

**RAYLI SİSTEMLERDE SİNYALİZASYON VE
FONKSİYONEL GÜVENLİK SİMÜLASYONU
VE TASARIMI**

Yüksek Lisans Tezi

Ahmet Mert Akdağlı

Eskişehir 2023

**RAYLI SİSTEMLERDE SİNYALİZASYON VE FONKSİYONEL GÜVENLİK
SİMÜLASYONU VE TASARIMI**

AHMET MERT AKDAĞLI

Yüksek Lisans Tezi

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Seçkin ULUSKAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Mayıs 2023

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 22LÖT195 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ahmet Mert AKDAĞLI'nın RAYLI SİSTEMLERDE SİNYALİZASYON VE FONKSİYONEL GÜVENLİK SİMÜLASYONU VE TASARIMI başlıklı çalışması 29/05/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Seçkin ULUSKAN

Üye

: Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet FİDAN

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

29/05/2023

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Ahmet Mert AKDAğLI, RAYLI SİSTEMLERDE SİNYALİZASYON VE FONKSİYONEL GÜVENLİK SİMÜLASYONU VE TASARIMI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Seçkin ULUSKAN

ÖZET

RAYLI SİSTEMLERDE SİNYALİZASYON VE FONKSİYONEL GÜVENLİK SİMÜLASYONU VE TASARIMI

Ahmet Mert AKDAĞLI

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mayıs 2023

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Seçkin ULUSKAN

Raylı sistemlerde günümüzde otonomlaşıma artarken, hata durumlarında sistemin kendi güvenliğini sağlayarak olumsuz durumu ortadan kaldırmasını sağlayacak fonksiyonel güvenlik tasarımlarının oluşturulması, güvenlik için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, raylı sistem sinyalizasyonunda fonksiyonel güvenlik 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 fren 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. Ardından, Matlab ortamında programlar yazılarak, simülasyonlar 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 sıfırlanabilmesi için, ileri düzey teknolojiye dayanan fonksiyonel güvenlik sistemlerinin gerekliliğine vurgu yapılmış ve yeni önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Raylı Sistemlerde Sinyalizasyon, Fonksiyonel Güvenlik, Fren Eğrileri, Hata Ağacı Analizi, Monte Carlo Simülasyonu

ABSTRACT

RAILWAY SYSTEMS SIGNALLING AND FUNCTIONAL SAFETY SIMULATION AND DESIGN

Ahmet Mert AKDAĞLI

Department of Rail Systems Engineering

Programme in RAIL SYSTEMS ENGINEERING

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, May 2023

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Seçkin ULUSKAN

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, brake curves have been produced 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 from the safety analysis document determined by the UNISIG consortium, and by adding emergency brake suggestions in case of failures. Then, simulations have been created by writing programs in Matlab software. The accident rates that may occur when failures occur randomly have been determined with the help of Monte Carlo Simulation, and the effect of the activation times of the emergency brakes on the probability of accident has been investigated. The obtained results were evaluated and discussed from various perspectives. As a result, the necessity of functional safety systems based on advanced technology has been emphasized and new suggestions have been made in order to completely remove the accidents.

Keywords: Signaling in Rail Systems, Functional Safety, Brake Curves, Fault Tree Analysis, Monte Carlo Simulation

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının oluşumunda emeği geçen başta tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Seçkin Uluskan olmak üzere Eskişehir Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Ahmet Mert AKDAĞLI



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ahmet Mert AKDAĞLI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GİRİŞ	14
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	16
3. RAYLI SİSTEM FREN EĞRİLERİ.....	19
3.1. Fren Eğrileri: Genel Denklemler ve Parametreler	19
3.2. Avrupa Demiryolları Ajansı Fren Eğrileri Simülasyon Yazılımı.....	23
3.2.1. Tren Parametreleri Arayüzü.....	24
3.2.2. Avrupa Demiryolları Ajansı Fren Eğrileri- Hat Arayüzü.....	25
3.2.3. Avrupa Demiryolları Ajansı Fren Eğrileri- Ulusal Değerler Arayüzü	26
3.2.4. Sabit Değerler Arayüzü	26
3.2.5. Fren Parametreleri Arayüzü	27
3.2.6. Tren Eğrileri Arayüzü	28
3.3. MATLAB simülasyonuna aktarılmak üzere yazılımın kullanılması.....	29
4. FRENLEME, ARIZALANMA VE KAZA ÖNLEME SİMÜLASYONLARI	31

4.1. Hata Ağacı Analizi	31
4.2. MATLAB Ortamında Frenleme ve Kaza Simülasyonları	34
4.3. Monte Carlo Simülasyonları ile Kaza Oranları	40
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	46
KAYNAKÇA.....	49
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Metro DMI-04h hatasına ait simülasyonların fren devreye girme süresine bağlı olarak simülasyon sonuçları.....	41
Tablo 4.2. Metro TI-1 hatasına ait simülasyonların fren devreye girme süresine bağlı olarak simülasyon sonuçları.....	42
Tablo 4.3. Yüksek hızlı trene DMI-04h hatasına ait simülasyonların fren devreye girme süresine bağlı olarak simülasyon sonuçları	43
Tablo 4.4. Yüksek hızlı trene TI-1 hatasına ait simülasyonların fren devreye girme süresine bağlı olarak simülasyon sonuçları	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Tren Frenleme Eğrisi- Temel hız zaman grafiği	21
Şekil 3.2. Tren Frenleme Eğrisi- E, F ve G parametrelerinin 0 olmadığı durum	21
Şekil 3.3. Tren Frenleme Eğrisi- Kaçış ivmeli durum.....	22
Şekil 3.4. Trenin başlangıç pozisyonundaki konumu	23
Şekil 3.5. Trenin durduğu andaki konumu	23
Şekil 3.6. Tren parametrelerini gösteren arayüz (Tren tipi, fren pozisyonu, tren uzunluğu vb.)	25
Şekil 3.7. Hat Parametrelerini (ETCS seviyelerine göre Hız, eğim adezyon faktörü) gösteren arayüz	26
Şekil 3.8. Frenleme çeşitlerinin kombinasyonlarına göre ivmelenme parametrelerini içeren arayüz.....	28
Şekil 3.9. Yüksek hızlı trene ait fren eğrilerini içeren arayüz	30
Şekil 3.10. Metroya ait fren eğrilerini içeren arayüz	30
Şekil 4.1. Trenin engele çarpmasıyla sonuçlanabilecek temel hata ağacı	32
Şekil 4.2. Engele çarpmanın önüne geçebilmek için önerilen sistem iyileştirilmesini de içeren hata ağacı	33
Şekil 4.3. DMI-04h hatası durumunda ATO-Emergency-1'in devreye girmesi.....	33
Şekil 4.4. TI-2 hatası gelişmesi ve ATO-Emergency-1 devre dışı kalması durumunda ATP-Emergency-3'ün devreye girmesi.....	34
Şekil 4.5. Normal Durum Frenleme Senaryosuna Ait Akış Diyagramı	35
Şekil 4.6. Hatalar Meydana Geldiğinde Akış Diyagramı	36
Şekil 4.7. Hatalara Karşı Önerilen Sistemin Akış Diyagramı	37
Şekil 4.8. Yüksek hızlı trene ait trenin yaklaşırken Matlab görüntüsü.....	38
Şekil 4.9. Yüksek hızlı trene ait trenin normal seyir halindeyken Matlab görüntüsü	38
Şekil 4.10. Yüksek hızlı trene ait DMI-04h hatası meydana geldiğinde önerilen sistem tarafından trenin acil frenle 3sn sonra durdurulduğu Matlab görüntüsü.....	39
Şekil 4.11. Yüksek hızlı trene ait DMI-04h hatası meydana geldiğinde önerilen sistem tarafından trenin acil frenle 10sn sonra durdurulduğu Matlab görüntüsü.....	39

- Şekil 4.12.** Metroya ait DMI-04h hatası meydana geldiğinde önerilen sistem tarafından trenin acil frenle 3sn sonra durdurulduğu Matlab görüntüsü..... 40
- Şekil 4.13.** Metroya ait DMI-04h hatası meydana geldiğinde önerilen sistem tarafından trenin acil frenle 10sn sonra durdurulduğu Matlab görüntüsü..... 40



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AESA	: Active Electronically Scanned Array (Aktif Faz Dizinli Radar)
ATP	: Automatic Train Protection (Otomatik Tren Koruma)
ATO	: Automatic Train Operation (Otomatik Tren İşletimi)
CBTC	: Communication Based Train Control Systems (Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistemleri)
DMI	: Driver Machine Interface (Sürücü Makine Arayüzü)
ETCS	: European Train Control System (Avrupa Tren Kontrol Sistemi)
FMEA	: Failure Mode and Effect Analysis (Hata Modları ve Etkileri Analizi)
FTA	: Fault Tree Analysis (Hata Ağacı Analizi)
GoA	: Grade of Automation (Otomasyon Derecesi)
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
GSM	: Global System for Mobile Communications (Mobil İletişim İçin Küresel Sistem)
LIDAR	: Laser Imaging Detecetion and Ranging (Işın Algılama ve Mesafe Ölçme)
LTE	: Long Term Evolution (Uzun Vadeli Evrim)
MMI	: Man Machine Interface (İnsan Makine Arayüzü)
PESA	: Positive Electronically Scanned Array (Pasif Faz Dizinli Radar)
RAMS	: Reliability, Availability, Maitainability, Safety (Güvenilirlik,Emre Amadelik(Kullanabilirlik),Sürdürülebilirlik,Emniyet)

1. GİRİŞ

Demiryolları şehir içinde ve şehirler arasında yolcu ve yük taşımalarının kesintisiz sağlanması açısından büyük bir öneme sahiptir. Geçmiş yüzyıllarda, demiryolu araçlarının rayın üstünde düşük kuvvetlerle yürütülebileceği anlaşılmaması devletlerin bu alanda yatırımlarını arttırmasını sağlamıştır. Demiryolları en başta yük taşımacılığında kullanılsa da ilerleyen yıllarda yolcu taşımacılığı da bu kapsama eklenmiştir.

Demiryollarında yük ve yolcu taşımacılığının artmasıyla güvenli bir işletimin sağlanması amacıyla 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 (Vlasenko, Anders, Arndt, Berndt, & Braband, 2020). Bu haberleşme sistemleri yardımıyla takometreye bağlı sensör, GPS ve Galileo uydu sistemleri kullanılarak, konum doğrulama işlemi yapılabilmektedir (Presti & Sabina, 2018). Bu sistemlerden gelen verilerin sensör füzyonu ile çeşitli filtrelerden geçirilerek beraber değerlendirilmesi ile konum doğruluğu artırılmaktadır.

Demiryollarında güvenli bir işletimin sağlanabilmesi için tasarım aşamasında çeşitli normlar, kurallar ve standartlar kullanılmaktadır. Bu standartlarda Almanya ve Avrupa Birliği ülkeleri başta gelmektedir. Kullanılan standartlarla beraber, sistem güvenliğinin daha tasarım aşamasındayken maksimize edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu standartların yanında fonksiyonel güvenlik kavramının günümüzde önem kazanmasıyla bu alanda yapılan çalışmaların sayısı artmıştır. Fonksiyonel güvenlik, sistemlerin hata durumları, 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. Bu çalışmalarda çeşitli simülasyon programları ve analiz metotları yardımıyla hatanın ve hatanın sebep olduğu nedenlerin tespiti mümkün hale gelmiş ve önceden önlenbilmesine yönelik tedbirler alınması sağlanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, Avrupa Demiryolları Ajansının Frenleme eğrileri simülasyonu yardımıyla Metro ve Yüksek Hızlı Tren için fren eğrileri üretilmiştir. Daha sonra, UNISIG konsorsiyumun belirlediği emniyet usulleri ve emniyet analizi dokümanlara bakılarak frenleme öncesinde ve sonrasında meydana gelebilecek hatalar

belirlenerek örnek bir hata ağacı analizi oluşturulmuştur. Bu hatalar gerçekleştiğinde trenin engele çarpmasını önleyecek sistem önerileri ileri sürülmüştür. Ardından, bir engel önünde durmak üzere fren yapan ya da yapması gereken trenler için bir Matlab simülasyonu oluşturulmuştur. Matlab ortamında, hata anında meydana gelebilecek kaza oranları Monte Carlo Simülasyonu yardımıyla incelenerek, acil frenlerin devre girme sürelerinin kaza olasılığı azaltma üzerindeki etkisi araştırılmıştır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu ünite de raylı sistemlerde sinyalizasyon ve fonksiyonel güvenlik konularında daha önceden yapılmış olan çalışmalara yönelik literatür sunulmaktadır. Ulusal ve uluslararası literatür incelediğinde, dünya genelinde insan faktörü, raylı sistem altyapısındaki yetersizlikler, bakım ve onarım eksiklikleri gibi nedenlerden dolayı raylı sistemlerde kazalar meydana geldiği ve gelişen önlemlere veya teknolojiye rağmen bu kaza durumlarının devam ettiği görülmektedir. Bu kazaların önlenmesi konusu düşünüldüğünde, ülkeler genelinde araştırma geliştirme faaliyetlerine ayrılan bütçe arttığında kaza olma olasılığı düştüğü belirtilmektedir (Nalçakan & Uluskan, 2021).

Hataların azaltılması ve olumsuz etkisinin düşürülmesine yönelik önemli kavramlardan birisi fonksiyonel güvenliktir. Fonksiyonel güvenlik kavramında asıl amaç, sistemlerin hata durumunda meydana gelen hatanın, diğer sistemlere minimum zarar verecek şekilde güvenli olarak atlatılmasıdır. Fonksiyonel güvenlik kavramının raylı sistemlerde önemi büyüktür. Bu sebeple, raylı sistemlerde çeşitli uluslararası fonksiyonel güvenlik analizleri ve standartları bulunmaktadır (UNISIG, Functional Safety Analysis of ETCS DMI for ETCS Auxiliary Hazard-SUBSET-118, 2021).

Fonksiyonel güvenlik analizi yöntemlerinin demiryollarına özelleşmiş olanlarından sistemlerden 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 (Joanni, Mahboob, & Zio, Basic Methods for RAM Analysis and Decision Making, 2018). Demiryollarında güvenliğin sağlanabilmesi için gelişmiş yöntemler ise Markov Modelleri, Monte Carlo Simülasyonu, Petri Ağları, Bayes Ağları ve Etki Diyagramları ve Bulanık mantık olarak sıralanmaktadır (Joanni, Mahboob, & Zio, Advanced Methods for RAM Analysis and Decision Making, 2018).

Yukarıda bahsedilen yöntemlerden, demiryollarında farklı sistemler arasındaki sorunların kaynağının tespit edilebilmesi amacıyla kullanılan en önemli yöntemlerden birisi hata ağacı analizidir. Hata ağacı analizi, farklı sistemler arasında kaynaklanan kök sebeplerin modellenmesi için analiz fırsatı sunmaktadır. Bu analiz yönteminde farklı sebeplerden kaynaklanan kazaların meydana gelmesine sebep olacak senaryolar kolaylıkla modellenebilmektedir.

Demiryolu sinyalizasyonu ve fonksiyonel güvenlik sistemleri düşünüldüğünde son dönemde meydana gelen kazaların oranları gözle görülür seviyede azalmıştır. Fakat, mevcut sistemlerin kullanım süresi için öngörülen sürenin dolmaması sebebiyle eskiyen

sistemlerin yerine yeni sistemler kurulamaması sebebiyle demiryollarında çeşitli kazalar meydana gelmektedir (Mahboob ve Zico, 2018). Demiryolu sinyalizasyonu ve fonksiyonel güvenlikte teknolojinin gelişmesiyle birlikte alanlar arası geçişkenliğin artmasıyla beraber sinyalizasyon ve fonksiyonel güvenlik yöntemleri gelişim göstermiştir. Fakat, sistemlerde yalnızca şu ana kadar meydana gelen arızalardan elde edilen tecrübelerle sistem tasarımı yapılmaktadır. Diğer bir deyişle gelecek kazaları öngörmek için yalnızca geçmiş verilere dayanılmaktadır (Mahboob & Zio, 2018).

Çeşitli makine öğrenimi ve bilgisayar tabanlı simülasyon yöntemleriyle, gelecek kazaların öngörülebilmesi gerçekleştirilebilir. Bu sebeple Matlab ortamında veya diğer platformlarda oluşturulan simülasyon senaryoları yardımıyla mevcut kazaların simülasyonları önemli hale gelmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada, Matlab simülasyonları ile, hata anında kazanın meydana gelip gelmemesi durumu ele alınarak, yukarıda bahsedildiği üzere, gelecek olayların tahminlemesi üzerine durulmuştur.

Raylı sistemlerde sinyalizasyon ve fonksiyonel güvenlik simülasyonu ve tasarımı konusunda yapılan çalışmalar açısından ulusal literatür de incelenmiş, birkaç çalışma haricinde (Durmuş, Yıldırım, & Söylemez, 2011), sinyalizasyon fonksiyonel güvenlik konularında yeterince akademik çalışmanın yapılmadığı görülmüştür. Sonuç olarak, bu alanda yapılacak çalışmalarla literatüre katkı sunmanın yararlı olacağı tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışma alanı olarak raylı sistemlerde sinyalizasyon ve fonksiyonel güvenlik simülasyonu ve simülasyon tasarımı seçilmesinin uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

İnsanlı sistemlerde meydana gelen hatalardan dolayı insansız sistemlerin kullanımı demiryollarında yaygınlaşmaktadır. Bu sistemlerin yaygınlaşması ve tüm özelliklerin otonom olarak sistem tarafından yapılmasıyla sistemlerde meydana gelecek hataların azaltılması amaçlanmaktadır. Örneğin, metrolarda kullanılan sistemlerin otomasyon derecesinin gün geçtikçe arttığı gözlenmektedir. Metrolarda otonom seviyeleri zamanla gelişerek tam otonom hale gelmiştir. Tam otonom bir Metro için otomasyon seviyesi 4 olarak tanımlanır. Metrolarda kullanılan sistemlere paralel olarak konvansiyonel hatlarda kullanılan demiryolu araçlarının otonom bir hale getirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Vlasenko, Anders, Arndt, Berndt, & Braband, 2020).

Yukarıda belirtilen kapsamda Avrupa Tren Kontrol Sistemi geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüzde seviye 3 olarak tarif ettiğimiz Avrupa Tren Kontrol Sistemi tam otonom demiryolu araçlarının yolunu açmaktadır. Bu noktada, sistemlerin fonksiyonel

güvenliği ön plana çıkmaktadır. Bu güvenliğin ölçülebilmesi için çeşitli parametreler tanılanmıştır ve sistemin bu parametrelere uygun tasarlanması gerekmektedir.

Otomatik Tren İşletimi (ATO) ve Otomatik Tren Koruması (ATP), güvenlik sistemlerinin ana yapı taşlarını oluşturmaktadır. Otomatik Tren İşletimi (ATO) trenlerin otonom sürüş modunu içeren sistemleri içerir. Ayrıca enerji optimizasyonu gibi verimli sürüş algoritmaları sistemin bu kısmında yer almaktadır. ATO, ATP'nin izin verdiği ölçüde yetki barındırır. Bu kapsamda tam otonom sürüş modunda ATO sistemine daha çok yetki verildiğinde güvenlik seviyesinin artırılması zorunlu hale gelecektir. Sonuç olarak bu çalışmada, iyileştirmesi önerisi ATO ve ATP sistemlerine entegre olacak şekilde önerilmiştir.



3. RAYLI SİSTEM FREN EĞRİLERİ

Bu ünite, bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonların temelini oluşturan tren frenleme eğrileri konusu ele alınacaktır. Öncelikle, fren eğrilerinin genel matematiksel denklemleri sunulacak ve daha sonra Avrupa Demiryolu Ajansının fren eğrisi oluşturma dokümanı tanıtılacaktır. Bu dokümanda yer alan parametrelerin ve değişkenlerin anlamları kısaca tanıtılacaktır. Bunlara bağlı olarak son bölümde, simülasyonlarda kullanılacak olan frenleme eğrilerinin nasıl elde edildiği anlatılacaktır.

Tren frenleme eğrileri konusu için en son geliştirilen haberleşme temelli tren sinyalizasyon sistemindeki hız profillerinin belirlendiği IEEE 1474-1 (IEEE Vehicular Technology Society, 2004) ve IEEE 1698 (IEEE Vehicular Technology Society, 2009) standartları ve Avrupa Demiryolları Ajansı Fren Eğrileri kaynak olarak alınacaktır. Standartlardaki tren frenleme eğrisi içinde güvenli bir sürüş için bir kurallar örgüsü oluşturulması amaç edinilmiştir.

3.1. Fren Eğrileri: Genel Denklemler ve Parametreler

Bu bölümde tren frenleme eğrileri ve genel denklemleri aktarılacaktır. Tren frenleme eğrileri temel olarak, bir trenin frenleme karakteristiğini hız-konum grafikleri aracılığıyla gösteren grafiklerdir. Frenleme esnasında, alınan yola etki eden farklı parametreler vardır. Bunlar eğim, viraj (kurp), başlangıç pozisyonu gibi parametrelerdir. Örneğin, yukarı eğim treni durdurmak için minimum tren mesafesini azaltabileceği gibi aşağı eğim tam aksine bu mesafeyi artırır.

Frenleme anında tren için alınan yol denklemi, zamana bağlı olarak şu şekilde ifade edilir:

$$D_f = D_i + v_i t + \frac{1}{2}(a \cdot t^2) \quad (3.1)$$

Burada, D_f trenin metre cinsinden son konumu, D_i başlangıç konumunu, v_i başlangıç hızını, t geçen zamanı, a trenin 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:

$$D_f = K_1 \frac{v_i^2}{2a} \quad (3.2)$$

Burada fren mesafesi metre, hız $km/saat$, ivme m/s^2 olarak alınırsa, K_1 değeri 0,7716 olmaktadır (IEEE Vehicular Technology Society, 2009). Eğer tren yolunda, eğim

bulunuyorsa, eğimin etkisi ile frenleme mesafesi şu şekilde yazılır (IEEE Vehicular Technology Society, 2009):

$$D_f = 0,0386 \frac{v_i^2}{0,0894 G + a} \quad (3.3)$$

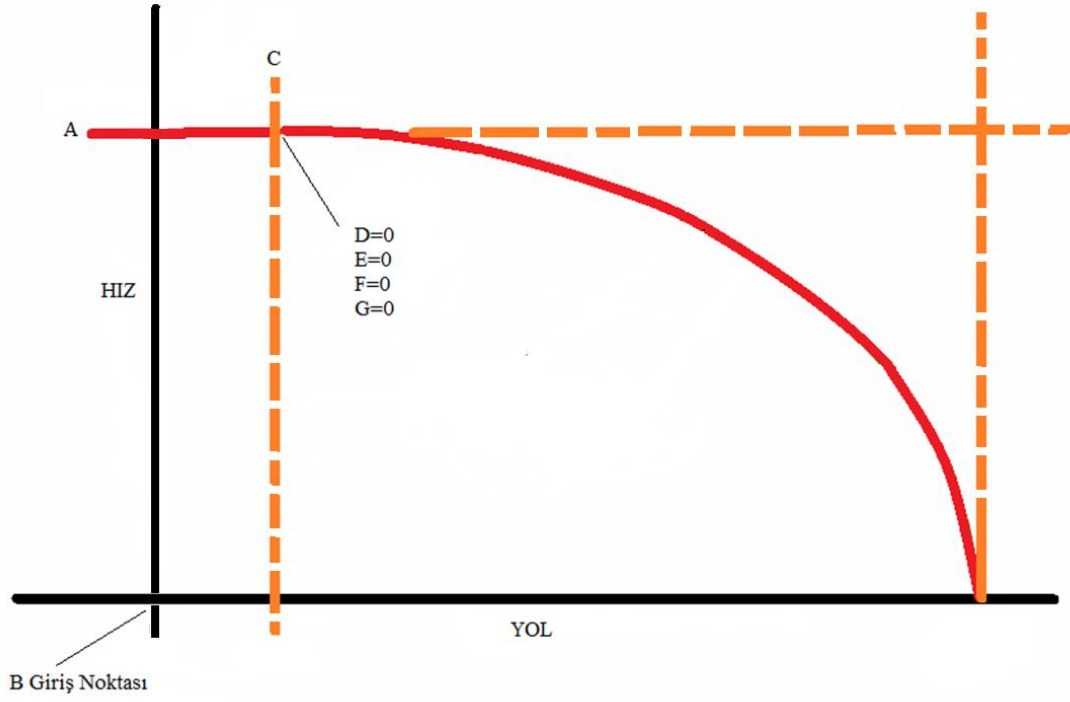
Eğer tren yolunda, viraj bulunuyorsa, viraj etkisi ile frenleme mesafesi şu şekilde yazılır (IEEE Vehicular Technology Society, 2009):

$$D_f = 0,0386 \frac{v_i^2}{\left(\frac{6,245}{R}\right) + a} \quad (3.4)$$

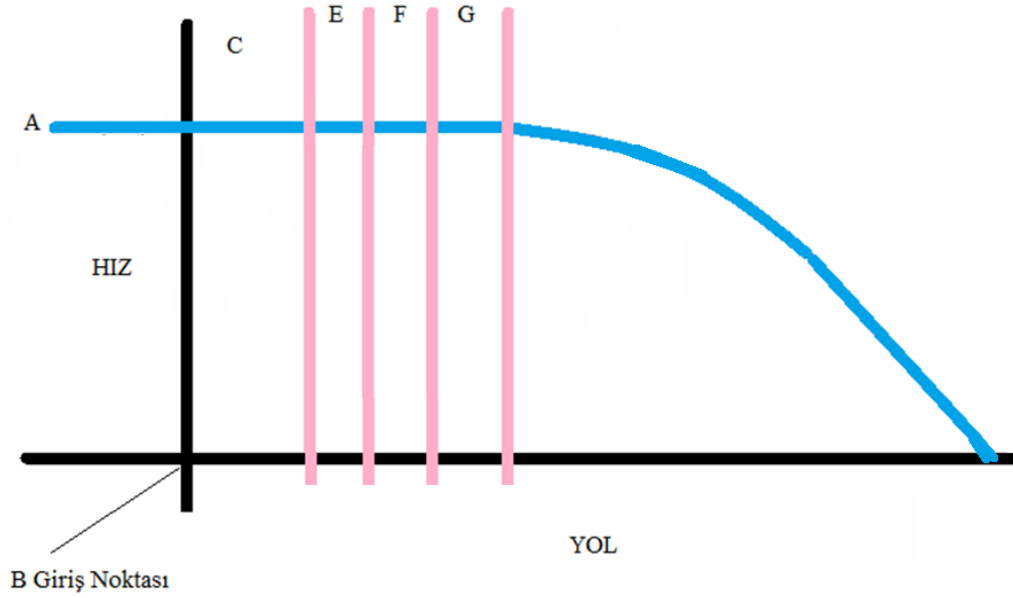
Yukarıda gösterilen denklemlerde G sembolü eğimi (yüzde) ve R kurp yarıçapını (m) ifade etmektedir. Yine, tren direnci olarak tanımlanan etki fren mesafesine etki etmektedir.

Frenleme eğrilerinin denklemleri genel olarak tanıtılmasının ardından, bu eğrilerin tanımlanmasında kullanılan parametrelerden söz edilebilir. Tren frenleme eğrisi aşağıdaki terimler aracılığıyla tanımlanmaktadır (IEEE Vehicular Technology Society, 2009):

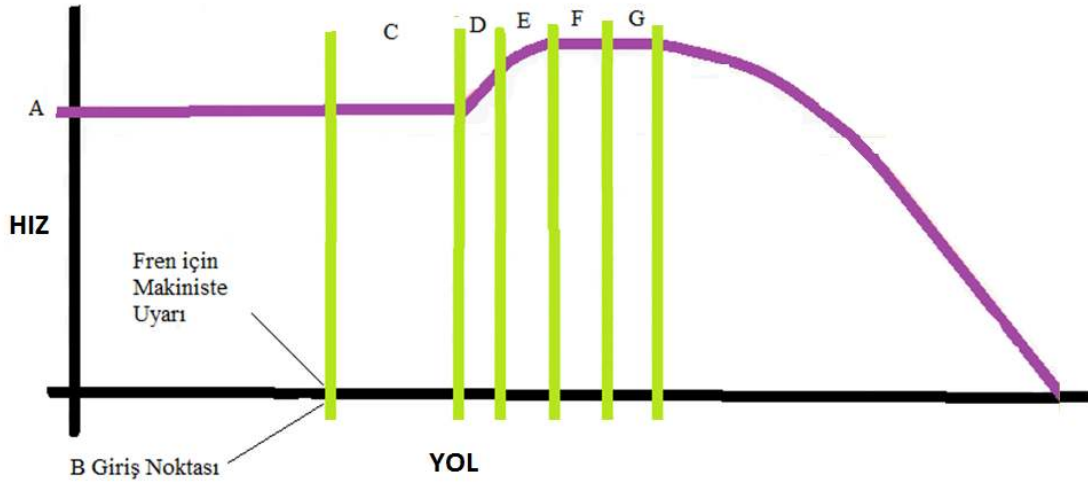
- A. Maksimum giriş hızı: Trenin frenleme modeline girdiği andaki en yüksek hızıdır.
- B. Giriş noktası: Giriş noktası, ölçülen fren mesafesinin başlangıcıdır ve fren mesafesinin başlangıcın tanımlamasıyla sabitlenir.
- C. Tepki süresi boyunca kat edilen mesafe: Ekipman ve operatörün yavaşlama için harekete geçtiği an boyunca kat edilen mesafedir.
- D. Kaçış ivmesi: Sistem arızasından dolayı, özellikle yakıtlı motorların birdenbire hızlanmasıdır.
- E. Hızlanmanın (İtkinin) kaybolması: Hızlanma durumunun kaybolmasıdır. Bu, çoğu zaman ayrıntı bir fren mesafesi parametresidir. Bu nedenle sıfır olarak kabul edilir.
- F. Kayıp zaman: Frenleme başlamadan önce çeşitli sebeplerle kaybedilen sürede alınan mesafedir.
- G. Fren oluşumu: Fren oluşumu, frenlemeyi oluşturmak için geçen süre içerisinde alınan yoldur. İçinde basit modeller, minimum fren oranı veya fren oranı faktörleriyle birleştirilebilir.



Şekil 3.1. Tren Frenleme Eğrisi- Temel hız zaman grafiği



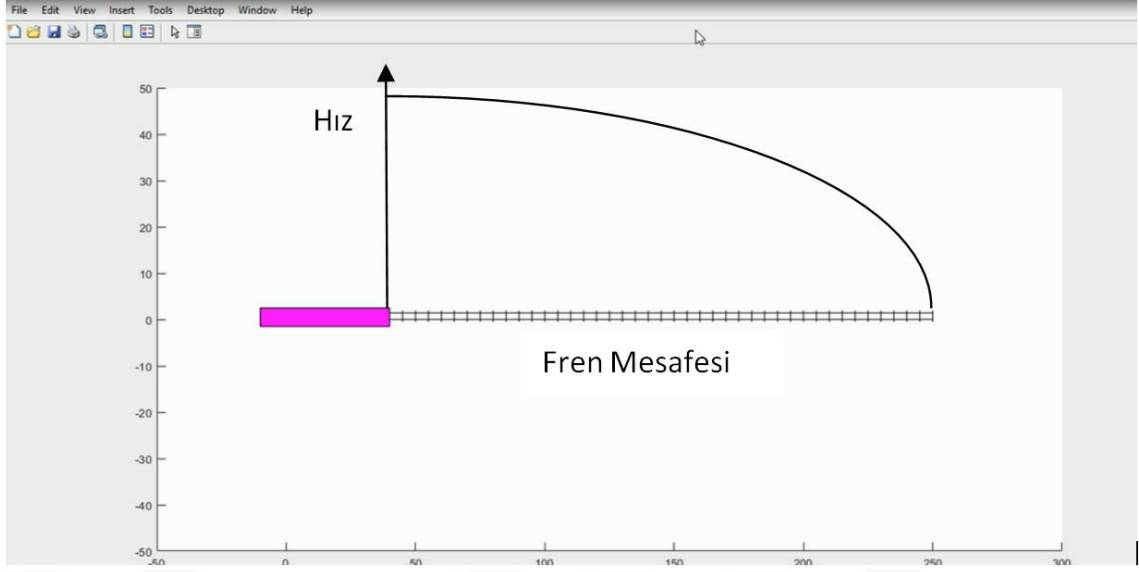
Şekil 3.2. Tren Frenleme Eğrisi- E, F ve G parametrelerinin 0 olmadığı durum



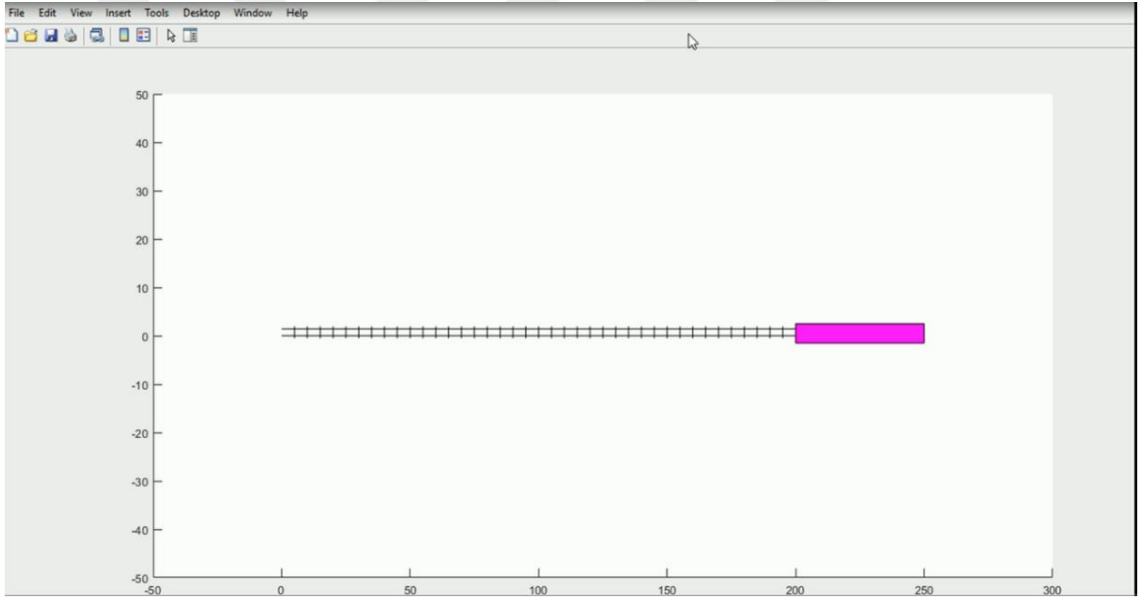
Şekil 3.3. Tren Frenleme Eğrisi- Kaçış ivmeli durum

Şekil 3.1'de tren frenleme eğrisinin en temel halini sunulmuştur. Şekil 3.2'te E, F ve G parametrelerinin 0 olmadığı durum gösterilmiştir. Şekil 3.3'te kaçış ivmesi dediğimiz parametrenin grafik üzerinde etkisi gösterilmektedir. Kaçış ivmesi, tren hızında ani bir artış meydana getirmiş bu sayede trenin fren mesafesi artış göstermiştir.

Bu tezde oluşturulacak simülasyonun görsel örneği, Şekil 3.4 ve 3.5'te sunulmuştur. Şekil 3.4'te trenin baştaki konumu ve fren eğrisi verilmiştir. Böylelikle, trenin hangi mesafede duracağı simülasyonda görülebilecektir. Şekil 3.5'te trenin son konumu gösterilmiştir. Kazaya sebep verebilecek çeşitli senaryolar, rassal süreç olarak modellenerek, belirlenen hızda trenin yüzde kaç oranda kaza yapacağı Monte Carlo simülasyonları ile belirlenecektir. Böylelikle kaza oranını minimuma ulaşması için çeşitli yorumlar sunulacaktır.



Şekil 3.4. Trenin başlangıç pozisyonundaki konumu



Şekil 3.5. Trenin durduğu andaki konumu

3.2. Avrupa Demiryolları Ajansı Fren Eğrileri Simülasyon Yazılımı

Avrupa Demiryolları Ajansı (ERA) fren eğrilerini modellemek amacıyla demiryolu araçlarına etki eden parametrelerin girilebildiği Excel formatında bir yazılım (European Railway Agency, 2018) geliştirilerek hattaki frenleme eğrilerini gerçektekine uygun bir biçimde modellemeyi amaçlamıştır (European Railway Agency, 2018). Bahsedilen bu yazılım, bu tezde simülasyonlarda fren eğrilerinin oluşturabilmesi için gerekli olan verilerin elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu sebeple, bu bölümde bu yazılım ve bu tezde bu yazılımın nasıl kullanıldığı anlatılacaktır.

3.2.1. Tren Parametreleri Arayüzü

Avrupa Demiryolları Ajansının (ERA) fren eğrilerini modellemek amacıyla oluşturduğu Excel dokümanında, tren parametrelerinin girilebilmesi için, Şekil.3.6'da gösterildiği gibi, çalışma sayfası formunda arayüz bulunmaktadır. Bu arayüzde, ayarlanabilir tren parametreleri şu şekildedir:

- Tren türü (Train Type)
- Fren Konumu (Brake Position)
- Cer Modeli (Traction Model)
- Servis Freni Arayüzü (Service Brake Interface)
- Cer Devreye Alma-Kapatma arayüzü (Traction Cut Off Interface)
- Tekerlek/ray adezyonundan(yapışmasından) bağımsız özel/ek frenlerin etkinliği
(Special/additional brakes independent from wheel/rail adhesion)
- Hız Hatası (Speed Inaccuracy)
- Konum hatası (Position Inaccuracy)
- Tren uzunluğu (Train Length)
- Nominal Dönen Kütle (Nominal Rotating mass)
- Anten Uzaklığı (Distance Antenna): Trenin önünde yer alan antenin balizi okumak için trenin önünden olan uzaklığıdır
- Trenin İvmelenmesi (Acceleration)

Train type	☒ Gamma train ☐ Lambda train	
Brake position	☒ Passenger train in P ☐ Freight train in P ☐ Freight train in G	
Traction model: T_traction_cut_off (seconds)	2	
Service brake interface ?	☐ No ☒ Yes	
Traction cut off interface ?	☒ No ☐ Yes	
Special/additional brake independent from wheel/track adhesion?	☒ No ☐ Yes	
Speed inaccuracy (%)		☐ Fixed (Enter ☒ Subset-041
Position inaccuracy (m + %)	5 5	☐ Abs. value + ☒ Rel. value Subset-041
Train length (m)	20	
Nominal rotating mass (%)	10	☒ Fixed (Enter value) ☐ Unknown
Distance antenna - train front (m)	7,81	
Acceleration (m/s ²)	0	

Şekil 3.6. Tren parametrelerini gösteren arayüz (Tren tipi, fren pozisyonu, tren uzunluğu vb.)

Yukarıda belirtilen parametreler, kullanıcı tarafından bu sayfada girilebilmekte, girilen parametre değerlerine uygun fren eğrileri oluşturulabilmektedir.

3.2.2. Avrupa Demiryolları Ajansı Fren Eğrileri- Hat Arayüzü

Hat Arayüzü, hat parametrelerinin girilebilmesi için Şekil.3.7'de gösterildiği gibi, tasarlanmış arayüzdür. Tren hızı hat eğimleri, baliz uzaklıkları ve ETCS seviyesi dahil birçok parametre girilerek tren hattı modellenebilir. Bu sayfada yer alan parametrelerden ilki Hedef Tipi (Target Type)'dir. İkinci parametre, Hedef Hız (Target Speed), trenin ulaşması gereken hedef konuma ulaşmadan önce gelmesi gereken hızını ifade eder. Diğer parametreler, Hat Uzunluğu (Dist origin-target), Başlangıç Hızı (Initial Speed), fren engelinin kalktığı başlangıç konumu (Start of brake inhibition) ve diğerleri şeklinde sıralanabilir. Diğer sütunlarda ise balizlerin başlangıçtan itibaren konumları (relocation balises distance from origin) ve hat boyunca bulunan eğimlerin yazılabildiği Eğim Profili (Gradient Profile) gibi hattın tamamına yönelik girilebilen değerler yer almaktadır.

Target type	☐ LOA/MRSP ☒ EOA/SvL	Distance EOA/SvL	0	Relocation balises Distance from origin (m)	Location accuracy (m)	Gradient profile	
Target speed (km/h)	0	Release speed (km/h)		0	0	d (m)	Gradient G (%)
Dist. origin/target (m)	20000	☐ Fixed ☒ Calc on-board	☐ L1 ☐ L2/3	1500	0	0	0
Initial speed (km/h)	300	Recalculate the track values		3000	0	2000	0
Track condition brake inhibition profile				4500	0	2000	-5
Start of brake inhibition (m)				6000	0	4000	-5
End of brake inhibition (m)				7500	0	4000	10
Reduced adhesion profile				9000	0	5000	10
Start of reduced adhesion (m)				10500	0	5000	20
End of reduced adhesion (m)				12000	0	12500	20
				13500	0	12500	-5
				15000	0	20000	-5
				16500	0		

Şekil 3.7. Hat Parametrelerini (ETCS seviyelerine göre Hız, eğim adezyon faktörü) gösteren arayüz

3.2.3. Avrupa Demiryolları Ajansı Fren Eğrileri- Ulusal Değerler Arayüzü

Bu kısımda, ülkelerin kendi demiryollarına ait parametrelerin girildiği kısım yer alır. Servis frenini hedef hızı kullanıp kullanmamaya, yönlendirme eğrisi kullanıp kullanmamaya, hız ölçüm hatasının doğrulanmasına izin verip vermeyeceğine karar verilebilir. Azaltılmış adezyon şartlarında maksimum yavaşlama, ray teker yapışması yani adezyon için ağırlık faktörü, kuru raylar üzerinde acil durum fren güvenilirlik seviyesini vb. değerlerin girilebileceği sayfadır.

3.2.4. Sabit Değerler Arayüzü

Sabit Değerler Arayüzü, Excel dokümanında sabit değerleri gösteren sayfadır. Bu sayfada izin verilen hız ile acil fren müdahalesi denetim limitleri arasındaki hız farkı, izin verilen hız ile acil fren müdahalesi denetim limitleri arasındaki hız farkı, izin verilen hız ile servis freni müdahale denetim limitleri arasındaki hız farkı, izin verilen hız ile servis freni müdahalesi denetim limitleri arasındaki hız farkı, izin verilen hız ve uyarı denetim limitleri arasındaki hız farkı gibi değerler yer almaktadır.

3.2.5. Fren Parametreleri Arayüzü

Fren Parametreleri Arayüzü, Şekil.3.8'de gösterildiği gibi, fren parametreleri ve fren çeşitlerine göre acil fren güvenilirlik değerlerinin gösterildiği arayüzdür. Bu sayfada yer alan değerlerin açıklamaları şu şekildedir:

- Geri kazanımlı Frenleme (Regenerative brake): Trendeki geri kazanımlı frenlemedir. Frenleme esnasında cer motoru jeneratöre dönüştürülür. Dönüşü zorlaştıracak elektromanyetik direnç oluşturur.

- Eddy Akım Freni (Eddy Current brake): Fren mıknatısları rayların üzerine alçaltılarak manyetik alan oluşturulur.

- Manyetik Ray Freni (Magnetic Shoe Brake): Manyetik ray freninde çelik parçalar raylar üzerine çekilir. Çelik parçayla raylar arasında sürtünme olur.

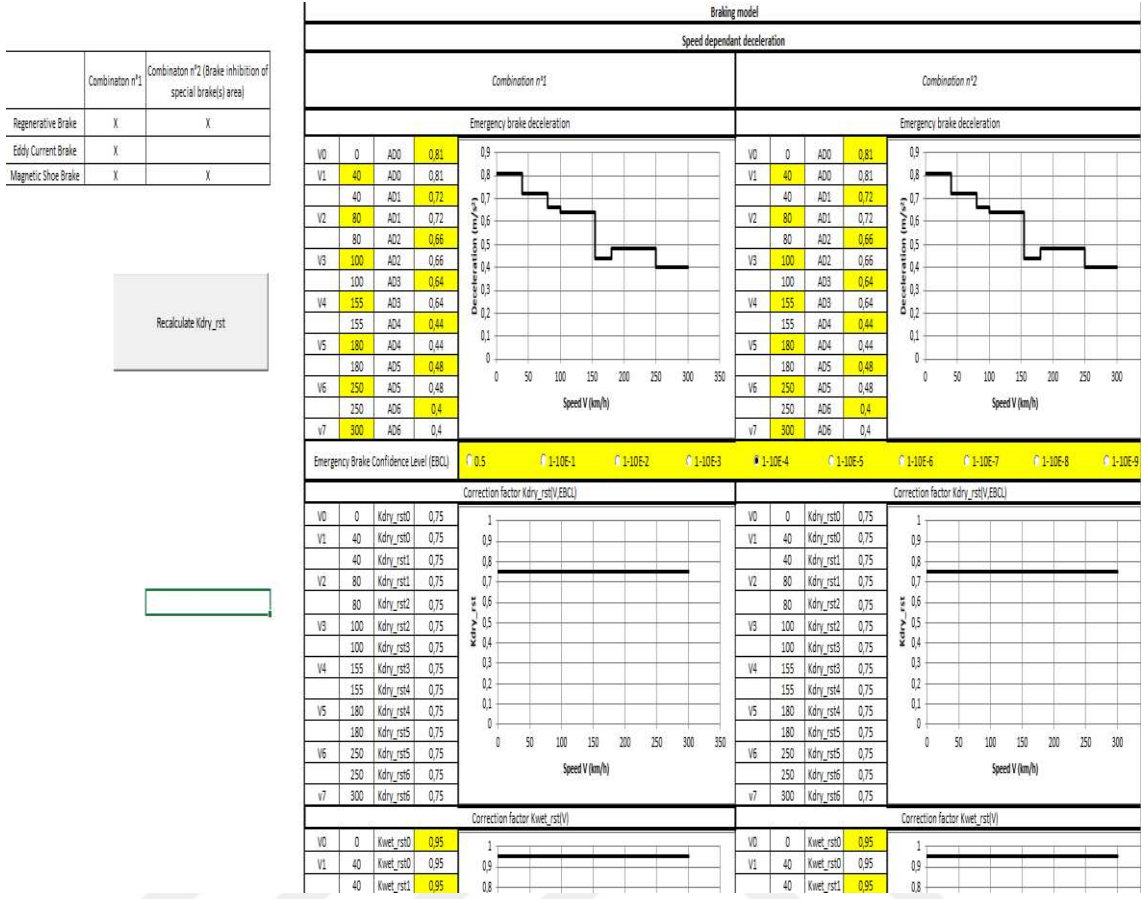
- Kombinasyon n1 (Combination n1): Geri kazanımlı frenleme, Eddy akımı frenleme ve manyetik frenlerin beraber birlikte kullanıldığını ifade eder.

- Kombinasyon n2 (Combination n2): Geri kazanımlı frenleme ve manyetik frenlemenin birlikte kullanıldığını ifade eder.

Bu sayfada ayrıca şu parametrelerde girilebilmektedir:

- Kuru raylarda acil frenleme performansının dağılım Katsayısı (Kdry_rs)
- Acil Fren Güvenirlik Seviyesi (Emergency Brake Confidence Level)
- Tam fren durumundaki ivme (A_brake_service)
- Normal servis freni durumundaki ivme (A_brake_normal_service)

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan bu sayfalara ek olarak, Excel yazılımında veri girişi yapılabilecek Düzeltme Faktörü Arayüzü ve Eğim Doğrulama Faktörleri Arayüzü de bulunmaktadır.



Şekil 3.8. Frenleme çeşitlerinin kombinasyonlarına göre ivmelenme parametrelerini içeren arayüz

3.2.6. Tren Eğrileri Arayüzü

Excel dökümanına değerler girilip hesaplama işlemi çalıştırılır. Sonuçların alındığı frenleme eğrilerinin gösterildiği arayüzdür. Bu arayüzden alınan verilerle trenlere ait frenleme eğrilerine yönelik gerçeğe yakın değerlere ulaşılabilir. Bu sayfada, kullanıcılara sunulan verilerin açıklamaları şu şekildedir:

- Giriş Hızı (Initial Speed): Trenin hatta giriş hızıdır.
- Tetikleme Konumu (Perturbation location): Tetikleme konumunun amacı, trene hedefine varmadan önce fren yaptırarak tetiklemektir.
- İşaret Konumu (Indication Location): İşaret konumunun amacı makinisti uyararak frene hangi noktada başlaması gerektiğini 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.

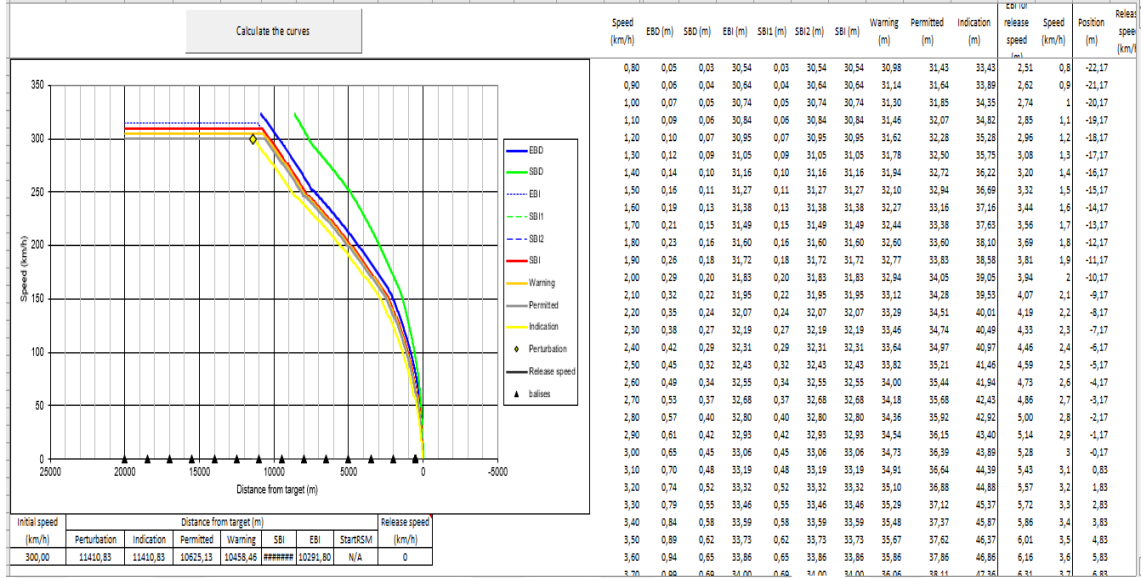
- Acil Fren Müdahalesi Başlangıç Noktası (Emergency brake intervention location-EBI): Acil fren uygulandığı noktanın aşılması durumunda acil durum freninin otomatik olarak devreye girdiği durumdur.

- Acil Fren Yavaşlama İvmesi (Emergency Brake Deceleration- EBD): Acil fren nedeniyle hız düşüşü ile ilgili frenleme eğrisidir. EBI eğrisi geçilirse tren otomatik frenle EBD eğrisinin altında veya onunla uyumlu bir yavaşlama izler.

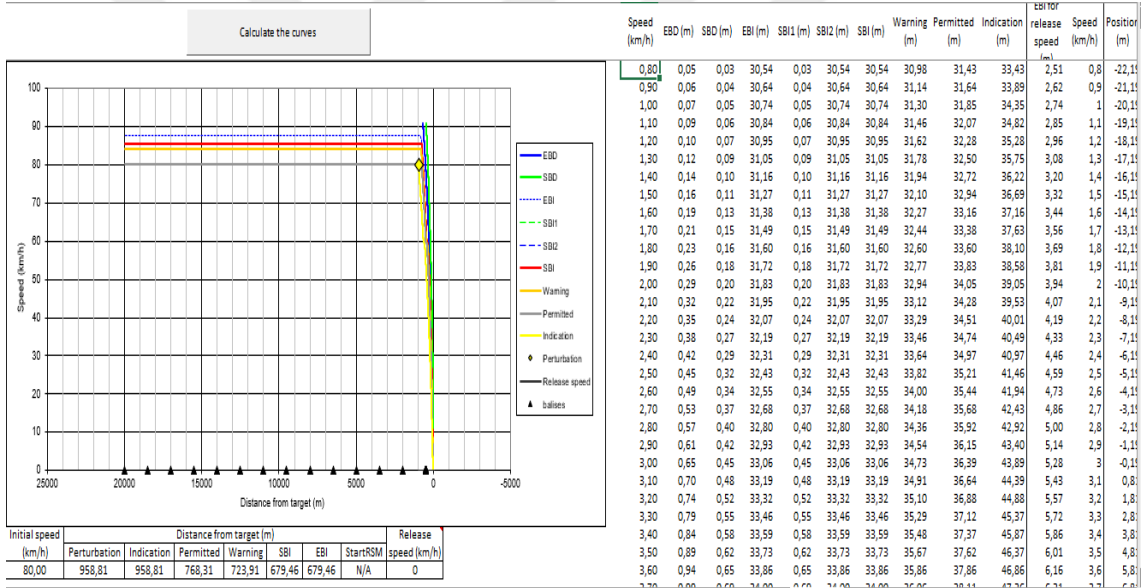
- Servis Freni Yavaşlama İvmesi (Service Brake Deceleration- SBD): Beklenen yavaşlamayı temel alan ve izin verilen fren mesafesine eşit bir mesafede sıfır hıza ulaşan eğridir. SBI eğrisi geçilirse tren otomatik frenle SBD eğrisinin altında veya onunla uyumlu bir yavaşlama izler.

3.3. MATLAB simülasyonuna aktarılmak üzere yazılımın kullanılması

Bu kısımda, Bölüm 3.2'de tanıtılan Excel yazılımının Matlab simülasyonunda kullanılmak üzere fren eğrisi verilerinin elde edilmesi amacıyla nasıl kullanıldığı anlatılacaktır. Matlab simülasyonunda yer alacak Metro ve Yüksek Hızlı Tren simülasyonları için aynı hat parametreleri kullanılmıştır. Hattaki eğim değerleri ve diğer parametreler her iki araç türü içinde aynı kalması tercih edilmiştir. Metronun giriş hızı 80 km/saat, Yüksek Hızlı Trenin giriş hızı ise 300 km/saat olarak belirlenmiştir. ETCS seviyesi olarak L2/3 tam otonom trene geçiş modu tercih edilmiştir. Simülasyonlarda kullanılacak eğriler ise İşaret (Indication) ve Acil Fren Yavaşlama İvmesi (Emergency Braking Deceleration- EBD) olarak seçilmiştir.



Şekil 3.9. Yüksek hızlı trene ait fren eğrilerini içeren arayüz



Şekil 3.10. Metroya ait fren eğrilerini içeren arayüz

Şekil.3.9 ve Şekil.3.10'da sırasıyla Yüksek hızlı tren ve Metro'ya ait fren eğrileri gösterilmiştir. Fren eğrilerinin çizdirilmesinin ardından mevcut eğrilere ait değerler başka bir Excel tablosuna aktarılmıştır. Bu Excel dosyaları Matlab ortamında okunarak, eğrilerin Matlab'ta çizdirilmesi sağlanarak tren hareketinin simülasyonunun yapılabilmesi için gereken kodlar yazılmıştır. Tren hareketinin modellenmesiyle birlikte tren hızı mevcut olan eğrilere değdiğinde, trenin gerekli frenleme hareketini başlatması sağlanmıştır.

4. FRENLEME, ARIZALANMA VE KAZA ÖNLEME SİMÜLASYONLARI

Bu ünite, Matlab ortamında frenleme, arızalanma ve kaza önleme simülasyonlarının nasıl oluşturulduğu anlatılmaktadır. Rassal arızalanma ve arıza durumunda kaza önleme senaryoları ile Monte Carlo simülasyonları oluşturularak, farklı durumlarda, arızanın yüzde kaç oranında kazaya yol açtığı tespit edilmiştir.

4.1. Hata Ağacı Analizi

Hata ağacı analizi farklı alt grup sistemleri içeren hataları analizi etmeye yarayan bir risk analizi metodudur. Bu metot sayesinde çeşitli alt grupların hata kök sebepleri detaylıca analiz edilebilir. Bu kısımda, trenin engele çarpması sonucu doğurabileceği, temel bir hata ağacı oluşturulmuştur. Daha sonra hata durumunda engele çarpmanın önüne geçebilmek için bir sistem iyileştirilmesini önerilerek hata ağacına dahil edilmiştir. Son olarak hata ağacı üzerinden, bir engel önünde durmak üzere fren yapmakta olan trenler için hata olaylarının gelişmesi durumunda engele çarpma durumu araştırılmıştır.

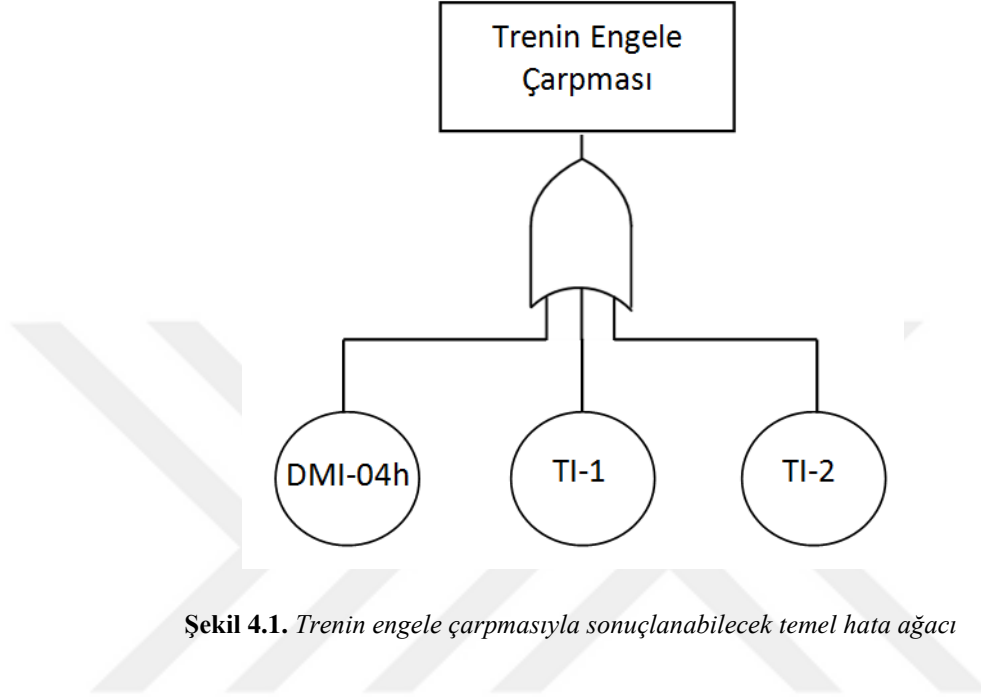
Bu tezde, sistemde modellenen hatalar ERA Subset 088, Subset 091, Subset 118 standartlarından faydalanılarak oluşturulmuştur (UNISIG, ETCS Application Level 2 - Safety Analysis Part 1 - Functional Fault Tree-SUBSET-088-2 Part 1, 2019) (UNISIG, ETCS Application Level 2 - Safety Analysis Part 2 - Functional Analysis-SUBSET-088-2 Part 2, 2019) (UNISIG, Functional Safety Analysis of ETCS DMI for ETCS Auxiliary Hazard-SUBSET-118, 2021) (UNISIG, Safety Requirements for the Technical Interoperability of ETCS in Levels 1 & 2-SUBSET-091, 2016). Bu hatalar, Sürücü Makine Arayüzünde (DMI) veya Tren Arayüz Ünitesinde (TIU) oluşabilecek hatalar sonucu mevcut frenin hatalı olarak kaldırılması veya gerektiği halde hiç uygulanmamasına yöneliktir:

DMI-04h: Sürücü Makine Arayüzü veya panelinde (DMI), servis frenini ya da acil durum freninin bırakılmasını için müdahale edilmesine yönelik hatalı bilgilendirme 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*)

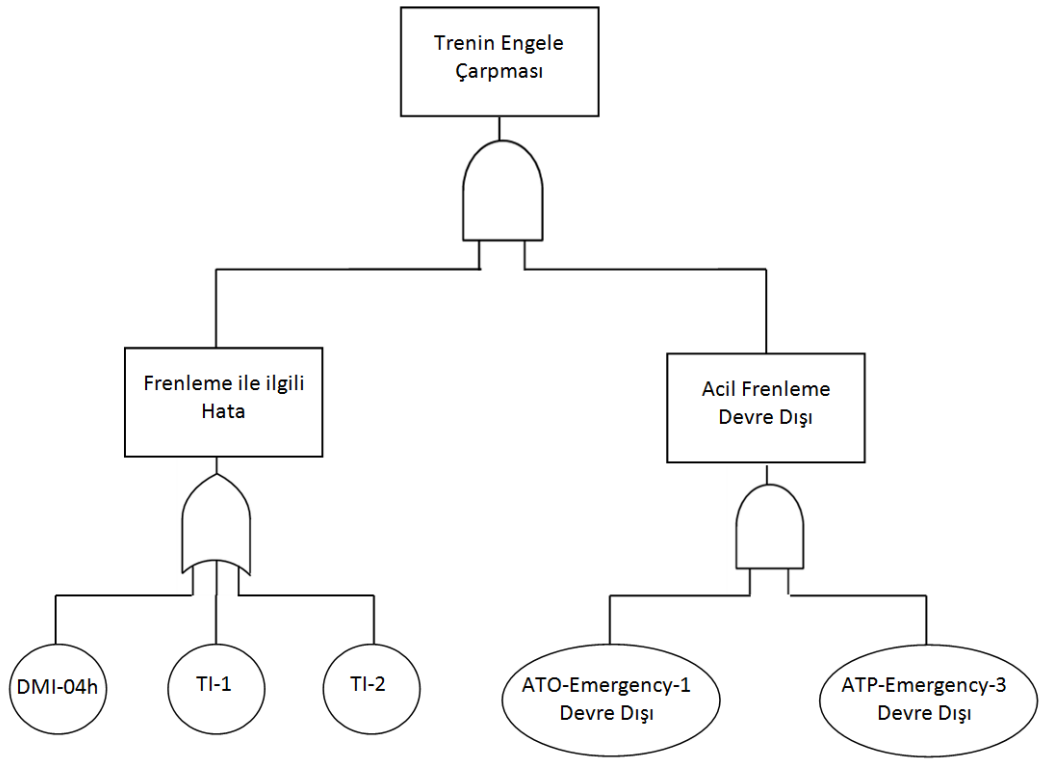
TI-2: Tren Arayüz Ünitesinde (TIU), gerekli olmadığı halde servis freni ya da acil frenin bırakılması komutunun verilmesi (*Service brake / emergency brake release commanded when not required*)

Bu hataların trenin engele çarpması sonucu doğurabileceği, temel bir hata ağacı yardımıyla Şekil.4.1'de gösterilmiştir. DMI-04h, TI-1 ve TI-2 hatalarının ayrı ayrı engele çarpmasıyla sonuçlanabileceğini anlatmak amacıyla bu olaylar VEYA kapısıyla birleştirilmiştir.

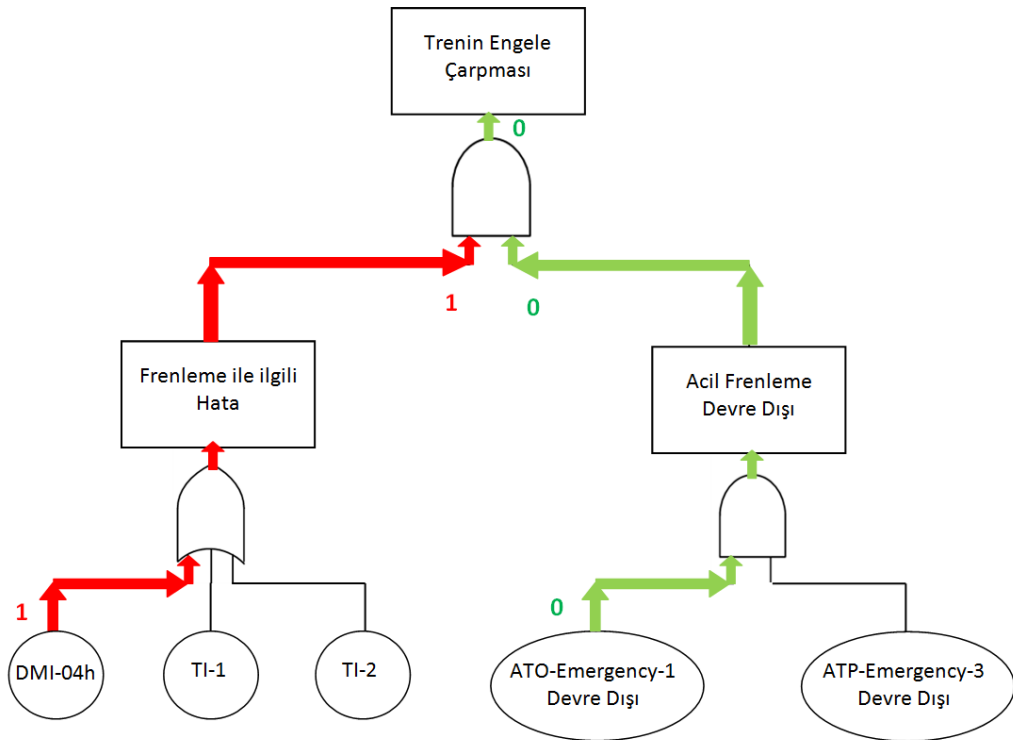


Şekil 4.1. Trenin engele çarpmasıyla sonuçlanabilecek temel hata ağacı

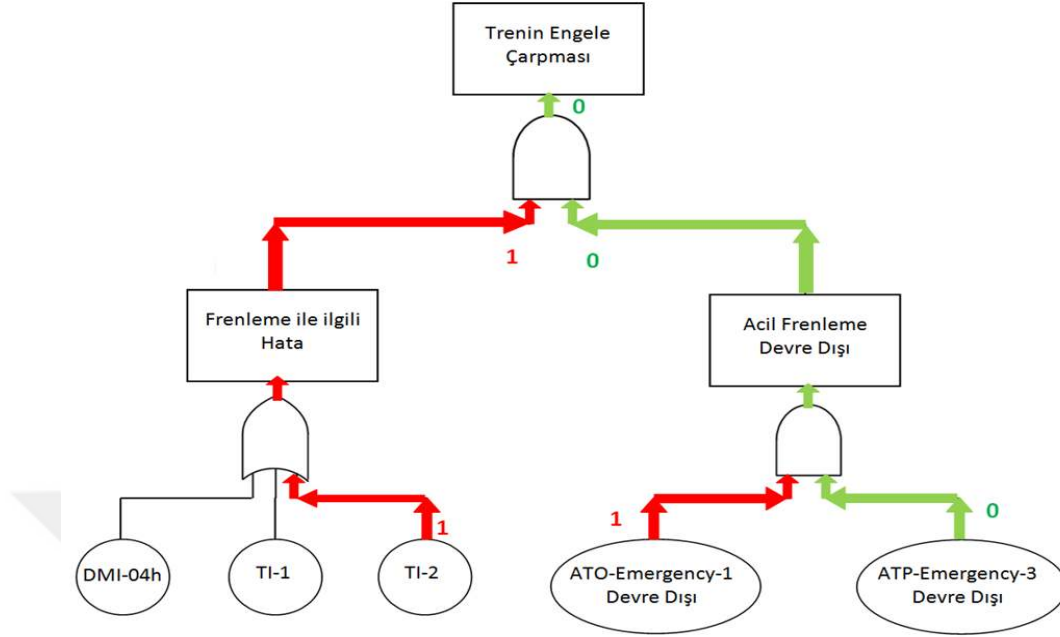
Şekil 4.2.'de gösterilen hata ağacında ise, engele çarpmaya yol açacak kök sebeplere ek olarak hata durumunda engele çarpmanın önüne geçebilmek için önerilen sistem iyileştirilmesini de içeren hata ağacı görölmektedir. Bu hataların kazaya yol açmasını önlemek için ATO-Emergency-1 ve ATP-Emergency-3 adlarına sahip ve EN 13452-1 standartında belirtilen acil duruma yönelik acil durum frenleri kullanılmıştır. Şekil 4.3'te DMI-04h hatası geliştiğinde, bu hatanın engele çarpmayı nasıl önleyeceği anlatılmaktadır. ATO-Emergency-1 acil frenleme sistemi devreye girerek engele çarpmadan önce trenin durdurulmasını sağlayacaktır. Şekil 4.4'te ise, TI-2 hatası geliştiğinde ve ATO-Emergency-1 acil frenleme sistemi devre dışı olsa bile, ATP-Emergency-3 acil freni devreye girerek, trenin engele çarpmasının önüne geçmesi betimlenmektedir.



Şekil 4.2. Engele çarpmanın önüne geçebilmek için önerilen sistem iyileştirilmesini de içeren hata ağacı



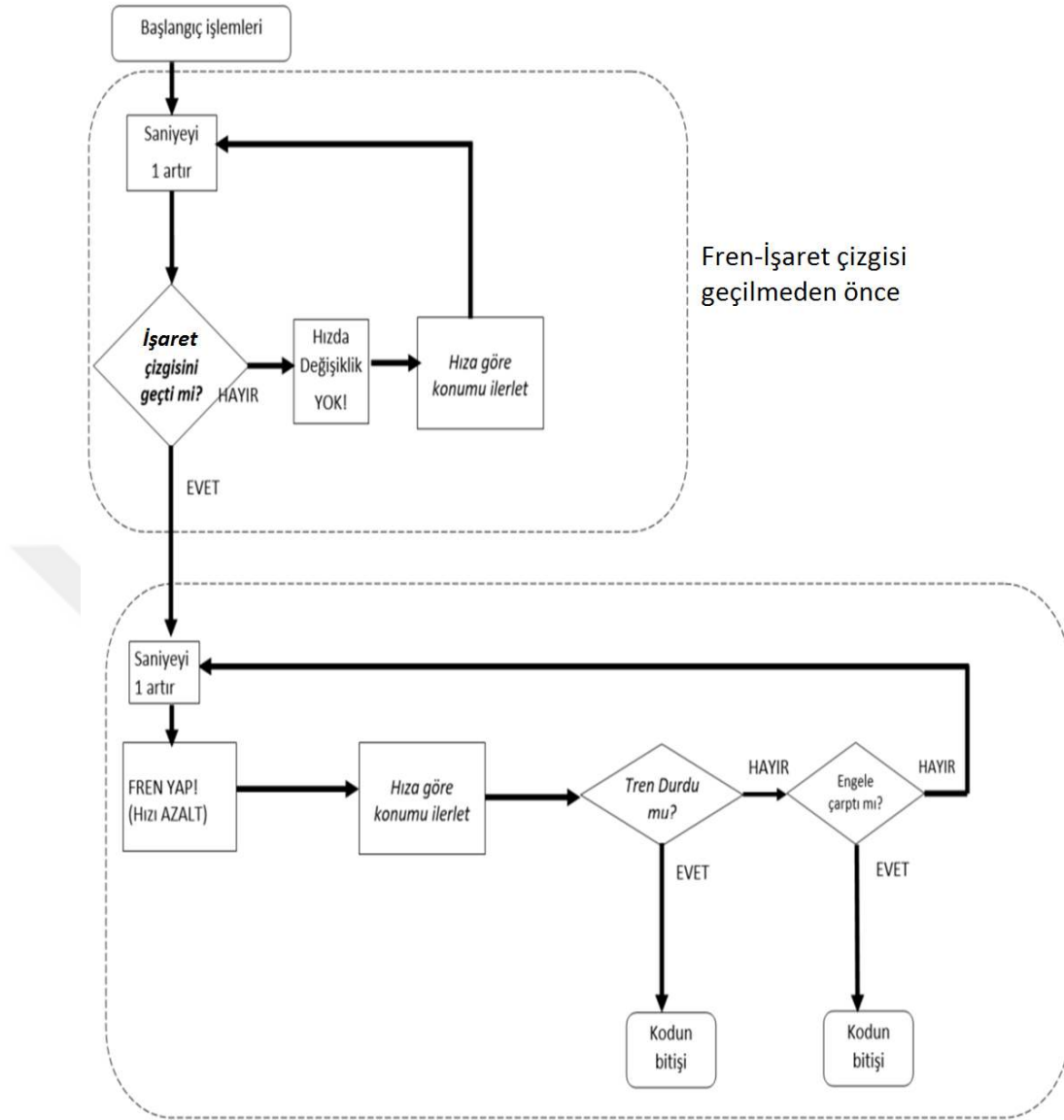
Şekil 4.3. DMI-04h hatası durumunda ATO-Emergency-1'in devreye girmesi



Şekil 4.4. *TI-2 hatası gelişmesi ve ATO-Emergency-1 devre dışı kalması durumunda ATP-Emergency-3'ün devreye girmesi*

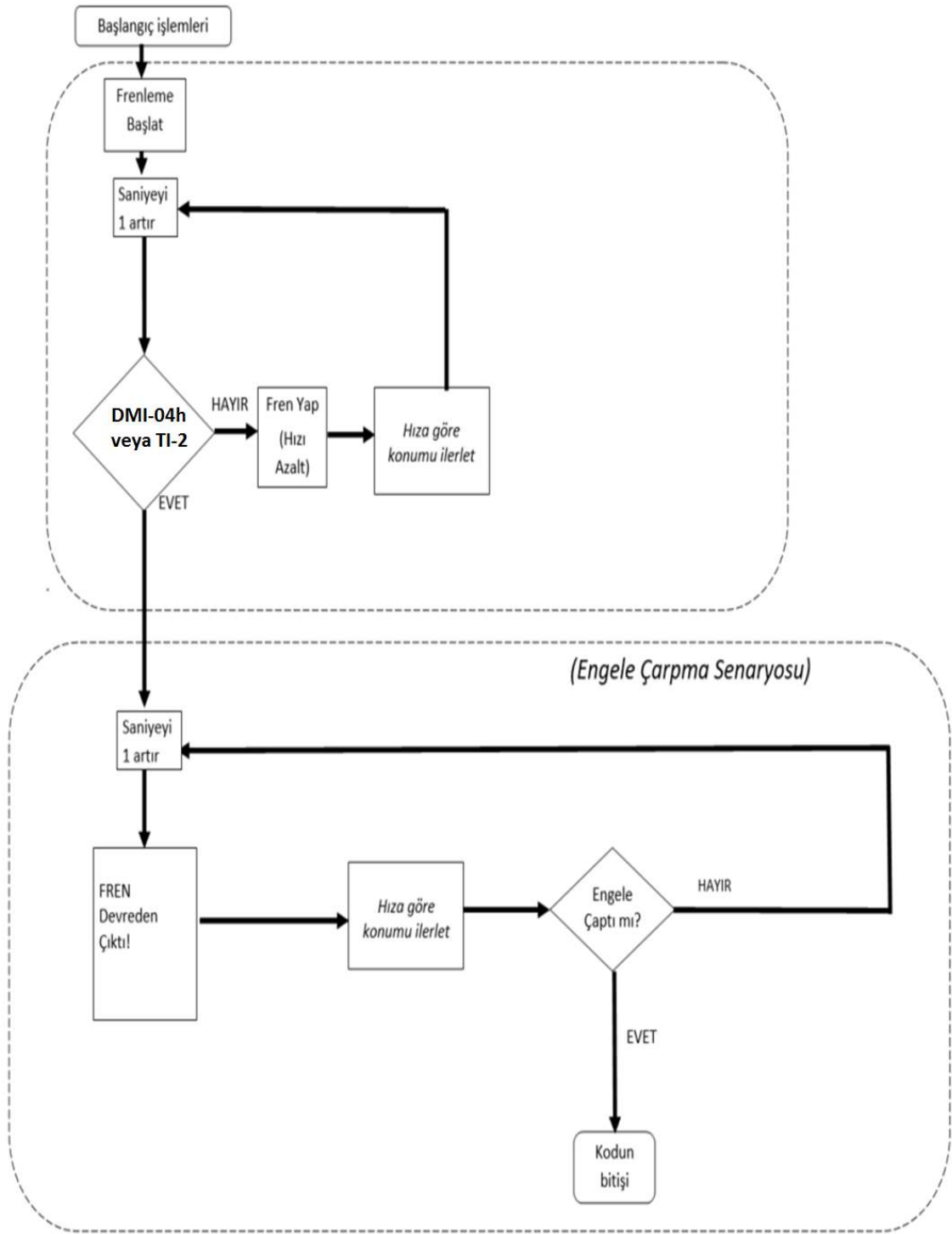
4.2. MATLAB Ortamında Frenleme ve Kaza Simülasyonları

Bu bölümde, hata ağacındaki olayların, bir engel önünde durmak üzere fren yapmakta olan trenler için Matlab simülasyonuna dönüştürülmesi anlatılmıştır. Matlab ortamında oluşturulan simülasyonların akış şemaları 3 farklı akış şeması ile aşağıda belirtilmiştir.

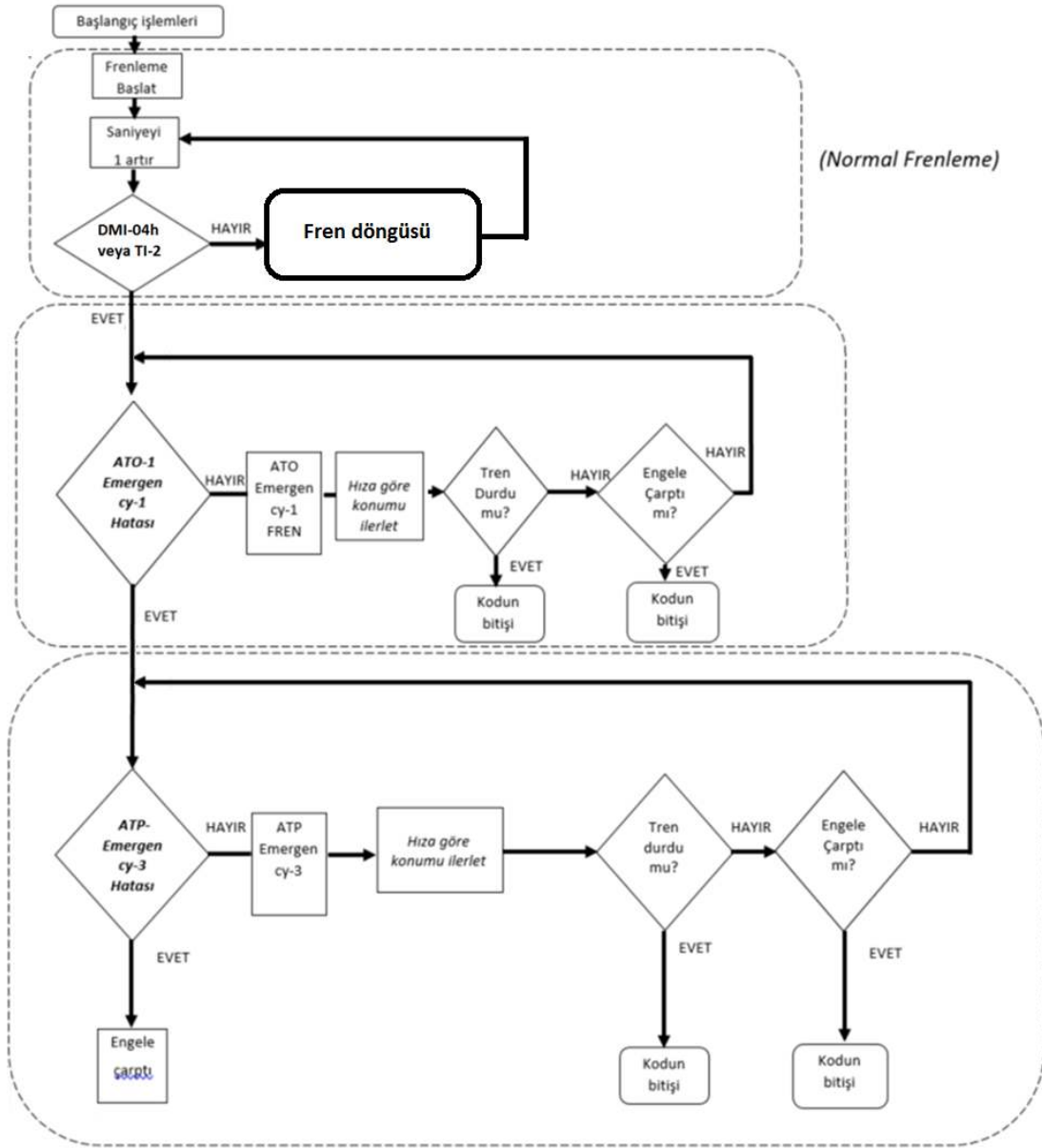


Şekil 4.5. Normal Durum Frenleme Senaryosuna Ait Akış Diyagramı

Simülasyon, bir saniyelik adımlarla ilerlemektedir. Her saniye için trenin konumu ve eğer fren yapıyorsa hızı güncellenmektedir. Şekil 4.5'teki akış şemasında, tren işaret çizgisini geçtiğinde fren yapmaktadır. Frenleme işlemi ve simülasyon tren durunca (veya engelle çarptığında) tamamlanmaktadır.



Şekil 4.6. Hatalar Meydana Geldiğinde Akış Diyagramı

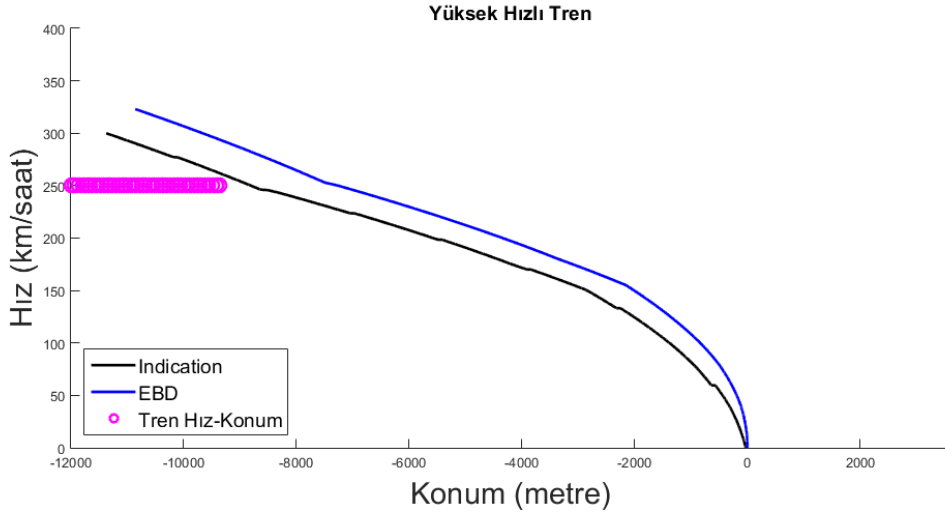


Şekil 4.7. Hatalara Karşı Önerilen Sistemin Akış Diyagramı

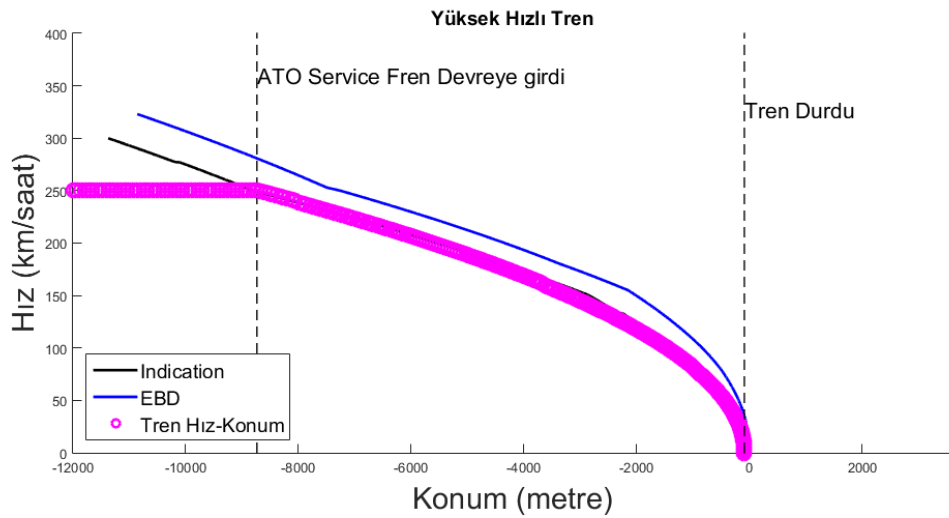
Şekil 4.6 ise, Şekil 4.5'teki gibi frenleme başlamakta fakat belli bir süre sonra rassal bir anda DMI-04h veya TI-2 hataları meydana gelerek frenleme ortadan kalkmaktadır. Bu durumda, simülasyon tren engele çarpınca durmaktadır. Bu akış, Şekil 4.1'de gösterilen hata ağacına karşılık gelmektedir. Şekil 4.7 ise Şekil 4.6'daki akışa ek olarak, Şekil 4.2'deki önlemler eklenmiştir. Bu akış şeması aracılığıyla, trenin herhangi bir andaki rassal olarak hata vermesini durumunda kaza gelişme olasılığı incelenecektir.

Matlab ortamında oluşturulan simülasyon yazılımı, Yüksek Hızlı tren için Şekil 4.8'de gösterildiği üzere tren sabit hızla simülasyona giriş yapmaktadır. Hata olmaması

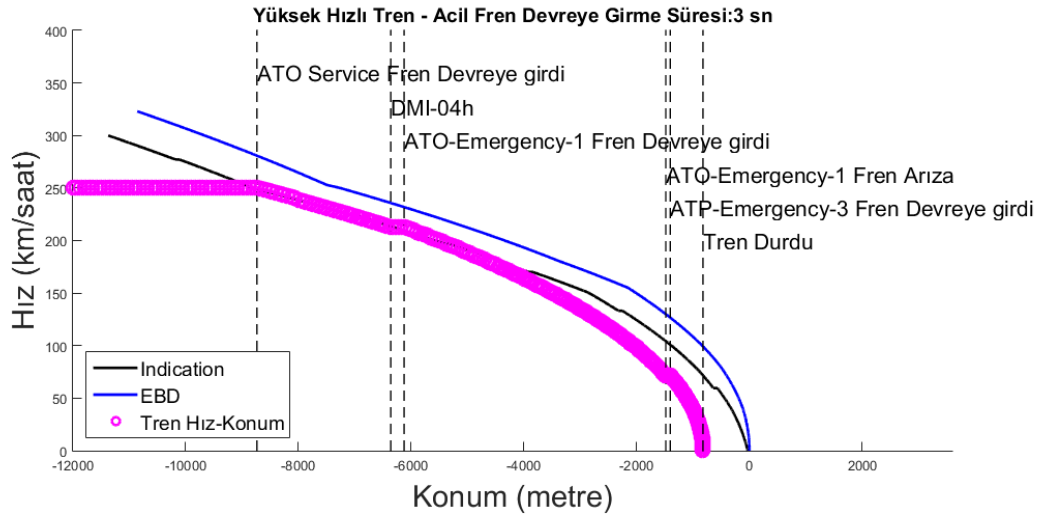
durumunda, Şekil 4.9 gösterildiği üzere, İşaret çizgisine ulaştığında frenleme başlayarak, engele çarpmadan durmaktadır. Fakat hata gelişirse, Şekil 4.10 gösterildiği gibi acil frenler devreye girerek engelden önce durabilmekte veya Şekil.11 gösterildiği üzere acil frenler devreye girse bile, gecikmeleri durumunda tren engele çarpmakta yani kaza meydana gelebilmektedir. Monte Carlo simülasyonlarında, acil frenlerin devreye girme süreleri ile kaza gelişme olasılığı incelenecektir. Frenleme ekipmanlarının gecikmesi durumunda kaza oranında artış araştırılacaktır. Şekil 4.12'de ise Metro örneği gösterilmiştir. Şekilde, DMI-04h hatası durumunda acil frenlerin devreye girmesi gösterilmiştir. Şekil 4.13'te ise TI-1 hatası durumunda, trenin, işaret çizgisini geçtiği halde fren yapmaması durumunu örneklendirilmiştir.



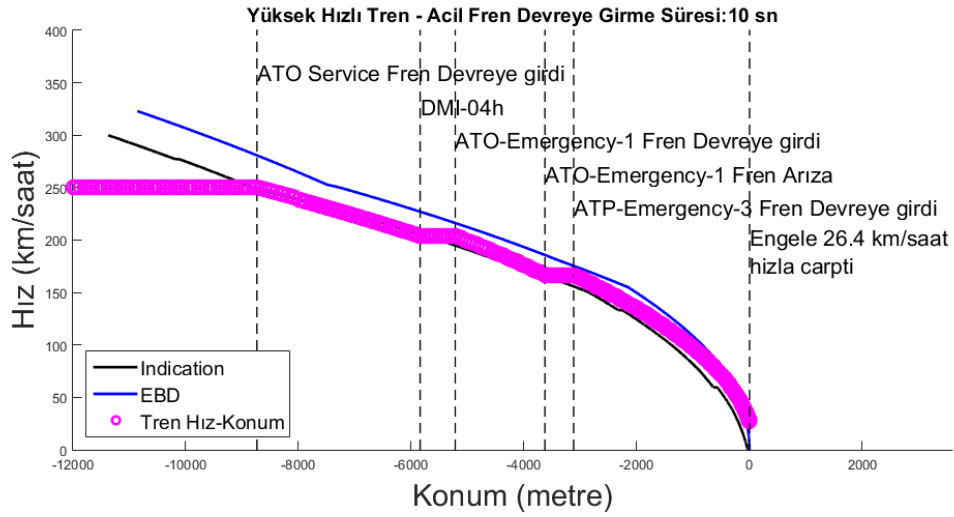
Şekil 4.8. Yüksek hızlı trene ait trenin yaklaşırken Matlab görüntüsü



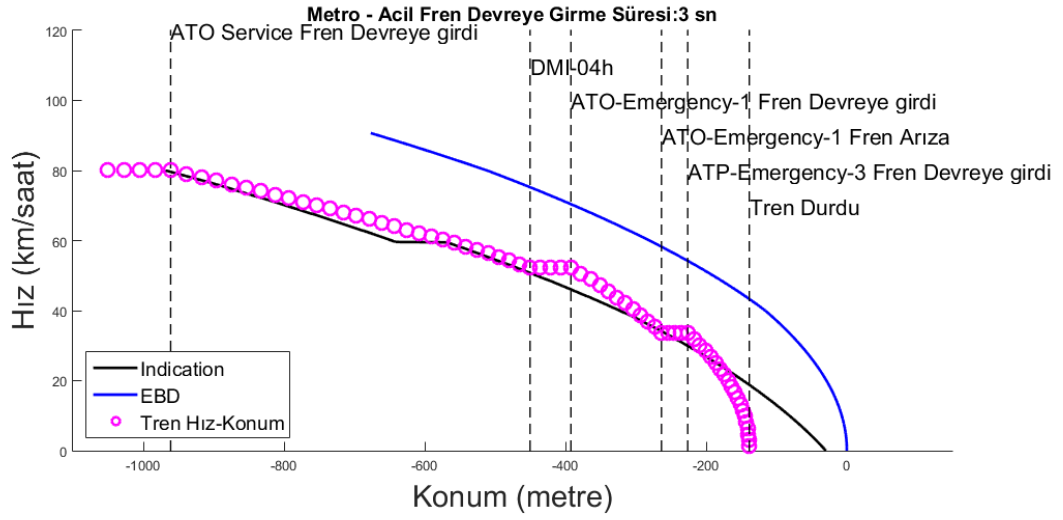
Şekil 4.9. Yüksek hızlı trene ait trenin normal seyir halindeyken Matlab görüntüsü



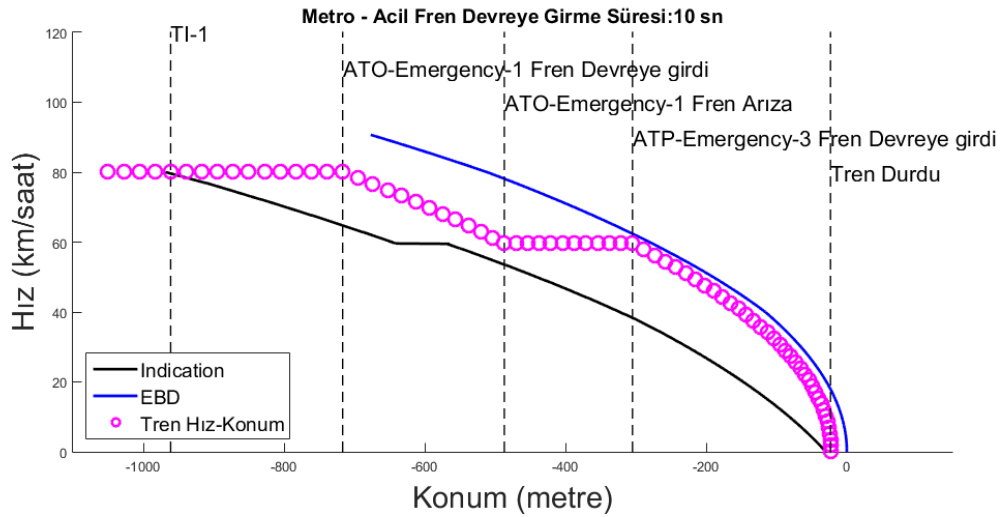
Şekil 4.10. Yüksek hızlı trene ait DMI-04h hatası meydana geldiğinde önerilen sistem tarafından trenin acil frenle 3sn sonra durdurulduğu Matlab görüntüsü



Şekil 4.11. Yüksek hızlı trene ait DMI-04h hatası meydana geldiğinde önerilen sistem tarafından trenin acil frenle 10sn sonra durdurulduğu Matlab görüntüsü



Şekil 4.12. Metroya ait DMI-04h hatası meydana geldiğinde önerilen sistem tarafından trenin acil frenle 3sn sonra durdurulduğu Matlab görüntüsü



Şekil 4.13. Metroya ait DMI-04h hatası meydana geldiğinde önerilen sistem tarafından trenin acil frenle 10sn sonra durdurulduğu Matlab görüntüsü

4.3. Monte Carlo Simülasyonları ile Kaza Oranları

Bu bölümde Monte Carlo simülasyonları aracılığıyla, acil frenlerin devreye girme süreleri ile kaza gelişme olasılığı incelenecektir. Frenleme ekipmanlarının gecikmesi durumunda kaza oranında artış araştırılacaktır.

Metro için DMI-04h (veya TI-2) hatasına ait Monte Carlo simülasyonu sonuçlarına ait kaza oranları Tablo 4.1’de verilmiştir. Metro için TI-1 hatası ise Tablo 4.2’de

sunulmuştur. Yüksek Hızlı Tren için DMI-04h (veya TI-2) hatası Tablo 4.3'te, Yüksek Hızlı Tren için TI-1 hatası ise Tablo 4.4'te verilmiştir. Her tablo öncesi simülasyonda kullanılan parametreler açıklanmıştır.

METRO (DMI-04h veya TI-2)

- Başlangıç tren hızı: 80 km/saat
- Normal Fren İvmesi 0,95 km/ (saat. Sn)
- Frenleme başladığı mesafe: 960 metre
- Hata gelişme olasılığı: Saniyede 0.03
- Hiç Acil Fren olmadan Çarpma olasılığı %93
- ATO-Emergency-1 Fren İvmesi: EBD (Acil fren ivmesi) (Bu örnek için 1,73 km/ (saat. Sn))
- ATP-Emergency-3 Fren İvmesi: EBD (Acil fren ivmesi) (Bu örnek için 1,73 km/ (saat. Sn))
- Yukarıdaki fren değerleri çevresel faktörler, sürtünme elemanları, yolu yapısı, tekerliklerin yıpranması gibi şartlar göz gözüne alındığında, $1-10^{-4}$ güvenilirlik seviyesinde, garantilenmiş fren değerleridir.

Tablo 4.1. Metro DMI-04h hatasına ait simülasyonların fren devreye girme süresine bağlı olarak simülasyon sonuçları

		ATO-Emergency-1 Fren Devreye Girme Süresi							
ATP-Emergency-3 Fren Devreye Girme Süresi		2 sn	4 sn	6 sn	8 sn	10 sn	12 sn	14 sn	16 sn
	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

METRO (TI-1)

- Başlangıç tren hızı: 80 km/saat
- Normal Fren İvmesi 0,95 km/ (saat. Sn)
- Frenleme başladığı mesafe: 1050 metre
- Hata gelişme olasılığı: Saniyede 0.03
- Hiç Acil Fren olmadan Çarpma olasılığı %93
- ATO-Emergency-1 Fren İvmesi: EBD (Acil fren ivmesi) (Bu örnek için 1,73 km/ (saat. Sn))
- ATP-Emergency-3 Fren İvmesi: EBD (Acil fren ivmesi) (Bu örnek için 1,73 km/ (saat. Sn))
- Yukarıdaki fren değerleri çevresel faktörler, sürtünme elemanları, yolu yapısı, tekerleklerin yıpranması gibi şartlar göz gözüne alındığında, $1-10^{-4}$ güvenilirlik seviyesinde, garantilenmiş fren değerleridir.

Tablo 4.2. Metro TI-1 hatasına ait simülasyonların fren devreye girme süresine bağlı olarak simülasyon sonuçları

		ATO-Emergency-1 Fren Devreye Girme Süresi							
ATP-Emergency-3 Fren Devreye Girme Süresi		2 sn	4 sn	6 sn	8 sn	10 sn	12 sn	14 sn	16 sn
	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

YHT (DMI-04h)

- Başlangıç tren hızı: 250 km/saat
- Normal Fren İvmesi 1 km/ (saat. Sn)
- Frenleme başladığı mesafe: 8800 metre
- Hata gelişme olasılığı: Saniyede 0.01
- Hiç Acil Fren olmadan Çarpma olasılığı %97
- ATO-Emergency-1 Fren İvmesi: EBD (Acil fren ivmesi) (Bu örnek için 1,2 km/ (saat. Sn))
- ATP-Emergency-3 Fren İvmesi: EBD (Acil fren ivmesi) (Bu örnek için 1,2 km/ (saat. Sn))
- Yukarıdaki fren değerleri çevresel faktörler, sürtünme elemanları, yolu yapısı, tekerliklerin yıpranması gibi şartlar göz önüne alındığında, $1-10^{-4}$ güvenilirlik seviyesinde, garantilenmiş fren değerleridir.

Tablo 4.3. Yüksek hızlı trene DMI-04h hatasına ait simülasyonların fren devreye girme süresine bağlı olarak simülasyon sonuçları

		ATO-Emergency-1 Fren Devreye Girme Süresi							
ATP-Emergency-3 Fren Devreye Girme Süresi		2 sn	4 sn	6 sn	8 sn	10 sn	12 sn	14 sn	16 sn
	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

YHT (TI-1)

- Başlangıç tren hızı: 250 km/saat
- Normal Fren İvmesi 1 km/ (saat. Sn)
- Frenleme başladığı mesafe: 8800 metre
- Hata gelişme olasılığı: Saniyede 0.01
- Hiç Acil Fren olmadan Çarpma olasılığı %97
- ATO-Emergency-1 Fren İvmesi: EBD (Acil fren ivmesi) (Bu örnek için 1,2 km/ (saat. Sn))
- ATP-Emergency-3 Fren İvmesi: EBD (Acil fren ivmesi) (Bu örnek için 1,2 km/ (saat. Sn))
- Yukarıdaki fren değerleri çevresel faktörler, sürtünme elemanları, yolu yapısı, tekerliklerin yıpranması gibi şartlar göz önüne alındığında, $1-10^{-4}$ güvenilirlik seviyesinde, garantilenmiş fren değerleridir.

Tablo 4.4. Yüksek hızlı trene TI-1 hatasına ait simülasyonların fren devreye girme süresine bağlı olarak simülasyon sonuçları

		ATO-Emergency-1 Fren Devreye Girme Süresi							
ATP-Emergency-3 Fren Devreye Girme Süresi		2 sn	4 sn	6 sn	8 sn	10 sn	12 sn	14 sn	16 sn
	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

Tablo 4.1’de, 4.2.’de, Tablo 4.3.’de ve Tablo 4.4’te hata ağacı analizinde hatalara bağlı olarak Monte Carlo Simülasyonunda Metro ve Yüksek Hızlı Treni’nin acil fren devreye girme sürelerine karşılık kaza yapma oranları sunulmuştur. İşlemci gücü yüksek

bilgisayarlar yardımıyla, her bir durum için 100'er adet Monte Carlo tekrarlamaşı gerçekleştirilmiştir. Yapılan Monte Carlo Simülasyonlarında sonucunda önerilen sistem sonucunda hatalarda frenleme sisteminin geç devreye girmesine bağlı olarak kaza oranında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Sonuçların değerlendirilmesi ve tartışılması bir sonraki ünitede yer almaktadır.



5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, bir engel önünde durmak üzere fren yapan ya da yapması gereken trenler için bir hata durumunda Matlab ortamında kaza yapma simülasyonları oluşturulmuştur. Avrupa Demiryolları Ajansının Frenleme eğrileri oluşturma dokümanı yardımıyla Metro ve Yüksek Hızlı Tren için fren eğrileri üretilmiştir. Daha sonra, UNISIG konsorsiyumunun belirlediği emniyet usulleri ve emniyet analizi dokümanlara bakılarak frenleme öncesinde ve sonrasında meydana gelebilecek çeşitli hatalar seçilerek örnek bir hata ağacı analizi oluşturulmuştur. Bu hatalar gerçekleştiğinde trenin engele çarpmasını önleyecek acil fren önerileri ileri sürülerek bu süreçler hata ağacı analizine eklenmiştir. Ardından, bir engel önünde durmak üzere fren yapan ya da yapması gereken trenler için bir Matlab simülasyonu oluşturulmuştur. Matlab ortamında, hata anında meydana gelebilecek kaza oranları Monte Carlo Simülasyonu yardımıyla incelenerek, acil frenlerin devre girme sürelerinin kaza olasılığına üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu bölümde, 4. Ünite de verilen sonuçların değerlendirilmesi sunulacaktır.

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 durumunun kaza oranını sıfırlayabildiği gösterilmiştir. Olumsuz taraftan değerlendirilecek olursa, acil frenlerin devreye girme sürelerinin biraz artması her senaryo için 0'dan farklı 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.

Simülasyon sonuçlarıyla diğer önemli bir boyut ise ATO-Emergency-1 freni ile ATP-Emergency-3 frenin karşılaştırılmasıdır. ATO-Emergency-1 freninin gecikme yapmada 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 gözlemlenmemiştir. Bu noktada şu önemli nokta ortaya çıkmaktadır: kazalar trende fonksiyonel güvenlik açısından yeterli yazılımsal ve donanımsal yapılar mevcut ise sıfırlanabilir. Kazaların sıfırlanabilmesi için trenin yazılımsal ve donanımsal olarak piyasada mevcut olan en son sistem kullanılarak güncel tutulması güvenliğin sağlanması için bir zorunluluktur.

Sistemde meydana gelen hataların kazaya yol açmaması için iki yönlü bir çözümü vardır. Birinci çözüm mevcut sistem fonksiyonlarında makinistin eğitimlerinin üst seviyeye çıkarılarak sistem güvenliğin maksimuma edilmesi. İkinci çözüm ise mevcut sistemde kullanılan sistemlerin hassasiyetlerinin artırılarak sistemde meydana gelebilecek hatada sistemin hatasının erken fark edilerek sistemin kendi kendine müdahale etmesidir.

Raylı sistemlerde mevcutta ATO Otomatik Tren İşletimine izin veren araç üstü sistemlerin hassasiyeti artırılarak sistem algılamasındaki hassasiyet daha üst seviyelere çıkarılabilir. Örneğin araç üstünde yer alan Doppler radarının hassasiyeti artırılarak trenlerin, kaza oranlarının sıfırlanacağı garantilenerek, takip mesafesinin düşürülmesi sağlanabilir. Yine Doppler radarına ek olarak araç takometresinden hız verilerine göre trenin mevcut hızının tahmininin doğruluğu daha üst seviyelere çıkarılabilir.

Son dönemlerde yapılan çalışmalarda araç üstü sistemlerde birçok sistemin ortak kesişiminden doğan verilerin birleşiminden gelen verilerin çeşitli filtreler yardımıyla veri doğruluğu artırılmaktadır. Bu yüzden trenlerde Lidar kullanımı, görüntü işleme teknikleri yararlanmak amacıyla kullanılan kameralar bulunmaktadır. Ayrıca bu sistemlere ek olarak ataletsel eylem ünitesi ve sensör füzyonu teknolojisinden yararlanılmaktadır.

Bu çalışma bu noktada, raylı sistemlerde uçaklarda kullanılan radar teknolojisine benzer bir teknolojinin kullanımı bu alanda denenebilir (AN/APG-81 F-35 AESA Radar, 2013). Pesa ve Aesa radar teknolojisine dayanan ve sensör füzyonu ile birlikte ataletsel eylem ünitesi içeren bu sistemin raylı sistemlere özel bir versiyonunun maliyet etkin bir versiyonunun uyarlanması düşünülebilir (F-35 Distributed Aperture System (EO DAS), 2010). Ayrıca mevcut sistemde Lidar teknolojisinin bu sistemle entegrasyonlu bir şekilde çalışması sistemin hassasiyetine katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, kazaların neredeyse sıfırlandığı tam güvenli raylı sistemler oluşturulması mümkündür ve otomasyon seviyesi arttıkça sistemde meydana gelen hataların bertaraf edilmesi ileri düzey fonksiyonel güvenlik tasarımlarıyla sağlanabilir.

KAYNAKÇA

- AN/APG-81 F-35 AESA Radar. (2013). web.archive.org: <https://web.archive.org/web/20130123033148/http://www.es.northropgrumman.com/solutions/f35aesaradar/> (Erişim Tarihi:19.06.2023)
- Braband, J., & Aktiengesellschaft, & B. (2005). *Risikoanalysen in der Eisenbahn-Automatisierung*. içinde Hamburg: Eurailpress.
- Durmuş, M. S., Yıldırım, U., & Söylemez, M. T. (2011). Demiryolu Sinyalizasyon Tasarımında Fonksiyonel Güvenlik ve Ayrık Olay Sistem Yaklaşımı. *Elektrikli Ulaşım Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi - EUSİS*.
- EN, & (2003), N. (2003). *13452-1: 2003. Railway Applications–Braking–Mass transit brake systems*. British Railway Standard.
- European Railway Agency. (2018). *Braking curves simulation tool v4.2 - handbook*. European Railway Agency.
- European Railway Agency. (2018). *Braking curves simulation tool v4.2.xls*. European Railway Agency.
- European Standards. (2018). *EN 50129: 2018 railway applications-communication, signalling and processing systems-safety related electronic systems for signalling*. BSI Standards Publication.
- European Standards. (2018). *EN 50129: 2018 railway applications-communication, signalling and processing systems-safety related electronic systems for signalling*. BSI Standards Publication.
- F-35 Distributed Aperture System (EO DAS). (2010). web.archive.org: <https://web.archive.org/web/20100402082538/http://www.es.northropgrumman.com/solutions/f35targeting/> (Erişim Tarihi:19.06.2023)
- IEEE Vehicular Technology Society. (2004). *IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*. New York: IEEE.
- IEEE Vehicular Technology Society. (2009). *IEEE Guide for the Calculation of Braking Distances for Rail Transit Vehicles*. New York: IEEE.
- International Electrotechnical Commission. (2006). *IEC 61025: Fault tree analysis (FTA)*. IEC Standards Online.
- Joanni, A., Mahboob, Q., & Zio, E. (2018). Advanced Methods for RAM Analysis and Decision Making. Q. Mahboob, & E. Zio içinde, *Handbook of RAMS in Railway Systems* (s. 39-62). CRC Press.
- Joanni, A., Mahboob, Q., & Zio, E. (2018). Basic Methods for RAM Analysis and Decision Making. Q. Mahboob, & E. Zio içinde, *Handbook of RAMS in Railway Systems* (s. 13-38). CRC Press.
- Liu, H. (2020). *Unmanned driving systems for smart trains*. Elsevier.
- Mahboob, Q., & Zio, E. (2018). *Handbook of RAMS in railway systems: theory and practice*. CRC Press.

- Nalçakan, M., & Uluskan, S. (2021). Structural equation modeling of macro factors of railway accidents: a worldwide analysis. *International Journal of Transport Economics*, 48(2), 251-273.
- Presti, L. L., & Sabina, S. (2018). *GNSS for Rail Transportation*. Switzerland: Springer.
- UNISIG. (2016). *Safety Requirements for the Technical Interoperability of ETCS in Levels 1 & 2-SUBSET-091*.
- UNISIG. (2019). *ETCS Application Level 2 - Safety Analysis Part 1 - Functional Fault Tree-SUBSET-088-2 Part 1*.
- UNISIG. (2019). *ETCS Application Level 2 - Safety Analysis Part 2 - Functional Analysis-SUBSET-088-2 Part 2*.
- UNISIG. (2021). *Functional Safety Analysis of ETCS DMI for ETCS Auxiliary Hazard-SUBSET-118*.
- Vlasenko, S., Anders, E., Arndt, J., Berndt, T., & Braband, J. (2020). *Railway signalling and interlocking International compendium*. Leverkusen: PMC Media House GmbH.
- Winter, P. (2009). *Compendium on ERTMS: European rail traffic management system*. Eurail press

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO:

Ad Soyad :

Yabancı Dil :

Doğum Yeri ve Yılı :

E-Posta :

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

-

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

-