



Raylı Sistemlerde Fonksiyonel Emniyet Kapsamında Frenleme, Hata, Acil Frenleme ve Kaza Simülasyonları

Seçkin ULUSKAN^{*1} , Ahmet Mert AKDAĞLI² 

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Raylı Sis. Elektrik Elektronik Prg., Eskişehir, Türkiye

² Eskişehir Teknik Üniversitesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

*seckinuluskan@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 27.05.2023, Kabul/Accepted: 16.06.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Raylı sistemlerde günümüzde otonomlaşıma artarken, hata durumlarında sistemin kendi güvenliğini sağlayarak olumsuz durumu ortadan kaldırmasını sağlayacak fonksiyonel emniyet tasarımlarının oluşturulması, emniyet için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, raylı sistem sinyalizasyonunda fonksiyonel emniyet kapsamında, bir engel önünde durmak üzere fren yapan trenler için bir hata durumunda kaza yapma simülasyonları oluşturulmuştur. Avrupa Demiryolları Ajansının dokümanı yardımıyla Metro ve Yüksek Hızlı Tren için frenleme eğrileri üretilmiştir. Daha sonra, UNISIG konsorsiyumun belirlediği emniyet analizi dokümanından, frenleme öncesi ve sonrasında meydana gelebilecek çeşitli hatalar seçilerek ve hata durumlarında acil fren önerileri eklenerek örnek bir hata ağacı analizi oluşturulmuştur. Bu işlemin ardından, Matlab ortamında programlar yazılarak, hata ve kaza simülasyonları oluşturulmuştur. Hataların rassal olarak meydana geldiği Monte Carlo simülasyonları ile kaza oranları belirlenmiş, acil frenlerin devreye girme sürelerinin kaza olasılığı üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar çeşitli açılardan değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Sonuç olarak, kazaların mümkün olduğunca önlenmesi için, ileri düzey teknolojiye dayanan fonksiyonel emniyet sistemlerinin gerekliliğine vurgu yapılmış ve yeni önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemlerde sinyalizasyon, Fonksiyonel emniyet, Frenleme eğrileri, Hata ağacı analizi, Monte Carlo simülasyonu

Braking, Failure, Emergency Braking and Accident Simulations from the Perspective of Functional Safety in Rail Systems

Abstract: While autonomy is increasing in rail systems today, it is very important for safety to create functional safety designs that ensure the system's own safety and eliminate the negative situation in case of failures. In this study, within the scope of functional safety in rail system signaling, accident simulations are created for trains which are braking to stop in front of an obstacle. With the help of the document of the European Railways Agency, braking curves have been obtained for the Metro and High Speed Trains. Then, a sample fault tree analysis has been created by selecting various failures that may occur before and after braking via the safety analysis document of the UNISIG consortium, as well as by adding emergency brake suggestions in case of failures. Then, failure and accident simulations have been created by writing codes in Matlab. The accident rates have been determined with the help of Monte Carlo Simulations in which failures occur randomly, and the effect of the activation time of the emergency brakes on the probability of accidents have been investigated. The results are evaluated and discussed from various perspectives. Consequently, the necessity of functional safety systems based on advanced technology is emphasized, and new suggestions are made in order to remove the accidents as much as possible.

Keywords: Signaling in rail systems, Functional safety, Braking curves, Fault tree analysis, Monte Carlo simulation

Atıf için/Cite as: S. Uluskan, A. M. Akdağlı, "Raylı sistemlerde fonksiyonel emniyet kapsamında frenleme, hata, acil frenleme ve kaza simülasyonları," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 121-132, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1304112

1. Giriş

Demiryolları şehir içinde ve şehirler arasında yolcu ve yük taşımalarının kesintisiz sağlanması açısından büyük bir öneme sahiptir. Demiryollarında yük ve yolcu taşımacılığının artmasıyla güvenli bir işletimin sağlanması için sinyalizasyon sistemlerinin ve haberleşmenin gelişmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Telgraf sistemleri ile başlayan haberleşme ve sinyalizasyon, telefon sistemleri ile devam etmiştir. Günümüzde ise bu teknolojiler GSM, 4G LTE, 5G teknolojilerinin kullanımı ile gelişimine devam etmektedir [1]. Bu haberleşme sistemleri yardımıyla takometreye bağlı sensör, GPS ve Galileo uydu sistemleri kullanılarak, konum doğrulama işlemi yapılabilmektedir [2].

Demiryollarında güvenli bir işletimin sağlanabilmesi için tasarım aşamasında çeşitli normlar, kurallar ve standartlar kullanılmaktadır. Bu standartların yanı sıra, fonksiyonel emniyet kavramının günümüzde önem kazanmasıyla bu alanda yapılan çalışmaların sayısı artmıştır. Fonksiyonel emniyet, hata durumları veya acil durumlar gibi durumlarda sistemin kendi güvenliğini sağlayarak meydana gelen olumsuz durumu güvenli bir şekilde ortadan kaldırmasıdır. Örneğin, haberleşme hatası meydana gelen bir sinyalizasyon sistemi, hata anında güvenliği tehdit etmeyecek şekilde haberleşmeye devam edebilmelidir. Fonksiyonel emniyet kavramının raylı sistemlerde önemi büyüktür. Bu sebeple, raylı sistemlerde çeşitli uluslararası fonksiyonel emniyet analizleri ve standartları bulunmaktadır [3].

Fonksiyonel emniyet analizi yöntemlerinin demiryollarına özelleşmiş olanlarından bazıları, Hata Modları ve Etkileri Analizi (FMEA), Blok Diyagram ve Boole Yöntemi, Hata Ağacı Analizi, Olay Ağacı Analizi, Bowtie Yöntemi ve Karar Ağacı Analizi olarak sayılmaktadır [4]. Demiryollarında güvenliğin sağlanabilmesi için gelişmiş yöntemler ise Markov Modelleri, Monte Carlo Simülasyonu, Petri Ağları, Bayes Ağları ve Etki Diyagramları ve Bulanık Mantık olarak sıralanmaktadır [5].

Demiryolu sinyalizasyonu ve fonksiyonel emniyet sistemleri sayesinde son dönemde kaza oranları gözle görülür seviyede azalmıştır. Fakat, raylı sistemlerde gelişen önlemlere veya teknolojiye rağmen kazalar devam etmektedir. Mevcut sistemlerin kullanım süresi için öngörülen sürenin dolmaması sebebiyle eskiden sistemlerin yerine yeni sistemler kurulamaması, demiryollarında çeşitli kazalar meydana getirmektedir [6]. Kazaların önlenmesi konusunda, ülkeler bazında araştırma geliştirme faaliyetlerine ayrılan bütçe arttığında kaza olma olasılığı düştüğü belirtilmektedir [7]. Çeşitli makine öğrenimi ve bilgisayar tabanlı simülasyon yöntemleriyle, gelecek kazaların öngörülebilmesi gerçekleştirilebilir. Raylı sistemlerde sinyalizasyon ve fonksiyonel emniyet tasarımı konusunda yapılan çalışmalar açısından ulusal literatür incelendiğinde, birkaç çalışma haricinde [8], sinyalizasyon kapsamında fonksiyonel emniyet alanında yeterince akademik çalışmanın bulunmadığı görülmüştür. Sonuç olarak, bu alanda literatüre katkı sunmanın yararlı olacağı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, Avrupa Demiryolları Ajansının frenleme eğrileri simülasyonu yardımıyla Metro ve Yüksek Hızlı Tren için frenleme eğrileri üretilmiştir. Daha sonra, UNISIG konsorsiyumun belirlediği emniyet usulleri ve emniyet analizi dokümanlarına bakılarak frenleme öncesinde ve sonrasında meydana gelebilecek hatalar belirlenerek örnek bir hata ağacı analizi oluşturulmuştur. Bu hatalar gerçekleştiğinde trenin engele çarpmasını önleyecek sistem önerileri hata ağacına eklenmiştir. Ardından, bir engel önünde durmak üzere fren yapan ya da yapması gereken trenler için bir Matlab tabanlı hata ve kaza simülasyonları oluşturulmuştur. Matlab ortamında, hata anında meydana gelebilecek kaza oranları Monte Carlo Simülasyonu yardımıyla incelenerek, acil frenlerin devre girme sürelerinin kaza olasılığını azaltma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Son olarak, sonuçlar farklı açılardan değerlendirilerek, raylı sistemlerde kazaların azaltılması için önerilerde bulunulmuştur.

2. Raylı Sistem Frenleme Eğrileri

Bu bölümde, bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonların temelini oluşturan tren frenleme eğrileri konusu ele alınacaktır. Öncelikle, frenleme eğrilerinin genel matematiksel denklemleri sunulacak ve daha sonra Avrupa Demiryolu Ajansının frenleme eğrisi oluşturma dokümanı tanıtılacaktır. Bu dokümanda yer alan parametrelerin ve değişkenlerin anlamları kısaca tanıtılacaktır. Son olarak, simülasyonlarda kullanılacak olan frenleme eğrilerinin nasıl elde edildiği kısaca anlatılacaktır. Tren frenleme eğrileri konusu için, haberleşme temelli tren sinyalizasyon sistemindeki hız profillerinin belirlendiği IEEE 1474-1 [9] ve IEEE 1698 [10] standartları ve Avrupa Demiryolları Ajansı frenleme eğrileri [11] kaynak olarak alınacaktır.

2.1. Frenleme eğrileri ve hız-konum grafikleri

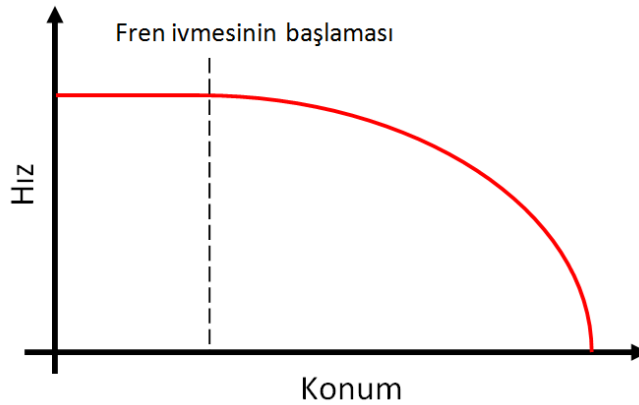
Bu bölümde tren frenleme eğrilerinin genel denklemleri aktarılacaktır. Tren frenleme eğrileri temel olarak, bir trenin frenleme karakteristiğini hız-konum grafikleri aracılığıyla gösteren grafiklerdir. Frenleme anında tren için alınan yol denklemi, zamana bağlı olarak şu şekilde ifade edilir:

$$D_f = D_i + v_i t - \frac{1}{2}(a \cdot t^2) \quad (1)$$

Burada, D_f trenin metre cinsinden son konumu, D_i başlangıç konumunu, v_i başlangıç hızını, t geçen zamanı, a trenin fren ivmesini (m/s^2) ifade etmektedir. Eğer başlangıç konumu $D_i = 0$ alınırsa ve geçen süre yerine v_i/a ifadesi yazılırsa bu denklem şu hale dönüşmektedir:

$$D_f = K_1 \frac{v_i^2}{2a} \quad (2)$$

Burada fren mesafesi metre, hız km/saat, ivme ise m/s^2 olarak alınırsa, K_1 değeri 0,7716 olmaktadır [10]. Bu şekilde tanımlanmış bir frenleme eğrisinin genel görünümü Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Tren frenleme eğrisi (hız-konum grafiği)

2.2. Avrupa Demiryolları Ajansı frenleme eğrileri

Avrupa Demiryolları Ajansı (ERA), frenleme eğrilerini modellemek amacıyla demiryolu araçlarına etki eden parametrelerin girilebildiği Excel formatında bir yazılım [11] geliştirmiştir. Bu Excel dokümanı hattaki frenleme eğrilerini gerçektekine uygun bir biçimde modellemeyi amaçlamıştır. Bahsedilen bu doküman, bu çalışmada simülasyonlarda kullanılacak olan frenleme eğrilerinin oluşturabilmesi için gerekli olan verilerin elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu sebeple, bu bölümde bu dokümandan kısaca bahsedilecektir.

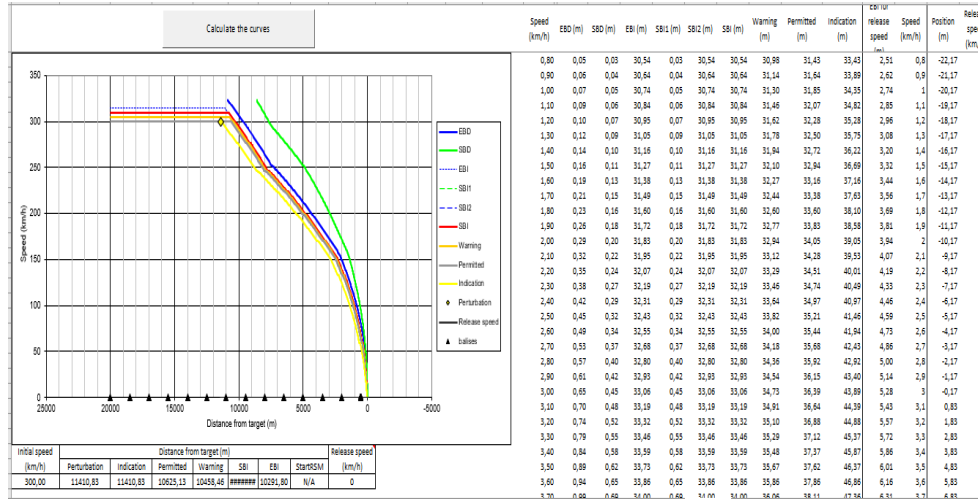
Avrupa Demiryolları Ajansının (ERA) frenleme eğrilerini modellemek amacıyla oluşturduğu Excel dokümanında, trenlere ve hatlara yönelik çok sayıda parametrenin girilebilmesi için farklı çalışma sayfaları bulunmaktadır. Bu çalışma sayfalarından ilki olan tren parametreleri sayfasında, tren türü, fren konumu, cer modeli, servis freni arayüzü, cer devreye alma-kapatma arayüzü, tekerlek ray adezyonundan (yapışmasından) bağımsız özel veya ek frenlerin etkinliği, hız değeri hatası, konum hatası, tren uzunluğu, nominal dönen kütle, balizleri okuyan antenlerin trenin önünden uzaklığı gibi parametreler belirlenebilmektedir. Hat parametreleri sayfasında, trenin hız değerine ek olarak hat eğimleri, baliz uzaklıkları ve ETCS seviyesi dahil birçok parametrenin hat boyunca değerleri girilerek tren hattı modellenilebilir.

Fren parametreleri sayfasında, fren parametreleri ve fren çeşitlerine göre acil fren güvenilirlik değerleri gösterilmektedir. Geri kazanımlı frenleme, Eddy akım freni ve manyetik ray freni türlerinden hangilerinin kullanıldığı belirlenebilir. Örneğin, Kombinasyon n1, geri kazanımlı frenleme, Eddy akımı frenleme ve manyetik frenlerin beraber birlikte kullanıldığını ifade eder veya Kombinasyon n2, geri kazanımlı frenleme ve manyetik frenlemenin birlikte kullanıldığını ifade eder. Bu sayfada ayrıca kuru raylarda acil frenleme performansının dağılım katsayısı, acil fren güvenilirlik seviyesi, tam fren durumundaki ivme ve normal servis freni durumundaki ivme gibi değerler de girilebilmektedir.

Excel dokümanına değerler girilip hesaplama işlemi çalıştırılır. Sonuçlar ise frenleme eğrileri sayfasında gösterilmektedir. Bu arayüzden alınan verilerle, trenlere ait frenleme eğrilerine yönelik gerçeğe yakın değerlere ulaşılabilir. Bu sayfada, kullanıcılara sunulan verilerin açıklamaları şu şekildedir:

- Tetikleme Konumu (Perturbation location): Tetikleme konumunun amacı, treni hedefine varmadan önce fren yapması için tetiklemektir.
- İşaret Konumu (Indication Location): İşaret konumunun amacı makinisti uyararak hızı yavaşlatmaya başlaması ihtiyacının bulunduğunu söylemektir.
- Onaylanmış Konum (Permitted Location): Makinist ekranında görünen aşılmaması gereken konumdur.
- Uyarı Konumu (Warning Location): Uyarı hızının aşılması durumunda makinistin sesli olarak uyarıldığı konumdur.
- Servis Freni Müdahalesi Başlangıç Konumu (Service brake intervention location - SBI): Servis freni kriterlerinin aşılması durumunda otomatik olarak servis freninin devreye girdiği konumdur.
- Acil Fren Müdahalesi Başlangıç Noktası (Emergency brake intervention location - EBI): Acil fren kriterlerinin aşılması durumunda acil durum freninin otomatik olarak devreye girdiği konumdur.
- Acil Fren Yavaşlama İvmesi (Emergency Brake Deceleration - EBD): Acil fren nedeniyle hız düşüşü ile ilgili frenleme eğrisidir. EBI eğrisi geçilirse tren otomatik acil frenle, EBD eğrisinin altında veya onunla uyumlu bir yavaşlama izler.
- Servis Freni Yavaşlama İvmesi (Service Brake Deceleration - SBD): Beklenen yavaşlamayı temel alan ve izin verilen fren mesafesine eşit bir mesafede sıfır hıza ulaşan eğridir.

Yukarıda kısaca tanıtilen Excel doküman, bu çalışmada Matlab simülasyonunda kullanılmak üzere frenleme eğrisi verilerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Matlab simülasyonunda yer alacak Metro ve Yüksek Hızlı Tren simülasyonları için aynı hat parametreleri kullanılmıştır. Metronun giriş hızı 80 km/saat, Yüksek Hızlı Trenin giriş hızı ise 300 km/saat olarak belirlenmiştir. Simülasyonlarda kullanılacak eğriler ise fren başlama konumu için İşaret Eğrisi (Indication), ve hata durumlarında ivmelenme değeri olarak ise Acil Fren Yavaşlama İvmesi (Emergency Braking Deceleration- EBD) seçilmiştir. Şekil 2'de Yüksek Hızlı Trene ait oluşturulan frenleme eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 2. Yüksek Hızlı Trene ait frenleme eğrilerini içeren arayüz [11]

3. Frenleme, Hata ve Kaza Önleme Simülasyonları

Bu bölümde, Matlab ortamında frenleme, hata ve kaza önleme simülasyonlarının nasıl oluşturulduğu anlatılmaktadır. Örnek bir hata ağacı analizi, ona bağlı olarak oluşturulan yazılım ve son olarak rassal hata gelişimi ve kaza önleme senaryoları içeren Monte Carlo simülasyonları tanıtılmıştır.

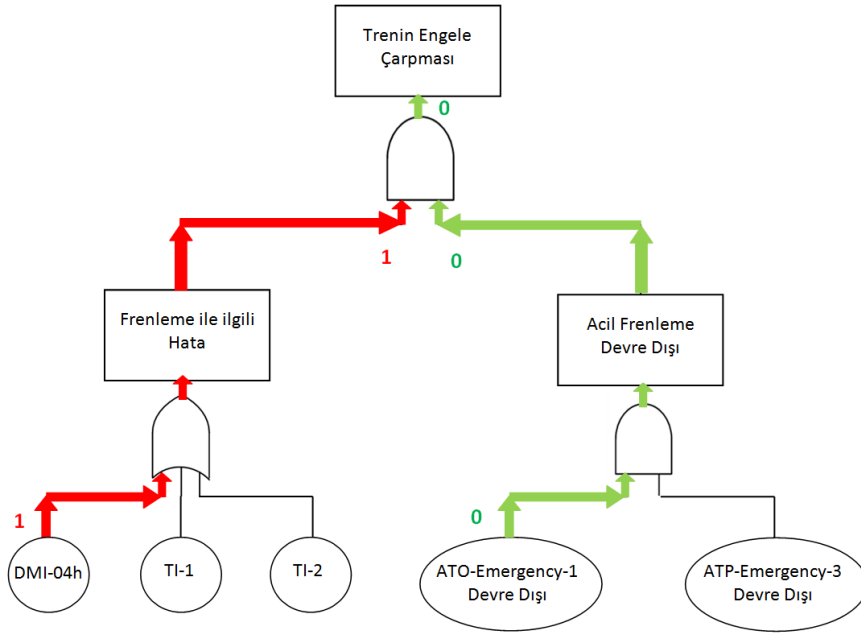
3.1. Hata ağacı analizi

Hata ağacı analizi farklı alt grup sistemleri içeren hataları analizi etmeye yarayan bir risk analizi yöntemidir. Bu yöntem sayesinde çeşitli alt grupların kök sebepleri detaylıca analiz edilebilir. Bu kısımda ilk olarak, trenin engele çarpması sonucunu doğurabilecek temel bir hata ağacı oluşturulmuştur. Daha sonra hata durumunda engele çarpmasının önüne geçebilecek acil fren önerileri hata ağacına dahil edilmiştir.

Bu çalışmada, kullanılan hatalar ERA Subset 088, Subset 091, Subset 118 standartlarından seçilmiştir [12,13,14,3]. Bu hatalar, sürücü makine arayüzünde (DMI) veya tren arayüz ünitesinde (TIU) oluşabilecek hatalar sonucu mevcut frenin hatalı olarak serbest bırakılması veya gerektiği halde hiç uygulanmamasına yöneliktir:

- DMI-04h: Sürücü makine arayüzü veya panelinde (DMI), servis frenini ya da acil durum freninin serbest bırakılması için müdahale edilmesine yönelik hatalı bilgi verilmesi (*Spurious acknowledgement of intervention leading to release of emergency or service brake*)
- TI-1: Tren arayüz ünitesinde (TIU), gerekli olduğu halde servis freni ya da acil fren komutunun verilmemesi (*Service brake / emergency brake not commanded when required*)
- TI-2: Tren arayüz ünitesinde (TIU), gerekli olmadığı halde servis freni ya da acil frenin serbest bırakılması komutunun verilmesi (*Service brake / emergency brake release commanded when not required*)

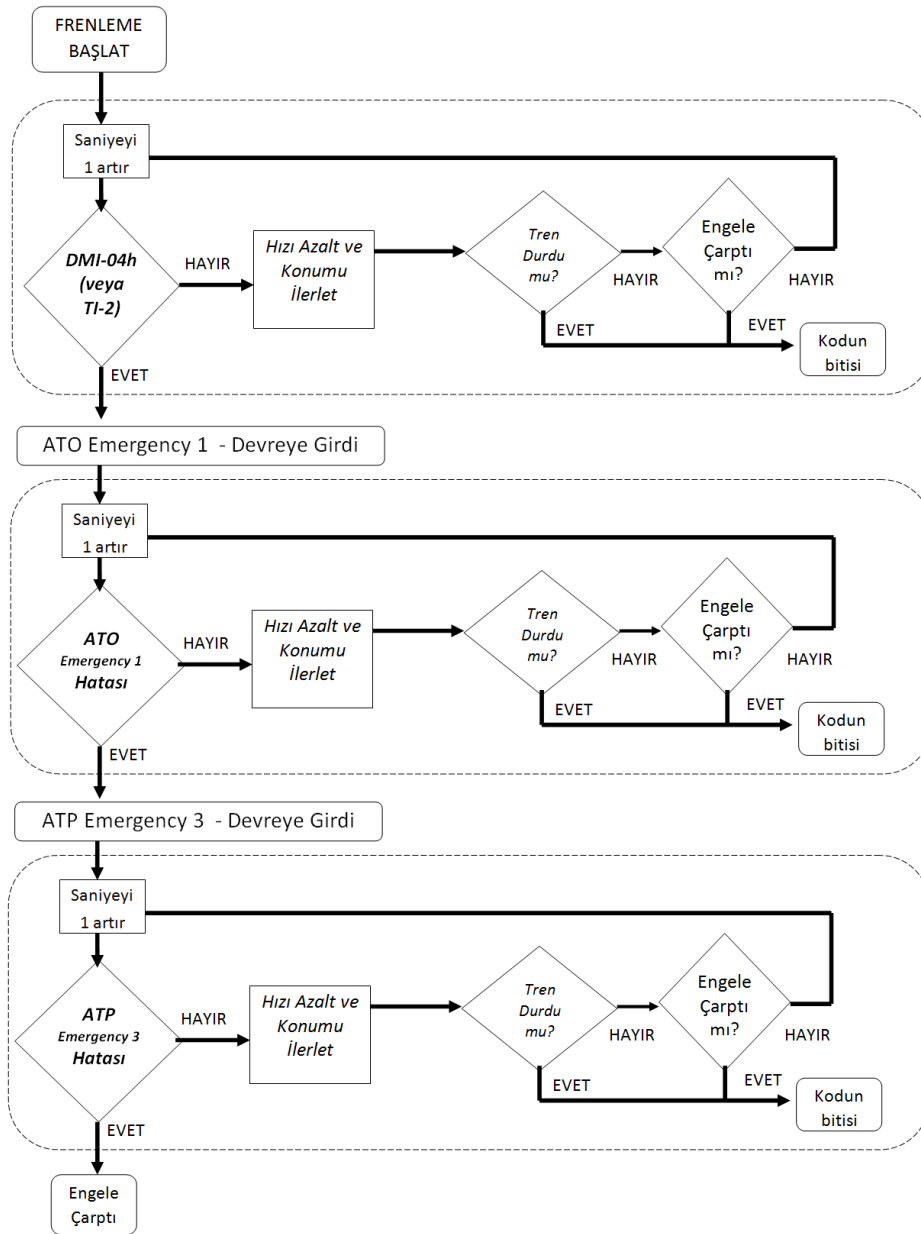
Bu hataların kazaya yol açmasını önlemek için EN 13452-1 standardında belirtilen ATO-Emergency-1 ve ATP-Emergency-3 adlarına sahip acil durum frenleri kullanılmıştır. Oluşturulan örnek hata ağacı Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'te, örnek olarak DMI-04h hatası geliştiğinde, acil frenlerin engele çarpmayı nasıl önleyebileceği anlatılmaktadır. Hata durumunda, ATO-Emergency-1 acil frenleme sistemi devreye girerek engele çarpmadan önce trenin durdurulmasını sağlayacaktır.



Şekil 3. Oluşturulan örnek hata ağacı ve DMI-04h hatası durumunda ATO-Emergency-1'in devreye girmesi

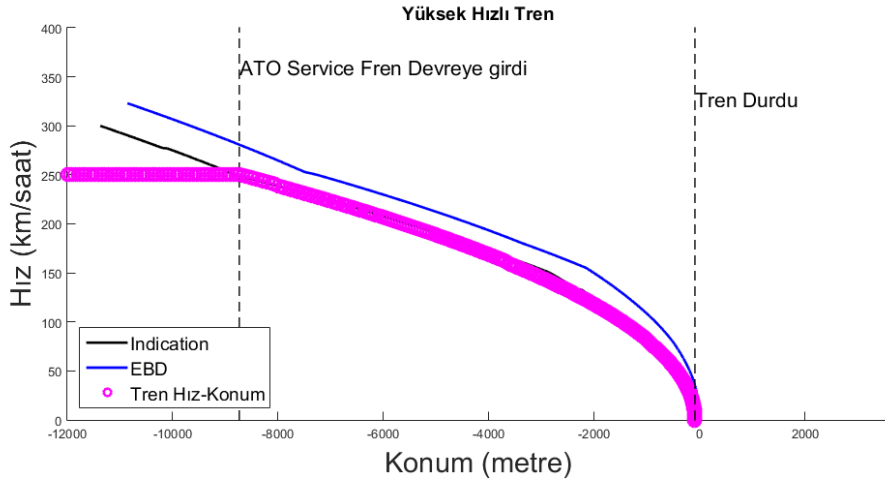
3.2. Matlab ortamında frenleme ve kaza simülasyonları

Bu bölümde, yukarıda oluşturulan hata ağacındaki olayların, bir engel önünde durmak üzere fren yapmakta olan trenler için Matlab simülasyonuna dönüştürülmesi anlatılmıştır. Matlab ortamında [15] oluşturulan simülasyonlara yönelik örnek bir akış şeması Şekil 4'te verilmiştir. Simülasyon, bir saniyelik adımlarla ilerlemektedir. Her saniye için trenin konumu ve eğer fren yapıyorsa hızı güncellenmektedir. Tren, İşaret eğrisini geçtiğinde fren yapmaktadır. Simülasyon, tren durunca veya engele çarptığında tamamlanmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi frenleme başlamakta fakat belli bir süre sonra rassal bir anda DMI-04h veya TI-2 hataları meydana gelerek frenleme ortadan kalkmaktadır. Bu durumda ATO-Emergency-1 devreye girmektedir. Eğer, ATO-Emergency-1 hatası gelişirse ATP-Emergency-3 devreye girmektedir. Hata olaylarının rassal olarak gerçekleştiği bu simülasyonda, tren durursa veya engele çarparsa simülasyon bitmektedir. Benzer şekilde, TI-1 hatası için de gerekli akış şemaları ve Matlab yazılımları oluşturularak simülasyonlar yapılmıştır.

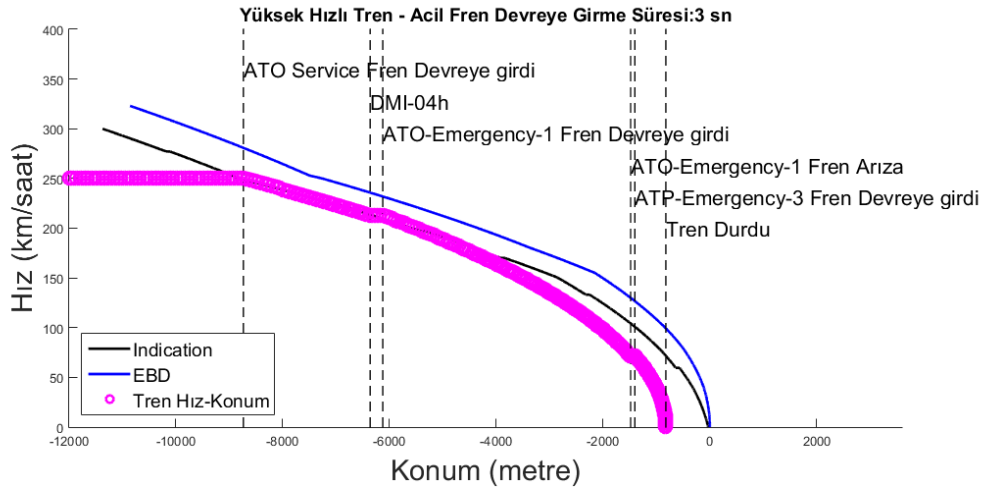


Şekil 4. Kaza simülasyonu için Matlab koduna yönelik örnek bir akış diyagramı

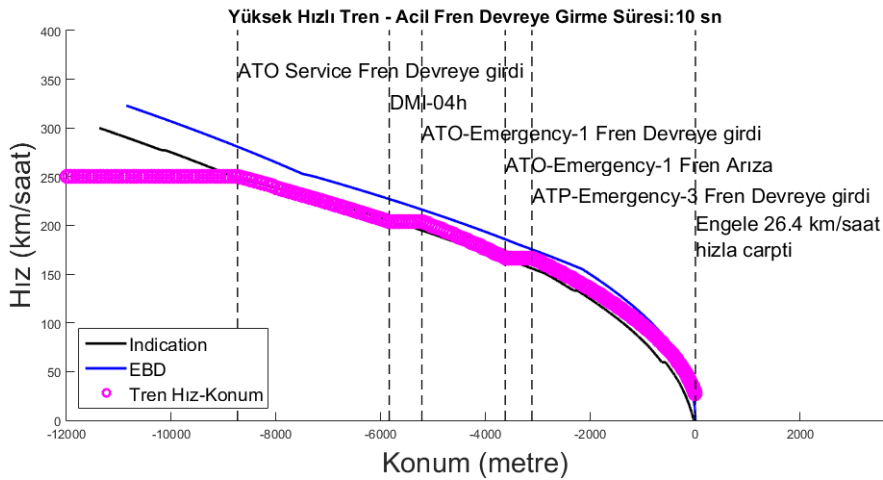
Matlab ortamında oluşturulan simülasyon görüntüleri aşağıda sunulmuştur. Şekil 5'te gösterilen Yüksek Hızlı Tren (YHT) simülasyonunda, tren ilk olarak sabit hızla giriş yapmaktadır. Hata olmaması durumunda, Şekil 5'te gösterildiği üzere, işaret çizgisine ulaştığında frenleme başlayarak, engele çarpmadan durmaktadır. Fakat hata gelişirse, Şekil 6'da gösterildiği gibi acil frenler devreye girmekte ve tren engelden önce durabilmektedir. Ya da, Şekil 7'de gösterildiği üzere acil frenler devreye girse bile, acil frenlerin gecikmeleri durumunda tren engele çarpmakta yani kaza meydana gelebilmektedir. Benzer şekilde, TI-1 hatasında, tren işaret çizgisini geçtiği halde fren yapmamakta ve sonuç olarak ATO-Emergency-1 devreye girmektedir. Monte Carlo simülasyonlarında, acil frenlerin devreye girme sürelerinin kaza olasılığı üzerine etkisi incelenecektir.



Şekil 5. Simülasyonlarla elde edilen normal frenleme grafiği



Şekil 6. Simülasyonlarla elde edilen DMI-04h hatası durumunda acil frenleme ile kazanın önleniği duruma bir örnek



Şekil 7. Simülasyonlarla elde edilen DMI-04h hatası durumunda acil frenleme olsa bile kazanın geliştiği duruma bir örnek

3.3. Monte Carlo simülasyonları ile kaza oranları

Bu bölümde Monte Carlo simülasyonları aracılığıyla, acil frenlerin devreye girme sürelerinin kaza olasılığına etkisi incelenecektir. Her bir durum için 100 adet Monte Carlo tekrarlama yapılarak kaza oranları hesaplanmıştır ve tablolar halinde sunulmuştur.

Metro için DMI-04h (veya TI-2) hatasına ait Monte Carlo simülasyonu sonuçlarına ait kaza oranları Tablo 1’de verilmiştir. Metro için TI-1 hatası ise Tablo 2’de sunulmuştur. Yüksek Hızlı Tren için DMI-04h (veya TI-2) hatası Tablo 3’te, Yüksek Hızlı Tren için TI-1 hatası ise Tablo 4’te verilmiştir. Metro için, başlangıç tren hızı 80 km/saat, normal fren ivmesi 0,95 km/(saat . sn), frenleme başladığı mesafe 960 metre, hata gelişme olasılığı saniyede 0.03, ATO-Emergency-1 ve ATP-Emergency-3 fren ivmesi 1,73 km/(saat . sn) (yani EBD değeri) olarak girilmiştir. YHT için, başlangıç tren hızı 250 km/saat, normal fren ivmesi 1 km/ (saat . sn), frenleme başladığı mesafe 8800 metre, hata gelişme olasılığı saniyede 0.01, ATO-Emergency-1 ve ATP-Emergency-3 fren ivmesi 1,2 km/(saat . sn) (yani EBD değeri) olarak girilmiştir. Yukarıdaki fren değerleri çevresel faktörler, sürtünme elemanları, yolun yapısı, tekerleklerin yıpranması gibi şartlar göz önüne alındığında, $1-10^{-4}$ güvenilirlik seviyesinde garantilenmiş fren değerleridir.

Tablo 1. Metro DMI-04h hatasında Monte Carlo simülasyon sonuçları (kaza oranları)

		ATO-Emergency-1 Fren Devreye Girme Süresi							
		2 sn	4 sn	6 sn	8 sn	10 sn	12 sn	14 sn	16 sn
ATP-Emergency-3 Fren Devreye Girme Süresi	2 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 1	% 17	% 59
	4 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 2	% 12	% 22	% 61
	6 sn	% 0	% 0	% 0	% 1	% 9	% 25	% 29	% 64
	8 sn	% 0	% 0	% 0	% 6	% 21	% 30	% 35	% 66
	10 sn	% 0	% 0	% 5	% 15	% 28	% 32	% 40	% 67
	12 sn	% 0	% 3	% 12	% 20	% 31	% 41	% 42	% 70
	14 sn	% 8	% 10	% 18	% 23	% 34	% 43	% 45	% 73
	16 sn	% 9	% 16	% 27	% 38	% 47	% 55	% 67	% 76

Tablo 2. Metro TI-1 hatasında Monte Carlo simülasyon sonuçları (kaza oranları)

		ATO-Emergency-1 Fren Devreye Girme Süresi							
		2 sn	4 sn	6 sn	8 sn	10 sn	12 sn	14 sn	16 sn
ATP-Emergency-3 Fren Devreye Girme Süresi	2 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0
	4 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 38
	6 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 27	% 55
	8 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 25	% 46	% 61
	10 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 25	% 40	% 52	% 68
	12 sn	% 0	% 0	% 0	% 9	% 38	% 51	% 63	% 69
	14 sn	% 0	% 0	% 11	% 34	% 41	% 58	% 65	% 75
	16 sn	% 0	% 10	% 23	% 35	% 48	% 63	% 66	% 76

Tablo 3. Yüksek Hızlı Tren DMI-04h hatasında Monte Carlo simülasyon sonuçları (kaza oranları)

		ATO-Emergency-1 Fren Devreye Girme Süresi							
		2 sn	4 sn	6 sn	8 sn	10 sn	12 sn	14 sn	16 sn
ATP-Emergency-3 Fren Devreye Girme Süresi	2 sn	% 0	% 0	% 0	% 2	% 16	% 25	% 34	% 50
	4 sn	% 0	% 0	% 1	% 8	% 20	% 28	% 42	% 59
	6 sn	% 0	% 0	% 2	% 12	% 22	% 30	% 60	% 70
	8 sn	% 0	% 2	% 7	% 15	% 34	% 50	% 64	% 73
	10 sn	% 2	% 10	% 15	% 23	% 39	% 58	% 67	% 74
	12 sn	% 7	% 12	% 23	% 28	% 48	% 61	% 69	% 79
	14 sn	% 9	% 17	% 21	% 35	% 53	% 67	% 71	% 83
	16 sn	% 16	% 23	% 38	% 46	% 58	% 68	% 77	% 85

Tablo 4. Yüksek Hızlı Tren TI-1 hatasında Monte Carlo simülasyon sonuçları (kaza oranları)

		ATO-Emergency-1 Fren Devreye Girme Süresi							
		2 sn	4 sn	6 sn	8 sn	10 sn	12 sn	14 sn	16 sn
ATP-Emergency-3 Fren Devreye Girme Süresi	2 sn	%0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0
	4 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0
	6 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 47
	8 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 32	% 64
	10 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 0	% 32	% 57	% 68
	12 sn	% 0	% 0	% 0	% 0	% 18	% 40	% 62	% 74
	14 sn	% 0	% 0	% 0	% 27	% 40	% 56	% 68	% 79
	16 sn	% 0	% 0	% 20	% 41	% 53	% 60	% 73	% 80

4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma, raylı acil frenleme süresinin kaza oranı üzerine etkisini göstererek, ulusal ve uluslararası literatüre özgün katkı sunmaktadır. Yapılan Monte Carlo simülasyonları sonucunda, hata durumunda acil frenleme sisteminin devreye girme süresinin artışıyla kaza oranında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Bu durum, acil frenleme devreye girme süresinin kazayı engellemek konusunda ne kadar kritik olduğunun göstergesidir. Her dört durum için, yani YHT ve Metro için DMI-04h (veya TI-2) ve TI-1 durumları için, acil frenlerin, yeteri kadar kısa zamanda devreye girmesi durumunda kaza oranını sınırlayabildiği gösterilmiştir. Olumsuz taraftan değerlendirilirse, acil frenlerin devreye girme sürelerinin biraz artması sıfırdan kaza olasılıklarını doğurmaktadır. Oldukça geç kalan acil frenleme durumlarında ise kaza oranları çok yüksek seviyelere ulaşmaktadır.

TI-1 hatasında hem Metro hem de YHT için DMI-04h (veya TI-2) hatasına kıyasla daha düşük kaza oranları gözlenmiştir. Bu durum, TI-1 hatasının engele henüz çok yaklaşmamışken meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum acil fren gecikmelerine karşı, sistemi daha toleranslı hale getirmektedir. Acil frenler gecikse bile, kaza olasılıkları çok düşük kalabilmektedir. Bu sebeple, DMI-04 veya TI-2 gibi fren başladıktan sonra meydana gelen hataların daha tehlikeli olduğu düşünülebilir.

Diğer bir değerlendirme ise DMI-04h (veya TI-2) hatasında, Metroya kıyasla, Yüksek Hızlı Trende kaza oranının daha yüksek olmasıdır. Bu durumun sebebi ise, frenleme mesafesi ve yüksek hız dengesinden kaynaklanmaktadır. Daha uzun fren başlama mesafesine rağmen, yüksek hızlı trenin hızının çok daha yüksek olması, hata durumunda frenin daha yüksek hızlarda ortadan kalkmasına ve trenin engele daha büyük hızlarla yaklaşmasına sebep olmaktadır. Bu durumda, acil frenlemelerdeki gecikmeler, trenin acil fren devreye girene kadar daha uzun mesafeler almasına yol açmakta ve kaza oranını arttırmaktadır. Ayrıca, Yüksek Hızlı Trenin eylemsizlik değerinin veya Metroya kıyasla acil frenleme ivmesinin daha küçük olmasının bu sonucun oluşmasında etkisi olmaktadır.

Simülasyon sonuçlarının diğer önemli bir boyutu ise ATO-Emergency-1 freni ile ATP-Emergency-3 frenin karşılaştırılmasıdır. ATO-Emergency-1 freninin gecikme yapmadan devreye girerek sisteme müdahale etmesinin, ATP-Emergency-3 frenine göre daha büyük önem taşıdığı görülmektedir. Örnek olarak, Yüksek Hızlı Tren DMI-04h hatası için, ATO-Emergency-1 frenin 2 sn ve ATP-Emergency-3 freninin 16 sn içinde devreye girmesi durumunda kaza oranı %16'dır. Diğer taraftan, ATO-Emergency-1 frenin 16 sn ve ATP-Emergency-3 freninin 2 sn içinde devreye girmesi durumunda kaza oranı %50'dir. Bu durum sistem otomasyonunun arttığı günümüzde, birinci acil frenin erken devreye girmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Son olarak, frenlerin erken devreye girdiği pek çok saniye çifti için (ATO-Emergency-1 freni 2 sn ve ATP-Emergency-3 freninin 4 sn gibi) hem Metro hem Yüksek Hızlı Tren için yapılan simülasyonlarda kaza gözlenmemiştir. Bu gözlem şu önemli noktayı ortaya çıkarmaktadır: trende fonksiyonel emniyet açısından yeterli yazılımsal ve donanımsal yapılar mevcut ise kazalar engellenebilir. Kazaların engellenebilmesi için trenin yazılımsal ve donanımsal olarak mevcut olan en son sistem kullanılarak güncel tutulması güvenliğin sağlanması için oldukça önemlidir.

Sistemde meydana gelen hataların kazaya yol açmaması için iki yönlü bir çözüm vardır. Birinci çözüm makinist eğitimlerinin üst seviyeye çıkarılarak sistem güvenliğinin maksimize edilmesidir. İkinci çözüm ise kullanılan sistemlerin hassasiyetlerinin artırılarak, meydana gelebilecek hatada, sistemin hatayı erken fark ederek kendi kendine müdahale etmesidir. Raylı sistemlerde ATO - Otomatik Tren İşletimine izin veren araç üstü sistemlerin hassasiyeti artırılarak algılama hassasiyeti daha üst seviyelere çıkarılabilir. Örneğin araç üstünde yer alan Doppler radarının hassasiyeti artırılarak trenlerin takip mesafesinin düşürülmesi sağlanabilir ve tren yolunun kapasitesi artırılabilir [16]. Yine Doppler radarına ek olarak araç takometresinden hız verilerine göre trenin mevcut hızının tahmininin doğruluğu üst seviyelere çıkarılabilir. Son dönemlerde yapılan çalışmalarda araç üstü sistemlerde birçok sistemin birleşiminden doğan verilerin filtrelenerek birleştirilmesi veri doğruluğunu artırmaktadır. Bu yüzden trenlerde Lidar kullanımı ve görüntü işleme tekniklerinden yararlanmak amacıyla kameralar bulunmaktadır. Ayrıca bu sistemlere ek olarak ataletsel eylem ünitesi ve sensör füzyonu teknolojilerinden yararlanılmaktadır.

Bu çalışma bu noktada, raylı sistemlerde uçaklarda kullanılan radar teknolojisine benzer bir teknolojinin kullanımı bu alanda denenmesini tavsiye etmektedir. Pesa ve Aesa radar teknolojisine dayanan ve sensör füzyonu ile birlikte ataletsel eylem ünitesi içeren bu sistemin raylı sistemlere özel, maliyet etkin bir uyarlanması düşünülebilir. Lidar teknolojisinin, bu sistemle entegrasyonlu bir şekilde çalışması sistemin hassasiyetine katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, kazaların neredeyse sıfırlandığı tam güvenli raylı sistemler oluşturulması mümkündür ve bu durum ileri düzey fonksiyonel emniyet tasarımlarıyla sağlanabilir. Mevcut sistemlerin akıllı ulaşımaya uyumlandırılması gerekmektedir [17]. Gelecek çalışmalar, farklı simülasyonlarla raylı sistemlerde ileri düzey fonksiyonel emniyet tasarımlarının faydalarını farklı açılardan göstereceklerdir.

Tezekkür

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 22LÖT195

Kaynakça

- [1] S. Vlasenko, E. Anders, J. Arndt, T. Berndt, and J. Braband, *Railway signalling and interlocking International compendium*. Leverkusen: PMC Media House GmbH, 2020.
- [2] L. L. Presti and S. & Sabina, *GNSS for Rail Transportation*. Switzerland: Springer, 2018.
- [3] UNISIG, *Functional Safety Analysis of ETCS DMI for ETCS Auxiliary Hazard-SUBSET-118*, 2021.
- [4] A. Joanni, Q. Mahboob, and E. Zio, "Basic Methods for RAM Analysis and Decision Making," *Handbook of RAMS in Railway Systems*. CRC Press, 2018, pp. 13-38.
- [5] A. Joanni, Q. Mahboob, and E. Zio, "Advanced Methods for RAM Analysis and Decision Making," *Handbook of RAMS in Railway Systems*. CRC Press, 2018, pp. 39-62.
- [6] Q. Mahboob and E. Zio, *Handbook of RAMS in railway systems: theory and practice*. CRC Press, 2018.
- [7] M. Nalçakan and S. Uluskan, "Structural equation modeling of macro factors of railway accidents: a worldwide analysis," *International Journal of Transport Economics*, vol. 48, no. 2, pp. 251-273, 2021.

- [8] M. S. Durmuş, U. Yıldırım, and M. T. Söylemez, "Demiryolu Sinyalizasyon Tasarımında Fonksiyonel Güvenlik ve Ayrık Olay Sistem Yaklaşımı," *Elektrikli Ulaşım Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi - EUSİS*, 2011.
- [9] IEEE Vehicular Technology Society, *IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*. New York: IEEE, 2004.
- [10] IEEE Vehicular Technology Society, *IEEE Guide for the Calculation of Braking Distances for Rail Transit Vehicles*. New York: IEEE, 2009.
- [11] European Railway Agency, *Braking curves simulation tool v4.2.xls.: European Railway Agency*, 2018.
- [12] UNISIG, *ETCS Application Level 2 - Safety Analysis Part 1 - Functional Fault Tree-SUBSET-088-2 Part 1*, 2019.
- [13] UNISIG, *ETCS Application Level 2 - Safety Analysis Part 2 - Functional Analysis-SUBSET-088-2 Part 2*, 2019.
- [14] UNISIG, *Safety Requirements for the Technical Interoperability of ETCS in Levels 1 & 2-SUBSET-091*, 2016.
- [15] The MathWorks Inc., MATLAB, Licence Number: 40994073, 2023.
- [16] S. Küçük, "ETCS (European Train Control System) Seviye 3," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 18, no. 2, pp. 6-12, 2018.
- [17] C. Özarpa , İ. Avcı ve B. F. Kınacı, "Akıllı Raylı Sistemlerde Kullanılan Alt Sistemlerin Kritik Seviye Analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 143-153, 2021.

Özgeçmiş



Seçkin ULUSKAN

Lisans eğitimini Boğaziçi Üniversitesi, yüksek lisans eğitimini The University of Texas at Dallas, doktora eğitimini Anadolu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Raylı Sistemler Elektrik Elektronik programında çalışmaktadır.

E-Posta: seckinuluskan@eskisehir.edu.tr



Ahmet Mert AKDAĞLI

Lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini Eskişehir Teknik Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Metro İstanbul firmasında Proje Mühendisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: ahmetmertakdagli@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Seçkin ULUSKAN: Yazma-gözden geçirme, düzenleme, doğrulama, tasarım. Ahmet Mert AKDAĞLI: Yazma, görselleştirme, tasarım.