmasının çalışması engellenmektedir. "Dispeçer" isimli onay kutusu, benzetim esnasında yazılımın sanal bir dispeçer gibi tavsiye listesinden rastgele seçim yapılmasını sağlamaktadır. Esenler depo sahasına gelen arızalı araçlar veya bakım sonrası hatta gönderilecek araçlar T011 – T082 rayları üzerinde bırakılarak yeni gelen trene eklenmektedir.

Benzetim çalışmalarında bu durumu gerçekleştirebilmek amacıyla "Left car." isimli onay kutusu eklenmiştir. Böylece, trenin tanzim edilen güzergâhı tamamlarken belirli ray blokları üzerine araç bırakması sağlanmıştır. "Fault and Occp." isimli onay kutusu ise saha ekipmanlarında rastgele arızalar ve meşguliyetler meydana getirerek kumanda merkezi yazılımının ve algoritmaların bu

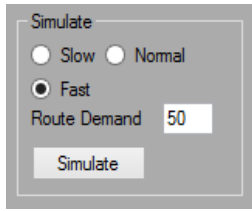
arıza ve durumlarında verdiği tepkiler ve sonuçlar analiz edilmektedir.



Şekil 12. Algoritma seçimi ve benzetim seçenekleri

Şekil 7’de verilen dispeçer arayüzünde sol alt kısımda benzetim sırasında kaç tane ardışık güzergâh talebinin yapılacağını ve benzetim hızını belirleyen onay kutuları bulunmaktadır. Şekil 12’de belirtilen seçenekler ve algoritmalar belirlendikten sonra Şekil 13’de gösterilen değerler belirlenerek “Simulate” butonuna basılmasıyla benzetim gerçekleştirilmektedir. Benzetim esnasında sonuçlar çevrimiçi olarak ayrı bir pencerede grafiksel olarak gösterilmektedir.

Benzetim işleminde öncelikle makas çevrim sayıları sıfırlanmaktadır. Sonrasında belirlenen seçenekler doğrultusunda Bölüm 2’de tanımlanmış olan üç algoritma sırasıyla koşturulmakta ve sonuçlar grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 13. Benzetim bölümü

3.4. Benzetim sonuçları: Arızasız durum

Bu bölümde Esenler depo sahası için Bölüm 2’de tanımlanan algoritmalar farklı seçenekler belirlenerek koşturulmuş ve sonuçları verilmiştir.

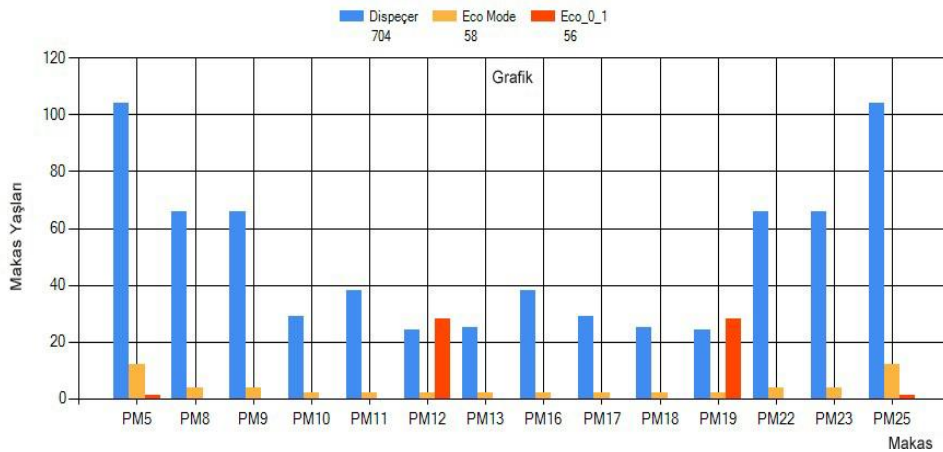
Benzetim çalışmasında güzergâh seçimi SL3004 - SL4003 sinyalleri seçilerek gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Enerji tasarrufu algoritması sonuçları

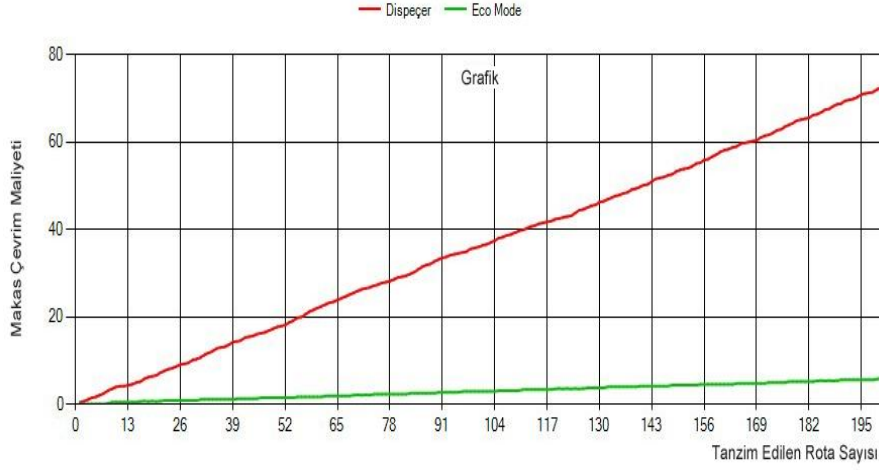
200 güzergâh talebi için enerji tasarruf algoritmasının koşturulmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 14 ve Şekil 15’de gösterilmiştir. Şekil 14’de verilen grafikte mavi renkli sütun dispeçerin rastgele yaptığı seçimler sonucunda meydana gelen makas çevrimlerini, sarı renkli sütun ağırlıklı ceza algoritmasının enerji tasarruf ağırlıklı hesaplaması ($\alpha = 15$), kırmızı renkli sütun da enerji tasarruf algoritmasının ağırlıksız olarak hesaplanması ($\alpha = 0$) sonucu elde edilen makas çevrim sayılarıdır. Etiketlerin altındaki sayılar ilgili algoritma seçiminde yapılan toplam makas çevrim sayısını göstermektedir.

Şekil 14’den görüldüğü üzere 200 talep sonucu dispeçerin yapacağı rastgele güzergâh seçimi sebebiyle toplamda 704 makas hareketi gerçekleşmiş, buna bağlı olarak ihtiyaç duyulan enerji miktarı artmıştır. Rastgele seçim nedeniyle makas yaşları da düzensiz bir artış göstermiştir. Enerji tasarruf algoritması doğrultusunda seçilen güzergâhlar sayesinde toplam makas çevrim sayısı 56’ya düşmüştür. Kırmızı renkli sütunun ($\alpha = 0$) sadece 12 ve 19 numaralı makasları kullanmasının sebebi algoritmanın ilk koşturma sonrasında uygun güzergâhı seçmesi ve daha sonra hiç makas hareketi olmayacağından sürekli olarak aynı güzergâhı tanzim etmesinden kaynaklanmaktadır. İlerleyen bölümlerde benzetimlere arıza enjekte edilerek bu durumun ortadan kalkması sağlanmıştır.

Şekil 15’de ise dispeçer ve enerji tasarruf modlarının yapılan 200 talep için makas değiştirme maliyetini Euro cinsinden ifade etmektedir (1 makas çevrimi 0.40 TL olarak hesaplanmıştır). Önerilen algoritmanın kullanımı sonucunda rastgele dispeçer seçimine göre 72 €’luk bir kazanç sağlanmıştır.



Şekil 14. Enerji tasarruf algoritmasına göre makas çevrim sayıları



Şekil 15. Enerji tasarruf algoritması maliyet (€) karşılaştırması

3.4.2. Eş-yaşlandırma algoritması sonuçları

200 güzergâh talebi için enerji tasarruf algoritmasının koşturulmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 16'da gösterilmiştir. Şekil 16'da verilen grafikte mavi renkli sütun dispeçerin rastgele yaptığı seçimler sonucunda ortaya çıkan makas yaşını, kırmızı renkli sütun ağırlıksız eş-yaşlandırma algoritması ($\alpha = 1$) sonuçlarını, sarı renkli sütun ise ağırlıklı eş-yaşlandırma algoritmasının ($\alpha = 0,85$) ortaya çıkardığı makas yaşlarını göstermektedir.

Rastgele dispeçer seçimlerinin makas yaşlarındaki düzensiz dağılımındaki etkisi açıkça görülmektedir. Ağırlıksız eş-yaşlandırma algoritmasının ($\alpha = 1$) sonuçlarını temsil eden kırmızı renkli sütunlar belirli makas gruplarının yaşlarını birbirine yakınsamış, ayrı grupların arasındaki farkın azaltılmasını sağlamıştır. Eş-yaşlandırma algoritması enerji tasarruf algoritmasının ile aynı güzergâh talep sayılarına sahip olmasına rağmen ağırlıksız eş-yaşlandırma algoritmasındaki toplam makas çevrim sayısının 356 gibi bir değere ulaşması eş-yaşlandırma algoritmasının makas yaşlarını birbirine yaklaştırmak için ekstra makas çevrimine ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. Bu durumu engellemek adına ağırlıklı ceza algoritması kullanılarak ($\alpha = 0,85$) enerji tasarruf ceza puanı da hesaba katılmıştır. Böylece ağırlıklı eş-yaşlandırma algoritmasının kullanılması sonucu sarı renk sütunlar elde edilmiş ve makasların yaşlarının daha etkin bir şekilde birbirlerine yakınsatıldıkları görülmüştür.

3.4.3. Eşit katsayılı ağırlıklı ceza algoritması sonuçları

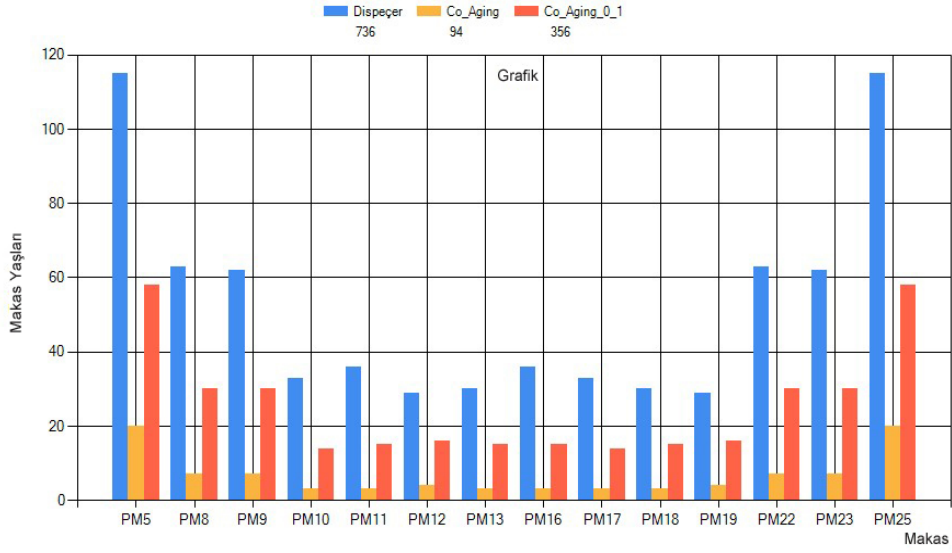
Bu bölümde, (4) denkleminde kullanılan α katsayısının değerinin 0,5 alınmasıyla elde edilen benzetim çalışmaları anlatılmaktadır. $\alpha = 0,5$ alınması ile Bölüm 3.4.1 ve Bölüm 3.4.2'de elde edilmiş olan sonuçların arasında bir değer elde edildiği görülmüştür (Bkz. Şekil 17).

3.5. Benzetim sonuçları: Arızalı durum

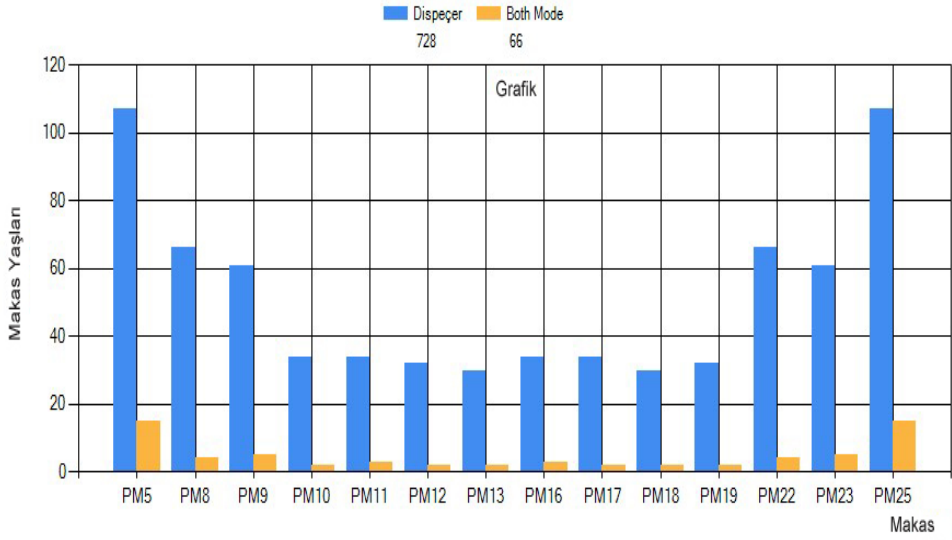
Esenler depo sahası için Bölüm 2'de tanımlanan algoritmaların koşturulması esnasında saha ekipmanlarında rastgele arızalar oluşturulmuştur. Rastgele zaman aralıklarında rastgele ekipmanlara (sinyal, makas, ray) arıza enjeksiyonu yapılmıştır. Arıza oluştuktan sonra yine belirlenen süre sonunda ekipman üzerindeki arıza kaldırılmıştır. Benzetim çalışmasında güzergâh seçimi SL3004 - SL4003 sinyalleri seçilerek gerçekleştirilmiştir.

Arızalı ekipmanlara sahip güzergâhlar, Bölüm 2'de tanımlanan arıza kontrol algoritması tarafından elenerek tavsiye listesinden çıkartılmıştır. Ancak arıza durumu ortadan kalktıktan sonra ilgili güzergâhlar tekrar tavsiye listesine eklenmişlerdir. Arızalı ekipmana sahip güzergâhlar tavsiye listesinden çıkarıldığında bu güzergâhlar üzerindeki makas yaşları sabit kalmış (Y_i), tavsiye listesindeki güzergâhlarda bulunan makas çevrim sayıları toplam makas çevrim sayısını (A) yükseltmiş ve (2) denkleminde göre hareket etmeyen makasların makas ceza katsayıları azalmıştır. Böylece bu güzergâhlar tavsiye listesine tekrar girdiklerinde (3) denkleminde göre daha az eş-yaşlandırma ceza puanı (T_i) olarak tavsiye listesinde üst sıralara yerleşmişlerdir. Benzetim sonuçları Şekil 18-20'de verilmiştir.

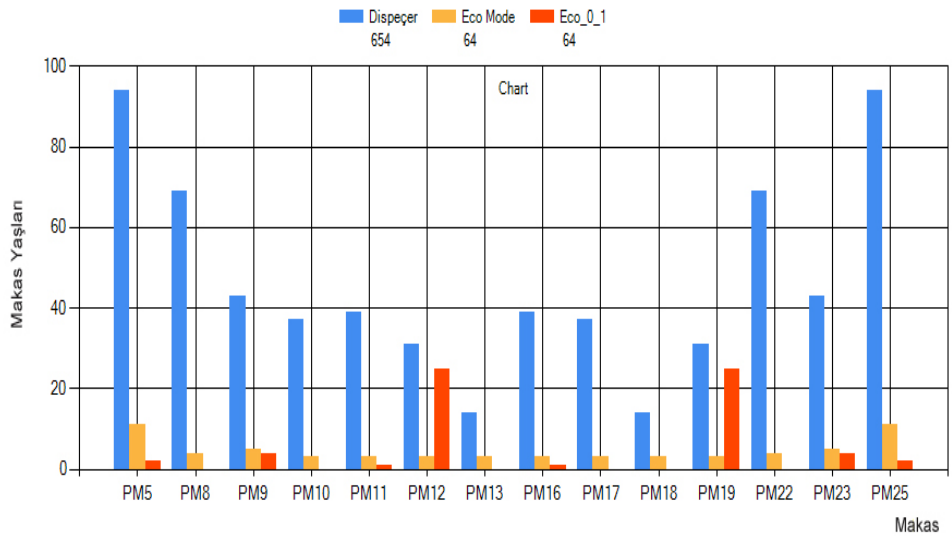
Arıza enjeksiyonu, enerji tasarruf algoritmasını ekstra makas çevrimlerine zorlamış ve enerji tüketimini artırdığı gözlenmiştir. Bunun aksine tavsiye listesinden arızalı ekipmana sahip güzergâhların çıkarılması dispeçerin rastgele seçimlerinin aralığını düşürerek aynı güzergâhları üst üste seçerek makas çevrimini azaltmasına neden olmuştur. Bunun nedeni, bir güzergâhın tanziminden sonra makaslar uygun konuma getirildiği için tanzim edilen güzergâhın enerji tasarrufu için her zaman en uygun güzergâh olmasıdır. Bu durum ise, geçici süreliğine raylara rastgele araç bırakılmasıyla sonlanmaktadır.



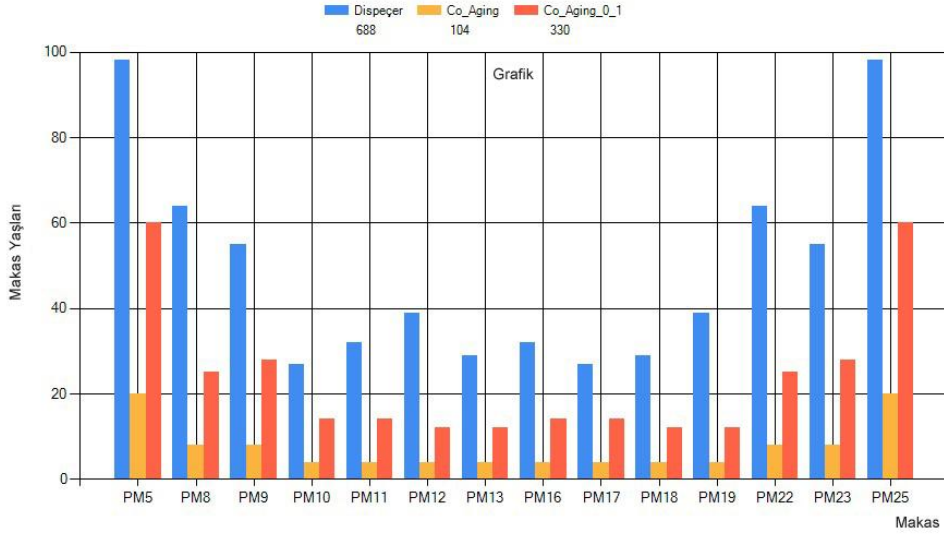
Şekil 16. Eş-yaşlandırma algoritması ve dispeçer karşılaştırma grafiği



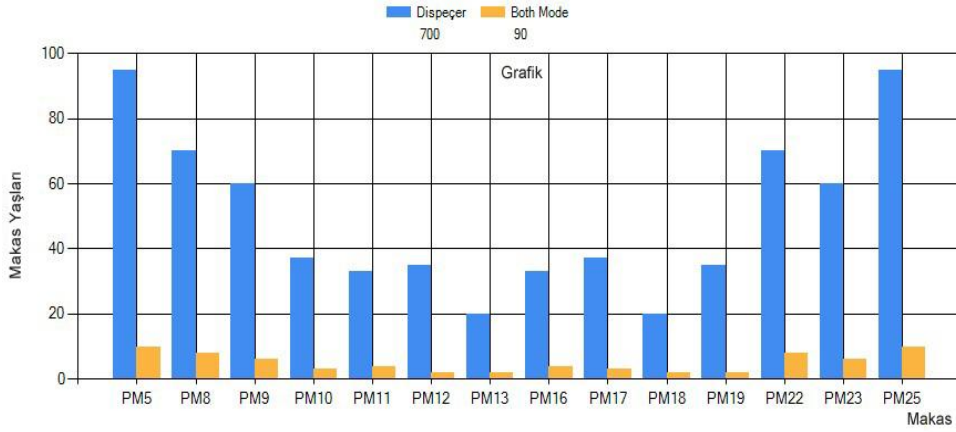
Şekil 17. Eşit katsayılı ağırlıklı ceza algoritması



Şekil 18. Arıza enjekteli enerji tasarruf algoritması



Şekil 19. Arıza enjekteli eş-yaşlandırma algoritması



Şekil 20. Arıza enjekteli eşit katsayılı ağırlıklı ceza algoritması

Eşit katsayılı ağırlıklı ceza algoritması çalışırken sisteme arıza enjekte edilmesi durumunda da yukarı bölümlerde elde edilen grafiklere benzer grafikler elde edilmiştir. Arıza enjekte edilmesinin dispeçeri aynı seçimler yapmaya zorlaması, böylece makas çevrim sayısının düşmesine eşit katsayılı ağırlıklı ceza algoritmasında da görülmektedir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda, önerilen üç algoritmanın da rastgele dispeçer seçimlerine göre çok daha az enerji kullanımına sebep olduğu ve makasların eşit oranda kullanılmasını sağlayarak planlanandan önce makas arızası oluşması riskinin azalttığı görülmüştür. Günlük ortalama 200 güzergâh tanziminin gerçekleştirildiği Esenerler depo sahası için elde edilen tasarruf miktarı Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Enerji tasarruf algoritmasına göre tasarruf edilen miktarlar

Günlük	Aylık	Yıllık	5 Yıllık
70€	2100€	25200€	126000€

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, sabit-blok sinyalizasyon sistemine

sahip tren depo sahalarında gelen trenler için güzergâh talep ve tanzim aşamasında enerji tasarrufu ve makas eş-yaşlandırma kriterlerini göz önüne alarak dispeçere güzergâh seçiminde yardımcı olan bir kumanda merkezi yazılımı geliştirilmiştir. Enerji tasarrufu, makas eş-yaşlandırma ve her iki kriterinde beraber kullanıldığı üç farklı algoritma önerilmiştir. Nesne tabanlı programlama yöntemi ile geliştirilen yazılıma, bahsi geçen algoritmaların istenilen amaca ulaşmış ve ulaşmadığının anlaşılması için benzetim özelliği eklenmiş ve benzetim sonuçları grafiksel olarak ifade edilmiştir.

Tanımlanan kriterlere göre benzetimi yapılan algoritmaların, rastgele güzergâh tanzimine göre hem enerji tasarrufu hem de eşit oranda kullanılmasını sağladığı görülmüştür. Günlük, aylık, yıllık ve 5 yıllık zaman dilimleri göz önünde bulundurulduğunda önerilen çözümün büyük oranda kazanç sağladığı ve bazı makasların aşırı kullanılmasından kaynaklanan plansız bakım maliyetlerini azalttığı görülmüştür. Önerilen algoritmaların doğruluğunu daha da arttırmak amacıyla rastgele arızalar oluşturularak benzetim çalışmalarına enjekte edilmiş ve algoritmaların doğruluğu test edilmiştir. İleriye

yönelik olarak, en iyi çözümün bulunması, bulanık yöntemlerin kullanılarak algoritmaların etkinliklerinin artırılması planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 115E394 numaralı Sabit-blok Demiryolu Sinyalizasyon Sistemleri için Arıza Teşhisi yapabilen Anlaşman Sistemi Tasarımı ve Hatada-Güvenli PLC'ler ile Gerçeklenmesi projesi tarafından desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] Ürge-Vorsatz, D., Miladinova, G., Pázs, L. 2006. Energy in transition: From the Iron Curtain to the European Union. *Energy Policy*, 34, 2279-2297.
- [2] Vuchic, V. R. 2007. *Urban Transit Systems and Technology*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [3] Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., Kroon, L. G. 2017. Review of Energy-Efficient Train Control and Timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355-376.
- [4] Şenlik, İ., 2016. Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemleri. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 458, 37-39.
- [5] Mindali, O. Raveh A., Salomon, I. 2004. Urban Density and Energy Consumption: A New Look at Old Statistics. *Transportation Research Part A*, 38, 143-162.
- [6] Howlett, P. G., Milroy, I. P., Pudney, P. J. 1994. Energy-Efficient Train Control. *Control Engineering Practice*, 2(2), 193-200.
- [7] Liu, R., Golovitcher, I. M. 2003. Energy-Efficient Operation of Rail Vehicles. *Transportation Research Part A*, 37, 917-932.
- [8] Falvo, M. C., Lamedica, R., Bartoni, R., Maranzano, G. 2011. Energy Management in Metro-Transit Systems: An Innovative Proposal Toward an Integrated and Sustainable Urban Mobility System Including Plug-In Electric Vehicles. *Electric Power Systems Research*, 81, 2127-2138.
- [9] Su, S., Li, X., Tang, T., Gao, Z. 2013. A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-Efficient Operation Strategy. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 883-893.
- [10] Sicre, C., Cucala, P., Fernandez, A., Jimenez, J. A., Ribera, I., Serrano, A. 2010. A Method to Optimise Train Energy Consumption Combining Manual Energy Efficient Driving and Scheduling. *Computers in Railways*, 114, 549-560.
- [11] Norrbin, P., Lin, J., Parida, A. 2016. Energy Efficiency Optimization for Railway Switches & Crossings: A Case Study in Sweden. 11th World Congress on Railway Research, 29th May - 2nd June, Milan, Italy, 1-6.
- [12] Basile, D., Chiaradonna, S., Di Giandomenico, F., Gnesi, S. 2016. A Stochastic Model-Based Approach to Analyse Reliable Energy Saving Rail Road Switch Heating Systems. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(2), 163-181.
- [13] Günselmann, W. 2005. Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems. European Conference on Power Electronics and Applications, 11-14 September, Dresden-Germany, 1-10.
- [14] Ogasa, M. 2008. Energy Saving and Environmental Measures in Railway Technologies: Example with Hybrid Electric Railway Vehicles. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 3, 15-20.
- [15] Milinaric T. J., Pnikvar K. 2011. Energy Efficiency of Railway Lines. *PROMET - Traffic & Transportation*, 23(3), 187-193.
- [16] Lee, J., Choi, H., Park, D., Chung, Y., Kim, H. Y., Yoon, S. 2016. Fault Detection and Diagnosis of Railway Point Machines by Sound Analysis. *Sensors*, 16(4), 1-12.
- [17] Kasımoğlu, E. 2015. Tramvay İstasyonlarında Tasarım ve Güvenlik Esaslarının Araştırılması İstanbul T1 Tramvay Hattı İncelemesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [18] Demirdağ, M. N. 2007. Kentiçi Raylı Sistemlerde Hat Bakım ve Maliyeti. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [19] Mecitoğlu F. 2013. Demiryolu Sinyalizasyon Sistemi Simülatörü ve SCADA Sistemi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [20] Baştürk, G. 2014. Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri İncelemesi ve Dünya Örnekleri İle Karşılaştırılması. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, Ankara.
- [21] Hall, S., 2001. *Modern Signalling Handbook*. Ian Allan Publishing.
- [22] Durmuş, M. S., Yıldırım, U., Söylemez, M. T. 2013. The Application of Automation Theory to Railway Signaling Systems: The Turkish National Railway Signaling Project. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(5), 216-223.