

Araştırma Makalesi

Demiryolu araçları için radyo frekans haberleşmeli çarpışma uyarı sistemi kavramsal tasarımı

Mehmed Akif Özkaya^{1,*}, Ekrem Çağlar²

^{1,2} TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Teknopark İstanbul, İstanbul, Türkiye

*Correspondence: akifozkaya@gmail.com

DOI: 10.51513/jitsa.1551510

Özet: Demiryolu ulaşım ve taşımacılık sistemlerinde emniyetli işleyişi sağlamak ve kazaları önlemek amacıyla geliştirilmiş demiryolu sinyalizasyon sistemleri, yüksek emniyet standartları ve kurallarıyla insan hatalarını minimize ederek kaza riskini önemli ölçüde azaltan Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) unsurlarıdır. Ancak, bu sistemlerin yüksek maliyetleri, ekipman kurulumu ve bakım gereksinimleri gibi zorluklar, demiryolu ağlarının tamamına uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Özellikle yüksek yolcu ve sefer trafiğine sahip bölgelerde, kaza riskinin belirgin şekilde yüksek olduğu durumlarda sinyalizasyon sistemleri kritik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, sefer yoğunluğunun düşük olduğu, günde sadece birkaç araç hareketinin gerçekleştirildiği ve elektrik altyapısı tesis edilmemiş bölgelerde sinyalizasyon sistemlerinin kurulumu, ek zorluklar getirir. Bu tür bölgelerde, kazaları önlemek amacıyla çeşitli destek sistemleri geliştirilmekte ve kullanılmaktadır.

Bu çalışma, hava araçlarında kullanılan radyo frekans tabanlı Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem (TCAS)'in demiryolu araçlarına uyarlanmış bir modelinin kavramsal tasarımını sunmakta olup, düşük maliyetli ve kolay kurulum seçenekleri ile ilgili önerilerde bulunmaktadır. Ayrıca düşük bant genişliği ve veri iletim kısıtları nedeniyle kullanılması tercih edilmeyen LoRa kablosuz haberleşmesinin ihtiyaca uygun bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Çalışmanın sonuçları, sistemin pratik uygulanabilirliği için öneriler sunarak, demiryolu emniyetinde yenilikçi çözümler geliştirilmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı ulaşım sistemleri, demiryolu sinyalizasyonu, tren çarpışma önleme sistemi

Radio frequency communication based railway vehicles collision avoidance system

Abstract: Railway signaling systems, developed to enhance safety and prevent accidents in rail transportation and logistics, are among the key components of Intelligent Transportation Systems (ITS). With high safety standards and regulations, these systems significantly reduce the risk of accidents by minimizing human errors. However, the high costs of these systems, as well as the requirements for equipment installation and maintenance, limit their applicability to entire railway networks. Signaling systems become critical technologies in areas with high train traffic where the risk of accidents is notably high. Conversely, in regions with low train frequencies, where only a few trains operate daily and there is no electrical infrastructure, the installation of signaling systems poses significant challenges. In such areas, various support systems are developed and utilized to prevent accidents.

This study presents a conceptual design of a model adapted from the Radio Frequency-based Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) used in aircraft for railway vehicles, offering suggestions for low-cost and easy installation options. In addition, it has been shown that LoRa wireless communication, which is not preferred due to low bandwidth and data transmission limitations, can be used as needed.

The results of the study aim to contribute to the development of innovative solutions in railway safety by providing recommendations for the practical applicability of the system.

Keywords: Intelligent transportation systems, railway signalization, train collision avoidance system

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı özellikle büyük miktardaki yüklerin transferi için kullanılan, ekonomik ve çevre dostu bir taşıma sistemidir. Dünya genelinde demiryolu taşımacılığı yoğun bir şekilde kullanılmaya başlamadan önce, kısa ve ayrı hatlarla kendini kanıtlamış ancak zamanla kesişen yolların ve trafiğin artmasıyla tehlikeli durumları ve kazaları beraberinde getirmiştir. Kazaların önlenmesi için 1800'lü senelerden itibaren çeşitli sistemler geliştirilmiştir. Bunların ilk örnekleri zaman paylaşımı kurallarıyla başlamış, sonrasında ise telgraf sistemleri ile entegre edilerek daha ileri seviyeye taşınmıştır (Liffen, 2013). 1990'lı yılların sonlarına gelindiğinde ise sabit blok ve hareketli blok raylı sistem sinyalizasyon sistemleri geliştirilerek, daha emniyetli, daha konforlu ve insan hatasını sifıra indirgeyecek teknolojiler kullanılmıştır. Erken dönem demir yolu sinyalizasyon sistemleri, hat kenarı sinyalleri, kilitleme mekanizmaları ve blok bölümleri gibi sabit altyapıya büyük ölçüde bağımlıydı. Dönemlerinde etkili olsalar da bu sistemler, kapsam, esneklik ve insan hatası ile ekipman arızalarına karşı dayanıklılık açısından çeşitli kısıtlamalar barındırıyordu (Strang ve diğerleri, 2006). Henüz yük taşımacılığı için kullanılmaları da günümüzde sürekli haberleşmeli ve sürücüsüz raylı sistem ulaşım araçları, güvenilirliğini kanıtlamış bir şekilde yolcu taşımacılığında kullanılmaktadır (Divya ve diğerleri, 2023).

Demiryolu sinyalizasyon sistemleri yüksek emniyet kriterlerinin sağlanması gereken, kullanılan ekipmanların uzun süre hatasız çalışması esasıyla, yedekli olarak tasarlanan ve hata durumlarında dahi sistemi emniyetli bir şekilde sürdüren veya kaza olmadan durduran sistemlerdir. Bu sistemler için uygulanan emniyet standartları havacılık sektöründe uygulanan kurallara benzerdir. Farklı derecelendirme isimlendirmeleri kullanılsa da olasılık ve şiddet hesaplamaları iki sektör için de hemen hemen aynıdır (Machrouh ve diğerleri, 2012). Ayrıca, bu sistemlerde kullanılan yedeklilik ve hata toleransı, yüksek emniyet gereksinimlerini karşılamak amacıyla sürekli olarak güncellenir ve iyileştirilir. Böylece, operasyonel süreklilik sağlanırken, emniyetli işletme önlemleri her durumda geçerli olacak şekilde tasarlanır (Fatima & Aarti, 2023).

Emniyet standartlarını uygulamak için iki sektörde de sistem tasarımları yoğun ve zorlu süreçlerle yapılmaktadır. Sistematik olarak, gereksinimlerin belirlenmesi, analiz edilmesi, belirlenen aksiyonun uygulanması, bu aksiyonun doğrulanması, her koşulun testi, testlerde belirlenen hata durumlarının tespiti ve tüm bu hata senaryolarında sistemin hatada emniyetli (fail-safe) olduğunun ispatıyla, süreçler adım adım onaylanır ve kullanılabilir seviyeye getirilir. Bu emniyet kriterleri, sistem ana bilgisayarları, araç-üstü ekipmanları, saha-hattı (ray-üstü) ekipmanları, iletişim ekipmanları gibi sistemin her unsuru için gerçekleştirilmelidir. Sonuç olarak tam emniyetli bir sistem kurulumu ve idamesi yüksek maliyetlerle elde edilebilmektedir.

Uygulamada işletmeler, sistem kurulumlarını, maliyet ve kullanım dengesine göre belirler. Demiryolu ağlarında, yolcu taşıması yapılan, yoğun trafiğe sahip, kaza riskinin yüksek olduğu kısımlarda, sinyalizasyon sistemlerini tesis ederken, düşük sefer yoğunluğu olan, günde birkaç tren hareketinin olduğu veya sadece yük taşımacılığı yapılan kısımlarda ise tam emniyetli sistem yerine, belirlenen diğer kural setleri ile işleyişlerini sürdürme kararı alabilirler. Bu kural setleri, kazaları engellemek için belirlenmiş olsalar da insan faktörü ve çevre unsurlarının dahiliyle kazaların olmasını tamamen yok edememektedir (Welch & Orlando, 1983).

Tablo 1'de Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarının (TCDD), 2003 ve 2024 yıllarındaki, sinyalizasyon sistemli ve elektrik tesisli ağlarının tüm demiryolu ağlarına oranları verilmiştir (TCDD, 2024). Bu tabloya göre TCDD'nin demiryolu ağının %43'ü sinyalizasyon sistemine sahip değil ve bu değer üzerinde bir alanın ise elektrik hattına sahip olmadığı görülmektedir.

Tablo 1 – TCDD'ye ait demiryolu ağı, sinyalli ve elektrikli hat uzunluğu

	2003	2024	Tüm Ağa Oranı
Toplam Demiryolu Ağı	10.959 km.	13.919 km.	
Sinyalli Hat Uzunluğu	2.505 km.	8.046 km.	%57
Elektrikli Hat Uzunluğu	2.082 km.	7.142 km.	%51

Bu bilgilerin ışığında düşük maliyete sahip, kolay uygulanabilir yardımcı sistemler, kaza ihtimallerini en aza indirmek için işletmelerin tercih etmesi gereken çözümlerdir. Bu sayede halihazırda

kullanılmakta olan demiryolu ağ kısımlarındaki istenmeyen kaza ihtimalleri düşük seviyelere inecek aynı zamanda can ve mal güvenliği artırılacaktır. Tablo 2’de günümüzde demiryollarında sıklıkla kullanılan çarpışma önleme sistemleri ile bu çalışmada kavramsal tasarımı yapılan sistemin, uygulama süresi, kurulum ve bakım maliyetleri, emniyet seviyesi ve enerji ihtiyacı kriterlerine göre karşılaştırması sunulmuştur. Bu kriterlere göre tasarlanan sistem, hem enerji ihtiyacı ve maliyet kısıtları nedeniyle çarpışma önleyici sistem tesisi yapılamamış, kırsal bölgelerdeki demiryolu ağları için hem de görecelik sürüş prensibiyle, düşük hızla işletme yapılan şehir içi hafif raylı sistem ağları için kolayca uygulanabilir olduğu gösterilmektedir.

Tablo 2 – Demiryollarında kullanılan çarpışma önleyici sistemler ile karşılaştırma

	Aks/Teker Sayıcı	Ray Devresi	Tasarlanan Sistem
Uygulama Süresi	Uzun	Uzun	Kısa
Kurulum Maliyeti	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Düşük
Bakım Maliyeti	Yüksek	Yüksek	Düşük
Emniyet Seviyesi	Yüksek	Yüksek	Düşük
Enerji ihtiyacı	Var	Var	Yok

Bu çalışmada TCDD gibi farklı tipte trenleri, çeşitli ray-üstü taşıtları ve bakım araçları bulunan işletmelerin kullanabileceği, bir kaza uyarı sisteminin tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarımda, hava araçlarında kullanılan, transponder olarak bilinen kaza önleme sistemi (TCAS - Traffic Alert and Collision Avoidance System) referans olarak alınmıştır. TCAS, pilotların potansiyel hava çarpışmalarını önlemelerine yardımcı olmak için tasarlanmış önemli bir hava ulaşımı emniyet sistemidir. Sistem, yakınlardaki uçakları izleyerek çalışır ve TCAS ile donatılmış uçaklara sinyaller gönderir. TCAS, pilotlara potansiyel çarpışma risklerine karşı uçuş rotalarını nasıl ayarlamaları gerektiği konusunda tavsiyelerde bulunur; örneğin, uçağın tırmanmasını veya alçalmasını önerir. TCAS, uçağın kontrolünü almaz, ancak uçaklar arasındaki emniyetli mesafelerin korunmasında kritik bir rol oynar (Welch & Orlando, 1983).

TCAS’in kaideleri temel alınarak demiryolu araçları için çarpışma önleyici olarak tasarlanan ekipman, farklı tipte tren ve araçlara uygulanabilmesi için sade bir yapıda düşünülmüştür. Sadece enerji beslemesi ile araçlara uygulanarak tüm ihtiyaç duyulan çevre birimlerini kendi kontrol ünitesi ile yönetebilecek şekilde planlanmıştır. Bu ekipman araç sürücüsüne algılanan tehlikeyi sesli ve görüntülü bir şekilde ikaz ederek, oluşması muhtemel kazanın önlenmesine destek sağlayacaktır. Tasarlanan ekipman, radyo frekans iletişimi için; düşük güçlü, uzun menzilli kablosuz haberleşme sistemi olan LoRa (Long Range) kablosuz haberleşme ve ray-üstü aracın konumunun belirlenmesi için RFID (Radio Frequency Identification) teknolojilerini kullanacaktır.

RFID (Radyo Frekans ile Tanımlama) teknolojileri, ray-üstü araçların (örneğin trenlerin) konumlarının belirlenmesinde oldukça etkili bir yöntem sunar. Bu teknoloji, her araç üzerinde bulunan RFID etiketleri ve raylara yerleştirilen okuyucular sayesinde, araçların anlık konumunu izlemeyi mümkün kılar. Gerçek zamanlı veri ile araçların güzergahı takip edilirken, bakım gereksinimleri de kolayca izlenebilir. RFID sistemleri, ayrıca demiryolu ağındaki emniyeti artırır ve trafik yönetimini optimize eder. Bu sayede, demiryolu taşımacılığı daha emniyetli, verimli ve hatasız hale gelir (Zhang & Tentzeris, 2011).

LoRa (Long Range), IoT uygulamaları için düşük güç tüketimli, uzun menzilli kablosuz iletişim sağlayan bir teknolojidir. 2-5 kilometreye kadar şehir içinde, 15 kilometreye kadar ise kırsal alanlarda veri iletimi yapabilir. Özellikle düşük veri hızı ve nadiren iletişim gerektiren cihazlar için uygundur, LoRa, düşük enerji tüketimi ve zorlu ortamlarda çalışabilme avantajı ile geniş IoT ağlarında kullanımda artış göstermektedir (Augustin ve diğerleri, 2016).

1.1. Referans sistem: TCAS

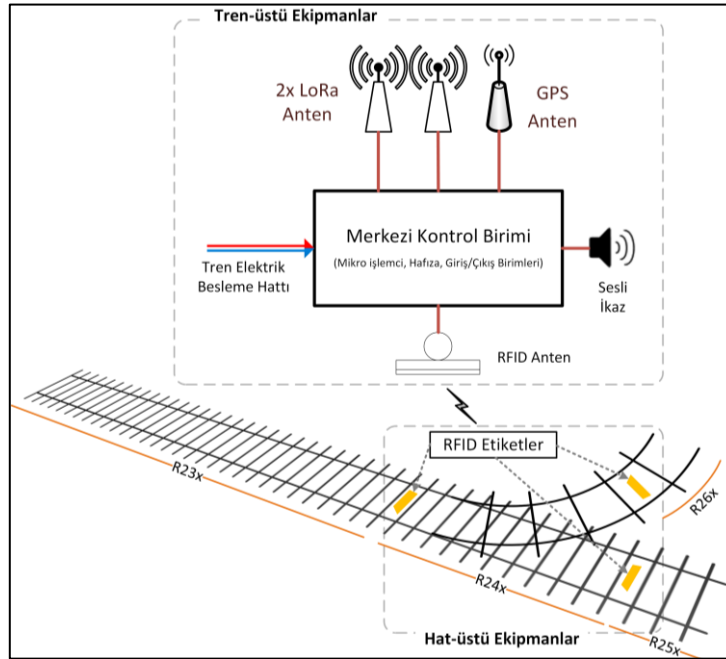
TCAS trafik uyarı ve çarpışma önleyici sistemi (Traffic Alert and Collision Avoidance System), uçaklarda bulunan çarpışma önleyici sistemidir. Sistemin sadece uyarı yapan ilk versiyonu TCAS-I, 1950’li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu versiyon belirlenen mesafelerde bir hava aracı varlığını pilota bildirmede kullanılmıştır. Günümüzde tüm hava yolu araçlarında bulundurulması zorunlu olan

ikinci versiyon TCAS-II ise uyarının yanında pilotlara dikey yönde yükselme ve alçalma yönlendirmesi yapmaktadır. TCAS-II periyodik olarak, saniyede 2 kere, çeşitli modlara göre, uçağın konumunu pozisyonunu ve hızını kablosuz haberleşmeyle diğer hava araçlarına iletmektedir (Burgess ve diğerleri, 1994). Dairesel olarak uçağın etrafındaki 14 millik bir mesafede algılama yapar. Mesafe 6 mil seviyesine indiğinde pilotlara uyarı verir ve yaklaşma sürüyorsa pilotlara dikey olarak yükselme veya alçalma yönlendirmesini yapar (Abdushkour ve diğerleri, 2018). Tasarım çalışmalarının devam ettiği TCAS-III, dikey yönde uyarılarla birlikte, sağa dön ve sola dön yönlendirmelerini de pilotlara iletecektir.

Çalışmamız hava araçlarında bulunan TCAS sisteminin demiryolu araçlarında, sinyalizasyon sistemine sahip olmayan demiryolu kısımlarında sürücülerin uyarılması ve kaza önleme sisteminin tasarımını barındırır.

2. Materyal ve Metot

Giriş bölümünde belirtildiği üzere raylı sistemlerde sinyalizasyon sistemleri oldukça karmaşık ve maliyetli sistemlerdir. Farklı tren ve araç tiplerinin olduğu, çoğu kısmında elektrik ve hatta iletişim hatlarının kapsama alanında olmayan alanlarda ise sistemlerin kurulması mümkün olmayan seviyelere inmektedir. Bu çalışmada, enerji hatlarının olmadığı, iletişim hatlarının kapsama alanı dahilinde olmayan, farklı tren, ray-üstü araç ve bakım cihazlarına kolaylıkla uyarlanabilecek bir çarpışma uyarı sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 1 - Demiryolu araçları için radyo frekans haberleşmeli kaza önleme sistemi

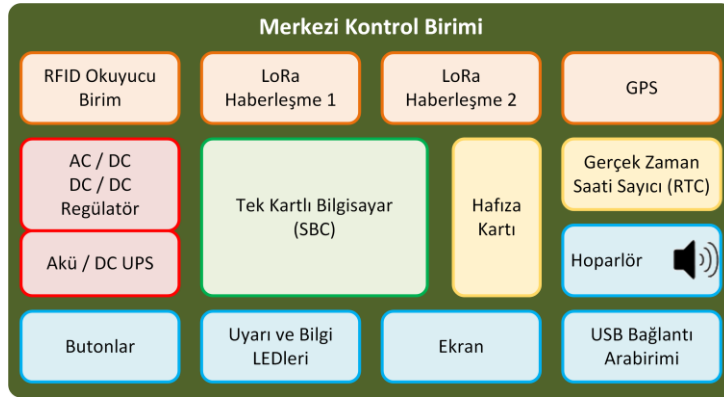
Sistemin genel tasarım şeması Şekil 1’de gösterilmiştir. Burada belirtilen her kısım aşağıdaki bölümlerde detaylandırılacaktır. Gösterilen sistem genel olarak incelendiğinde, hat-üstü ve tren-üstü olarak iki ana grupta incelenebilir. Hat-üstü ekipmanlar sadece ray bölgelerini belirlemek için kullanılan enerji gerektirmeyen (pasif) RFID etiketlerden oluşmaktadır. Sistemin tren-üstü ekipmanları ise kendi kontrol birimine bağlı olan, yedekli olarak kullanılabilir kablosuz haberleşme antenleri, RFID okuyucu birim, sesli ve görsel ikaz birimidir. Bu ekipmanlar farklı tipteki araçlara uygulanabilmesi için sadece enerji beslemesi ve kendi antenlerinin bağlantısıyla montaj edilecek şekilde tasarlanmıştır.

2.1. Merkezi Kontrol Birimi

Merkezi kontrol birimi, sistemin tüm elektronik donanımı içinde barındıran kısımdır. Bu ünite giriş çıkış portları ile tek bir noktadan tüm sistemi yönetecek şekilde tasarlanmıştır. Tren veya ray-üstü aracının sürücü kabinine montajı yapılacak olan sistem için bakır kablo ile enerji girişi ve üç adedi tavan kısmında bir adedi de araç-altı olmak üzere 4 anten için koaksiyel bağlantı birimi olacaktır. Bu bağlantılar dışında kayıt dosyalarını almak yeni versiyon yükleme gibi işlemler için bir adet, toza karşı

muhafaza kapaklı USB giriş portu da yer alacaktır. Merkezi kontrol biriminin çevre birimlerle bağlantısı bu belirtilenlerdir.

Bu birimde bulunan alt sistemler Şekil 2’de belirtilmiştir. Alt başlıklarda bu birimlerin detaylarına yer verilmiştir.



Şekil 2 - Merkezi kontrol birimi blok diyagram

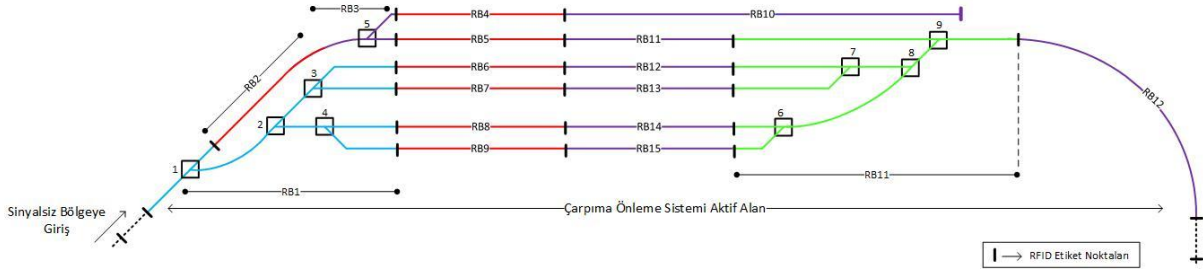
2.2. Güç Katı ve Akü Beslemesi

Merkezi kontrol birimi ve yan birimleri enerjilendirmek için bir güç devresini üzerinde barındırır. Güç devresi sistemin çeşitli platformlara uyarlanabilir olması gerekliliğinden dolayı AC ve DC geniş aralıklı kaynaklardan beslenebilir şekilde tasarlanmıştır. Güç katı girişte uygulanan gerilime göre önce 24V DC bara gerilimini sağlar ve sonrasında sistemde bulunan tüm ekipmanlara gerekli DC-DC gerilim dönüşümlerini gerçekleştirir. Aynı zamanda sistemdeki enerji kesintilerine karşı mevcut bulunan akü grubunu da kontrol eder. Enerji beslemesi sağlanıyorken aküleri şarj eder ve kesinti anında sistemin çalışmasını durdurmadan akülerde depolanan enerjiyi sisteme iletir. Bu özelliği ile bir DC kesintisiz güç kaynağı (UPS Uninterruptible Power Supply) işlevini yerine getirir. Güç katı sistem üzerinde bulunan bilgi Ledleri aracılığıyla sistemin enerji besleme girişi durumunu ve aküden beslenme durumlarını gösterir. Akü doluluk oranını ise ekran üzerinde bilgi simgesi olarak belirtmesi uygun görülmüştür.

2.3. RFID Okuyucu Birimi

RFID okuyucu birim tren veya ray-üstü araçlarının alt kısmına yerleştirilecek olan RFID anten yardımıyla, rayların arasına monte edilen RFID etiketlerini okuma görevini üstlenecektir. Bu ekipman bir okuyucu ünite ve antenden oluşmaktadır. Okuyucu ünite, merkezi kontrol birimi içinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede araçlar üzerinde minimum sayıda ekipman montajı ve kablolama ihtiyacı ergonomisi değişmemiş olacaktır. Ünite, merkezi işlem biriminden enerjisini alacak ve seri haberleşmeyle veri aktarımı yapacaktır. Bu ünite için tek kablolama ihtiyacı, araç altına montajı yapılan, RFID antene yapılacak bir koaksiyel kablo olacaktır. Koaksiyel kablo seçimi, radyo frekans sinyallerini iletme kabiliyeti yüksek olması nedeniyle önemlidir. Kabloların ekran adı verilen sinyal gürültüsünden korunma zırhları aşınmamış ve kablo kırılmamış olmalıdır. Sinyal kazancının kablo üzerinde azalacağı bilindiğinden en fazla 5 m’lik bir kablo ile bağlantı sağlanmalıdır. RFID Okuyucu antenin araç altında belli bir açı ile montajı ray-üstü ekipman olan etiketleri okuma performansını artıracaktır (Akçil ve diğerleri, 2014). Bunun için üreticinin sağladığı dokümanlar veya ilgili konudaki yayınları incelenmelidir.

RFID etiketleri ray bölgelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Tüm demiryolu ağı düşünülerek tasarım yapıldığında RFID etiketlerle ayrılmış olan ray bölgeleri aralık bırakmaksızın birbiri ardına gelmektedir. Yan yana demiryollarında araç gabarilerinin mesafeyi kırtarmadığı alanlar tek ray bölgesi olarak belirlenir. Şekil 3’te örnek bir demiryolu ağ kesiti bulunmaktadır. Bu resimde ray bölgeleri ayrı renk ve isimlerle belirtilmiştir.



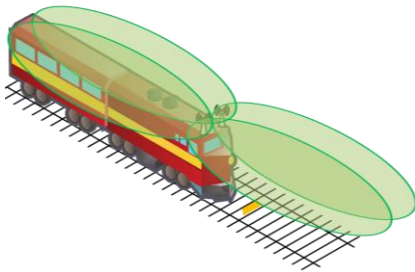
Şekil 3 - Örnek demiryolu ağ kesiti, ray bölgeleri ve RFID etiket yerleşimi

2.4. Kablosuz Haberleşme (LoRa) Birimleri

Kablosuz haberleşme için LoRa haberleşme donanımları seçilmiştir. LoRa düşük güç enerji gereksinimi olan ve yüksek iletim menziline sahip bir haberleşme ortamıdır. LoRa kablosuz haberleşmesi ülkelerin belirlemiş olduğu lisanssız frekans bantlarını kullanmaktadır. Ülkemizde, Avrupa standartlarına uygun olarak 863 – 870 MHz frekansları arasında çalışmaktadır. LoRa düşük güç tüketimi ve yüksek menzil iletim imkanını, iletim hızı ve bant genişliği kabiliyetlerini düşük tutarak sağlamaktadır (Erkan ve diğerleri, 2022). Lora ile yapılan çalışmalar kontrol edildiğinde şehir içi alanlarda 2-3 km'lik menzillerde iletişim kurabilmektedir. Şehir dışı alanlarda ise veri hızı kademeli olarak düşerek 10 km'nin üzerinde çıkmaktadır (Villarim ve diğerleri, 2019). Bant genişliği iki anten arası en uzak mesafelerde, saniyede 290 bit, yakın mesafelere ise saniyede 50 kilobitler seviyesine veri iletimi yapmaktadır. İletişim hesaplaması yapılırken bu bant genişliği değerlerine, iletilecek olan gerçek mesaj (payload), mesaj başlangıç ve mesaj bitiş kodlamaları, mesajın şifrelenmesi için gerekli bitler ve mesajın doğru şekilde iletildiğinin kontrolü için kullanılan bitler dahil edilmeli, zaman ekseninde uygun bir planlamayla haberleşmenin sağlanması gerekir.

Kavramsal tasarımı yapılan sistemde, haberleşmenin sürekliliği için iki adet LoRa haberleşme birimi kullanılmıştır. Bu haberleşme birimlerinden biri sürekli dinleme yaparken diğeri de periyodik olarak oluşturulan mesajı yayın yapacak şekilde kurgulanmıştır. Aynı araçta bulunan sistemin kendi yayın anteninden gönderdiği mesajı kendi dinleme anteni ile almasıyla sistemin çalışma sağlık durumunun kontrolü de sağlanmış olacaktır. Tasarımda ray-üstü araçların tümünde kullanılacak iki-yönlü (bi-directional) yayın yapan antenler seçilecektir. Bu iki-yönlü yayın tipiyle

Şekil 4'te gösterildiği gibi, ray hattı doğrultusunda iletim sağlanması hedeflenmiştir. Araç üstü montajın en aza indirilmesi için antenlerden biri tek kılıf içinde iki adet anten bulunan ürünlerden tercih edilecektir. Bu antenler uygun frekans bantlarına göre tasarlanır ve Şekil 5'te gösterilen şekilde ayrı koaksiyel kablolarla kendi sistemlerine bağlanır. Araç üstünde bir anten sadece LoRa sinyalleri için kullanılacakken (Şekil 6), diğeri hem LoRa hem GPS sinyalleri için kullanılacaktır (Şekil 5).



Şekil 4 - İki yönlü antenlerin kapsama alanı doğrultuları



Şekil 5 - LoRa, GPS bütünlük anten



Şekil 6 - LoRa, anten

LoRa haberleşmesi, lisanssız frekans bandını kullandığı için birtakım kurallara göre kullanılması gerekmektedir. Bu bandı kullanmak isteyen kullanıcılar için hattın meşgul edilme oranı %1 (duty cycle) olarak belirlenmiştir. Bu, bir birim süre boyunca iletim yapan bir haberleşme noktasının 99 birim süre boyunca yayın yapmadan beklemesi anlamına gelir (Carlsson ve diğerleri, 2018). Bu durumda yayın yapılacak verinin boyutu havada iletilme zamanını belirleyeceği için önemli hale gelecektir. LoRa, düşük güçte uzun menzille haberleşme imkanını düşük bant genişliğiyle sağladığını belirtmiştik. LoRa

arabirim ile iletilecek verinin boyutunu, olması gereken en küçük yapıda tasarlayarak mesaj iletim periyodunu sıklaştırmak hedeflenmiştir. Tablo 3'te belirtildiği üzere LoRa ile iletilecek mesaj yapısı toplam 10 Byte olarak belirlenmiştir. İletilecek bu 10 Byte veri payload olarak isimlendirilmektedir.

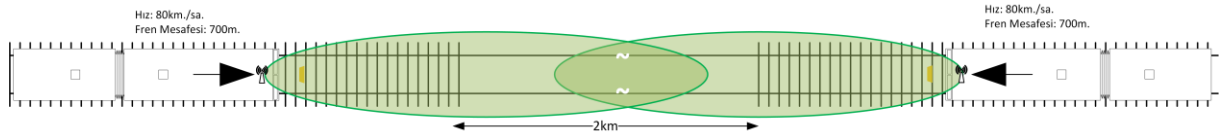
Tablo 3 – Kablosuz haberleşme mesaj yapısı

Payload				
Tren No	Ray Bölgesi	Geçilen Ray Bölgesi	Rezerve	Veri Kontrol
2 Byte	2 Byte	2 Byte	2 Byte	2 Byte
10 Byte				

Bu veriye LoRa haberleşme altyapısı gereği başlangıç ve bitiş bitleri, iletilecek kanal numarası, iletim yapılacak hedef adresleri gibi 5 Byte'lık bir veri eklemesi daha yapılır. Bu şekilde toplamda 15 Byte'lık verinin iletim süresinin hesaplanması gerekir. Hesaplama için internet üzerinden oluşturulmuş hesaplama araçları kullanılmıştır.

Demiryollarında sinyalizasyon sistemlerine sahip olmayan kısımlarında daha çok şehir merkezlerinden uzak, nüfusun ve dolayısıyla kablosuz haberleşme trafiğinin az olduğu bölgeler olacağı varsayılarak, yayılma faktörü yüksek veri taşıma kapasitesine sahip, SF7 (Spreading Factor) 250Khz bant genişliği olarak seçilmiştir (Yasintimur & Tavas, 2021). Hesaplama aracı kullanılarak Toplam 15 Byte verinin havada iletilme süresi 23 ms olarak bulunur (Arjan, 2024). Bu da %1 hat meşguliyeti oranıyla, 2,3 saniyede bir veri iletimi yapılabilmesi anlamına gelir.

Raylı sistemlerde araçların ve özellikle yük trenlerinin durma mesafeleri, yol eğimi, frenleme ivmeleri, katar ağırlıkları hesaplanarak, o yol için yapılabilecek en yüksek hız limiti belirlenir. Sinyalizasyon sistemine sahip olmayan hatlar için duruş mesafesi en yüksek 700 metre olarak belirlenmiştir (Raylı Sistem Teknolojisi, 2013). Aynı zamanda demiryolu ağlarında sinyalizasyon sistemi olmayan bölgelerde uygulanabilecek en yüksek hız 80 km/saat olarak belirlenmiştir.



Şekil 7 – Uyarı senaryosu örneği: karşılıklı yaklaşma

En kötü durum senaryosu olarak, Şekil 7'deki gibi karşılıklı olarak birbirlerine yaklaşmakta olan iki aracın çarpışma senaryosu ele alınmıştır. Bu senaryoda yine en kötü durum koşulları olarak maksimum sürat ve frenleme mesafesi yukarıda belirtildiği gibi en yüksek limitlerde seçilmiştir. Ele alınan senaryodaki verilerle, sistemdeki kablosuz haberleşmeden ve insan faktöründen kaynaklanabilecek tüm gecikmeleri hesaplayarak araçların kapsama alanı içince kaza meydana gelmeden araçların emniyetli bir şekilde durdurulması incelenmiştir.

LoRa haberleşmesiyle coğrafi engelleri de göz önünde bulundurarak ray hattı doğrultusunda en az 2 km'lik kapsama alanı oluşmaktadır. LoRa haberleşmesinin 2,3 saniyede bir yapılabilmesi ve tehlike algılandığı anda ikazla birlikte sürücünün reaksiyon süresinin 3 saniye olarak kabul edilmesiyle toplamda 5,3 saniyelik gecikmenin olabileceği ön görüşmüştür. En fazla 80 km/saat hızla gidilebilecek bir aracın 5,3 saniyelik sürede yaklaşık, 118 metre yol kat edeceği hesaplanmış olur. Bu uzunluğa yol eğimi ve katar ağırlığı ile belirlenmiş olan en çok 700 metrelik frenleme uzunluğu da eklendiğinde toplamda 818 metrelik bir mesafe ortaya çıkar. En kötü senaryo olarak iki aracın da aynı şekilde karşılıklı olarak yaklaşma durumu için bulunan değer ikiyle çarpılır. Hesaplamalar sonucunda 1636 metrelik bir yaklaşım bulunur. Bu mesafe hesaplama yaptığımız şehir içinde olabilecek en dar kapsama alanı olan 2 km'lik alanın, yeterli ve emniyetli bir şekilde çarpışma önlemeyi başarabileceğini belirtmiş olur.

2.5. GPS ve Gerçek Zaman Sayacı

Küresel konumlama sistemi (GPS – Global Positioning System) içeriğindeki çok kanallı kablosuz haberleşme ile dünya etrafında dolaşmakta olan uydulardan birkaç tanesi ile haberleşerek bulunduğu konumu yüksekliği ve zaman bilgilerini tayin eder. GPS en az 3 uydu ile haberleşerek x, y, z eksenlerindeki konumunu tayin eder. Bağlandığı uydu sayısının artması konumunun doğruluğunun artması için ihtiyaç duyulan bir durumdur (Özbulat ve diğerleri, 2022). Tasarımını yapmış olduğumuz sistemde, GPS teknolojisinin sadece zaman verisini kullanarak, gerçek zaman sayacı biriminin düzeltme işlemi yapılacaktır. Bu sayede titreşim ve elektronik gürültü kaynaklı saat sapmalarının düzeltilmesi sağlanacaktır. Sistemin uygulandığı tüm tren ve araçlarda aynı zaman değerinin olması, veri kayıtlarındaki hata takibi açısından çok önemlidir. Sistem periyodik olarak GPS uydularından aldığı zaman bilgisiyle dahili gerçek zaman sayacı verisini eşitleyerek düzeltmeyi uygular. Günümüzde ticari olarak kullanılan GPS ürünlerinin hata oranı nedeniyle bu birim kullanılarak araç konumunun tayin edilmesi istenmemiştir. GPS'in diğer kabiliyetleri ile tasarlanan sistem için ek özelliklere çalışmamızın, 3. Bulgular ve Geliştirme Alanları başlığında değinilmiştir, Merkezi kontrol birimi elektronik kartı üzerinden bir modül olarak tasarlanmıştır. Bu modülün düzgün çalışması gerekli olan GPS anteni, araç üstüne monte edilmelidir. Bu kısımda da araç üzerine en az sayıda montaj ergonomisi nedeniyle, Başlık 2.4'de belirtildiği ve Şekil 5'te gösterilen, tek kılıf içerisinde bütünleşik RF – GPS anten ürünü seçilmiştir.

2.6. Sesli ve Görsel İkaz Birimi

Sesli ve görsel ikaz birimi, merkezi kontrol birimiyle bütünleşik olarak tasarlanmıştır. Bu kısımda ses şiddeti artan bir hoparlör, tehlike hakkında bilgi veren ekran ve LED aydınlatma bulunmaktadır. Arıza durumunu onaylamak ve ikazı sonlandırmak için cihaz üzerindeki butonlardan biri kullanılacaktır. Bilgi ekranı, uyarı durumu olmadığında geçilmiş ve girilmiş olan ray bölgesi kodlarını ekranda gösterecektir. Her bir ray bölgesi geçişinde ekran aydınlatması bir süre tam parlaklıkta yanacak ve sonrasında tekrar kısık olarak beklemeye girecektir. Ekran üzerinde verilen bu bilgilerle sürücüye, sistemin sağlık durumu da bildirilmiş olmaktadır.

2.7. Tek Kartlı Bilgisayar, Hafıza Kartı ve USB Bağlantı Arabirimi

Tek kartlı bilgisayar (SBC – Single Board Computer), üzerinde işlemci, giriş çıkış portları, geçici hafıza birimlerinin bulunduğu bir donanımdır. Sistemimizde Linux işletim sistemini kullanan bir SBC seçilmiştir. Program giriş-çıkış portlarını sürekli dinleyerek verileri toplar, almış olduğu verileri algoritmasına göre işler ve çıkış üretir. Birden fazla seri haberleşme kanalları ile, RFID okuyucu ünite, LoRa haberleşme modülleri, GPS, gerçek zaman sayacı, hafıza kartı, ekran ve USB bağlantı arabirimiyle iletişimi sağlar. Butonlardan veri okuma ve LED'leri yönetme işlemini paralel portları üzerinden gerçekleştirir. Ek olarak analog çıkış portu üzerinden de sistem hoparlörüne ses çıkışı verir.

2.8. RFID Etiketler

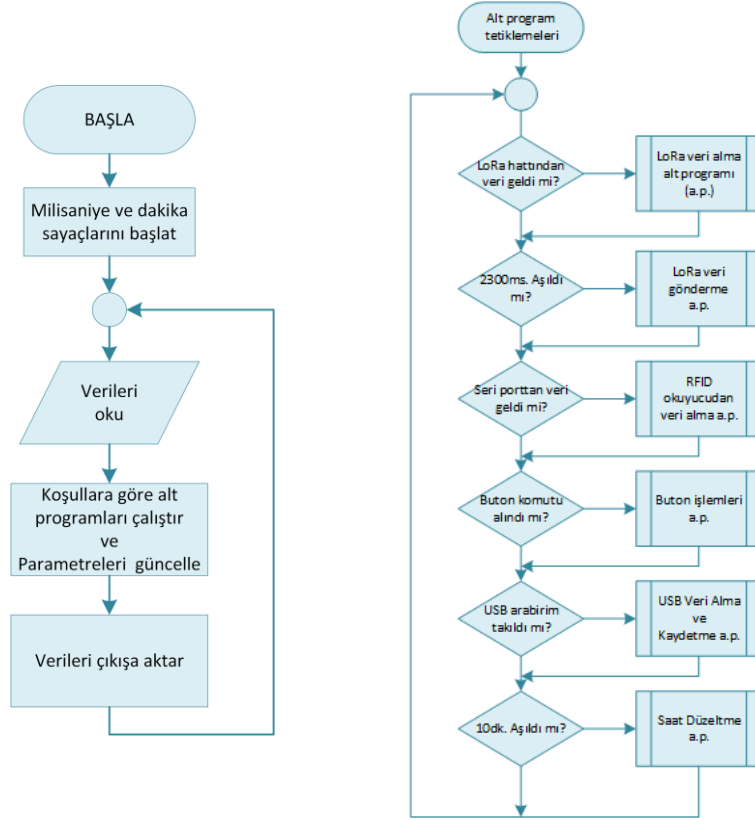
Tasarlanan sistemin ray-üstü ekipman tarafında bulunan tek unsuru RFID etiketlerdir. Özellikle demiryolu ağının elektrik altyapısına sahip olmayan kısımları hesap edilerek, enerji ihtiyacı olmayan, pasif RFID etiketler seçilmiştir. Bu etiketlerin her biri kendine özgü tanımlama (ID) numaralarını barındırmaktadır. Aynı zamanda belli bir hafıza bölgesine sahip olan etiketlere veri yazıp okuma imkânı da bulunmaktadır. Bu özellik sistemin geliştirmeye açık kısımlarında ele alınacaktır. RFID etiketler bir düzen dahilinde demiryolu ağına uygulanarak sinyalizasyona sahip olmayan bölgelere girişte, bu bölgelerde seyir esnasında ray bölgeleri değişimlerinde, makas bölgelerinde, tekrardan sinyalizasyona sahip bölgelere girişte olmak üzere montaj edilir.

Sistem LoRa haberleşme yayını da bu etiketlerin başlangıç ve bitiş durumlarına göre yapacaktır. Hat başlarında ve sonlarında veya çok uzun ray bölgelerinde tekrarlayıcı etiket konularak sistem hassasiyeti artırılır. Şekilde örnek etiketler ile ray bölgeleri dağılımı numaralandırılması gösterilmiştir.

2.9. Program Modülleri ve Yazılım Akış Şeması (Algoritma)

Sisteme ait yazılım tasarımı, tek katlı bilgisayar birimi üzerinde çalışacak ve tüm giriş çıkış birimlerini yönetecektir. Tek kartlı bilgisayarlarda kullanılan işlemci birimleri çok hızlı işlem yapma kabiliyetine sahiptir. Bu işlemler hızlıca yapıp kullanılmak üzere parametrelere kaydedilir. Ana program periyodik

olarak her döngüde parametreleri okur, koşullara göre alt programları işler ve çıktı üretmek üzere parametreleri günceller, son adımda ise parametrelere göre çıkış işlemleri gerçekleştirilir. Program yapısında, tetiklenen ve kendi fonksiyonlarından çağrılan olmak üzere iki farklı tipte alt programlardan oluşmuştur. Sayaç aşımaları ve dış dünyadan tetiklenerek işlenen alt programlar sürekli olarak takip edilir. Yüksek işlem kapasitesine sahip bilgisayarlar sayesinde tüm program akışı mikro saniyeler içinde tamamlanmaktadır. Şekil 8’de ana program ve alt program tetikleme akış diyagramları (algoritma) gösterilmiştir.



Şekil 8 – Ana program ve alt program tetikleme akış diyagramı (algoritma)

Algoritmada belirtilen alt programlar ise Şekil 9’de gösterilmiştir. Yazılım modüllerine ait gereksinimler ve çalışma mantığı bu bölümde detaylandırılmıştır.

Saat Düzeltme	Veri Kodlama ve Kod Çözme	Ekran Yenileme
İşlem, Komut ve Olayları Kaydetme	RFID Okuyucudan Veri Alma	Dahili Test
Lo-Ra Veri Gönderme	Buton İşlemleri	USB Veri Alma ve Kaydetme İşlemleri
LoRa Veri Alma	Uyarı ve İkaz İşlemleri	Demiryolu Araçları Çarpışma Uyarı Sistemi

Şekil 9 – Sisteme ait program modülleri

- **Saat düzeltme;**

Saat bilgisi GPS modülü üzerinden alınmış olan saat bilgisi ile sistemde bulunan gerçek zaman sayacının saatinin düzeltilmesiyle olacaktır. Sistem aktif olduğunda 10 dakikalık aralıklarla GPS sinyalindeki saat

verisini gerçek zaman saati verisi üzerine kaydeder. Yapılan üzerine yazma işlemi veri kayıt fonksiyonu ile kayıt defterine eklenir.

- **Veri Kodlama ve Kod Çözme;**

Antenden alınan veriler öncelikle paket bütünlüğü kontrolünden geçer, bu aşamadan doğru bir şekilde geçen veriler için bir şifreleme anahtarı aracılığıyla kod çözüm işleminden geçer. Bu şifreleme anahtarı sisteme yapılması muhtemel yetkisiz müdahaleleri engellemek içindir. Kod çözme işlemi sonrada veri bütünlüğü ve alınan mesajın kaynağı doğrulanmış olur. Veri bütünlüğünün sağlanmadığı ve şifreleme anahtarı ile kod çözme işlemi başarısız olan paketler kabul edilmez ve işleme dahil edilmez.

- **Ekran Yenileme;**

Sistemin hazırda bekleme durumunda ekranında, sağlık durumu, batarya doluluk oranı, enerji besleme veya bataryadan çalışma durumu, geçilmiş ve içinde bulunulan ray bölgesi bilgileri bulunur, Aynı zamanda sistem butonlarına atanmış olan görevler ekranda kısaltma şeklinde gösterilerek kullanıcıya yönlendirme yapar.

- **İşlem, Komut ve Olayları Kaydetme;**

Sistemdeki her olay, veri alma, veri yazma, buton işlemleri, saat düzenleme işlemleriyle birlikte veri kayıt fonksiyonu çalıştırılır. Bu kayıtlar sistemde bulunan sd kart üzerine text dosyası olarak kaydedilir. İhtiyaç halinde veri kayıtları USB birim üzerinden dışarıya aktarılabilir.

- **RFID Okuyucudan Veri Alma;**

Sisteme seri haberleşme arabiriminden bağlı olan RFID okuyucu birim, üzerinden geçilen ve ray bölgelerini belirleyen RFID etiket bilgisini gönderir. Bu bilgi alındıktan sonra işlemci birim kendi program rutinini uygulamaya devam edecektir.

- **Dahili Test;**

Dahili test sistemde bulunan butonları, LED ışıklarını, ekranı, LoRa Haberleşme birimini RFID okuyucu birimi ve sesli uyarı birimlerini kontrol eder. Test modu bir buton komutu ile başlatılır, Butonların test edilmesi için her butona basılmasını bekler ve ekrandaki yönlendirmeler ile sürdürülür.

- **LoRa Veri Gönderme;**

Bu modül gönderilecek veri paketinin oluşturulmasını sağlar. Veri paketi, sistemin çalışması, veri bütünlüğünün kontrolü, veri kaynağının analiz edilmesi gibi nedenlerden dolayı bir sistematığe göre oluşturulmalıdır. Detaylandırmak gerekirse iletilecek mesaj verilerin yan yana dizilmesiyle oluşturulur. Mesaj için belirli boyut sınırları koymak iletim hızı için önemlidir. Mesaj şifreleme anahtarıyla şifrelenir. Şifrelenmiş olan mesaj yapısının başına ve sonuna ilaveler yapılır. Bu ilaveler mesajın hedefini, boyutunu ve doğruluğunu kontrol etme amacıyla yapılır. Mesajın bozulmadan doğru şekilde iletilmesi ve alıcılara ulaşmasında güvenlik kavramı, donanım ve yazılım olarak bir bütün olarak ele alınmalıdır (Avcı ve diğerleri, 2022).

- **LoRa Veri Alma;**

Veri alma kısmında ise LoRa modülü çalışma frekansı ve kanalındaki tüm verileri dinler. Almış olduğu mesaj paketini önce veri doğrulama eklerini hesaplayarak verinin tam ve doğru olarak alındığını tespit eder. Sonra mesajın başına ve sonuna eklenmiş olan kısımlarında ayırma ve gerçek mesajın kod çözme adımlarını işletir. Alıcı ve vericide önceden belirlenmiş, aynı anahtar kullanılarak kodlama ve kod çözme işlemleri yapılır. Bu sayede alınan veri sadece gerçek vericiden çıktığında ve gerçek alıcıya ulaştığında anlamlı bir mesaj ortaya çıkar.

- **Buton İşlemleri;**

Cihaz üzerinde ekranın alt kısmına konumlandırılan butonlara ait eylemler, değişken olarak ekranın alt satırında belirtilecektir. Butonlar kullanılarak; ikaz onaylama, alarm susturma, dahili test başlatma, sistemi yeniden başlatma, USB arabirim ile verileri dışarı aktarma ve şifreleme anahtarını değiştirme eylemlerini gerçekleştirecektir.

- **İkaz ve Alarm İşlemleri;**

Sistemde bulunan hoparlör aracılığıyla iki ayrı tonda ikaz ve alarm verilebilecek şekilde tasarlanmıştır. İkaz uyarı sesi ilk verildiği anda kısık seviyeden başlayarak ikaz onaylama butonuna basılmadığı sürece ses şiddeti artacak şekilde kurgulanmıştır. Alarm uyarısı ise en yüksek ses şiddeti ile sürücünün anında eyleme geçmesini sağlayacak şekilde planlanmıştır.

- **USB Veri Alma ve Kaydetme İşlemleri;**

USB bellek ile USB arabirim üzerinden veri alma ve yeni şifreleme anahtarı kaydetme işlemleri yapılması planlanmıştır. USB Bellek cihaz üzerindeki USB arabirime takıldığında ekran üzerinde iki buton için eylemler değişerek, “Dışa Aktar”, “Şifre Değiştir” yönlendirmeleri yer alır. Kullanıcı bu butonlar yardımıyla yapmak istediği işlemi seçer ve sonraki aşamalar için ekran üzerinden yönlendirmeler devam ettirilir.

3. Bulgular ve Geliştirme Alanları

Çalışmada gerçekleştirilen sistem tasarımı kolay ve hızlı şekilde üretilmesi ve kullanılması için, emniyet kriterlerini göz ardı etmeksizin en sade şekliyle planlanmıştır. Kullanıma başlanması ardından sistemde geliştirilmesi mümkün olacaktır. Sistem hesaplamalar ile doğruluğunu kanıtlaya da belli bir süre kullanılarak, sorun yaşamaksızın elde edilen sonuçlarla “Kullanımda Kanıtlanmış” (Proven in Use) seviyesine erişecektir.

Sistemde bulunan bazı ekipmanların tüm işlevleri kullanılmamıştır. Bunlar ileride ihtiyaç durumunda kullanılması amacıyla bu başlık altında derlenmiştir.

GPS biriminin sadece zaman bilgisinin kullanıldığı sistemde, geliştirme imkânı olarak kat edilen mesafe ve hız bilgilerinin kullanılması olabilir. Hata oranları nedeniyle konumlama amacıyla kullanılması uygun olmayan sistemin hız bilgisi ve yer değişiminin hesaplanmasıyla girilen ray bölgesinden kaçınıcı metrede olduğu bilgisi de kablosuz haberleşme ile iletilmesi çarpışma ihtimali algılanan durumlarda sürücülere çeşitli seviyelerde ikaz verebilir. Yine hız bilgisi kullanılarak tutulan kayıt defteri incelemelerinden, hattın hız sınırı ihlalleri raporlanabilir.

RFID etiketlerinin ise sadece kendilerine özgü numaraları kullanılarak ray bölgeleri tayin edilmiştir. Bu etiketlerin aynı zamanda küçük hafıza alanları da mevcuttur. Bu alanlar üzerinden geçen trenler veri olarak mevcut tren numarasını ve anlık saati kaydedebilir. Bu sayede bir sonraki araç üzerinden geçtiği etiketteki bu bilgileri okuyarak bir önceki aracın numarasını ve geçiş saatini öğrenmiş olur. Aynı zamanda kendinden sonraki tren için de kendi bilgilerini etikete kaydeder.

Sistemin geliştirme yönleri için kullanılması amacıyla mesaj yapısına 2 Byte’lık veri alanı rezerve olarak eklenmiştir.

4. Sonuçlar

Çalışmamızda demiryolu ağlarında kullanımı kolay ve hızlı uygulanabilir bir çarpışma uyarı sistemi kavramsal tasarımı yapılmıştır. Bu sistem ray üzerinde giden her türlü araca uygulanabilir şekilde tasarlanmıştır. Donanıma ait tüm bileşenler tek bir kasa içerisinde olacak şekilde düşünülmüştür ve farklı tipte araçlara rahatça uygulanabilmesi hedeflenmiştir. Sisteme ait antenlerin araç üzerinde montajını kolaylaştırmak için bütünsel anten ürünleri kullanılmıştır.

Sistem, RFID, LoRa, GPS, RTC, gibi farklı teknolojik bileşenleri bir uyum içerisinde yöneterek ileriye dönük geliştirilebilir bir ortam oluşturmuştur.

LoRa kablosuz haberleşme protokolü düşük bant genişliği ve lisanssız frekansları kullanmasından ötürü, iki veri iletimi arasında beklenmesi gereken sürenin uzun olması nedeniyle periyodik iletişimi gerektiren uygulamalardan kullanılmamaktadır. Bu protokolün yer aldığı sistemler genellikle günde birkaç veri iletimi yapan sistemlerdir. Bu şekilde kullanım da veriler, gün boyu toplanarak depolanır ve mesaj boyutu yüksek olsa da bir seferde büyük veriyi iletmeyi amaçlarlar. Çalışmamızda ise, ihtiyaç duyulan sistem oldukça sade düşünülmüş, veri boyutu küçük tutulmuş, iletim için gerekli süre hesaplanarak %1’lik hat meşgulliyet oranına göre en kötü senaryodaki, en fazla sürat yapan iki aracın birbirine doğru yaklaşma durumu hesaplanarak, sistemin uyarısı sonucunda, çarpışmadan en az 300 metre mesafe kalacak şekilde araçların emniyetli bir şekilde durdurulmasını sağlamıştır. Bu kullanım şekliyle LoRa

haberleşmesi adil kullanım kurallarını ihlal etmeden istenilen verileri iletebilecektir ve sistemde uzun mesafeli kablosuz iletişim ihtiyacını sorunsuz karşılayacaktır.

Tasarlanan bu ilk model kullanıcılar tarafından kolay kullanılabilir şekilde tasarlanmış ve yazılımı da bu hedef doğrultusunda oluşturulmuştur. Bu çalışma doğrultusunda ön prototip tasarımı yapılabilecektir. Prototip sistemin kullanıcılar tarafından test edilmesi ve beğenilmesi durumunda, sahadan gelecek geliştirme talepleriyle, geliştirilmesi ve tüm araçlara uygulanması mümkündür.

Çalışmamız kapsamında tasarlanan çarpışma uyarı sistemi, yalnızca teorik bir çözüm sunmakla kalmamış, aynı zamanda mevcut teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılmasıyla pratik bir uygulama zemini oluşturmuştur. Elde edilen bu sistem kullanılarak, demiryolu ağlarında sinyalizasyon sistemine sahip olmayan ve hatta elektrik tesisi yapılmamış tüm alanlarda işletmenin emniyetli bir şekilde yapılması, can ve mal güvenliği korunması sağlanacaktır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışmada herhangi bir destek alınmamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

Abdushkour, H., Turan, O., Boulougouris, E., & Kurt, R. E. (2018, 08 22). Denizcilik ve Havacılıkta Çarpışma Önleme Sistemlerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. *GMO-Shipmar*(212), 20-32.

Akçil, L., Kurtkaya, M., Dağlı, M. A., & Özmal, K. (2014). An RFID Supported Train Tracking System for Tram Lines. *IFAC Proceedings*, 46(25), 129-132. <https://doi.org/10.3182/20130916-2-TR-4042.00024>

Arjan, a. (2024, 09 02). *Airtime calculator for LoRaWAN*. GitHub. <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/eu868/10,5>

Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466-1473. <https://doi.org/10.3390/s16091466>

Avcı, İ., Özarpa, C., Özdemir, M., Kınacı, B. F., & Kara, S. A. (2022). Akıllı ulaşım araçlarında siber güvenlik ve çok katmanlı güvenlik önlemi. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(1), 22-35. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1034370>

Burgess, D. W., Altman, S., & M.L., W. (1994). TCAS: Maneuvering Aircraft in the Horizontal Plane. *The Lincoln Laboratory Journal*, 7(2), 295-312.

Carlsson, A., Kuzminykh, I., Franksson, R., & Liljegren, A. (2018). Measuring a LoRa Network: Performance, Possibilities and Limitations. *NEW2AN ruSMART 2018*. St.Petersburg, Russia: Springer, Cham. https://doi.org/doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_11

Divya, A. L., Kumar, P. R., & Krishna, R. (2023). Revolutionizing the train collision avoidance system- An Indigenous practical implementation System. *Industrial Engineering Journal*, 52(6), 231-239.

Erkan, E., Fidan, Ş., & Oğraş, H. (2022). LoRa Modulation based Soccer Pitch Lighting System Application. *Gazi University Journal of Science*, 10(2), 203-215. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1031783>

Fatima, M., & Aarti, R. (2023). Train Collision Avoidance System (TCAS) for Safety Enhancement in Indian Railways. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 10(10), d562-d566.

Liffen, J. (2013). Telegraphy and Telephones. *Industrial Archaeology Review*, 35(1), 22-39. <https://doi.org/10.1179/0309072813Z.00000000014>

Machrouh, J., Blanquart, J.-P., Baufreton, P., Boulanger, J.-L., Delseny, H., Gassino, J., Ladier, G., Ledinet, E., Leeman, M., Astruc, J.-M., Quéré, P., Ricque, B., & Deleuze, G. (2012). Cross domain comparison of System Assurance. *Embedded Real Time Software and Systems (ERTS2012)*. Toulouse, France: Embedded France. https://www.researchgate.net/publication/228446034_Cross_domain_comparison_of_System_Assurance

Özbulat, Ö., Yaşar, Ş. Ş., & Tiryakioğlu, İ. (2022). Hassas Nokta Konumlama Yönteminde GNSS Ölçü Süresi-Konum Doğruluğu İlişkisinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 814-823. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1105538>

Raylı Sistem Teknolojisi. (2013). *Fren Dinamiği ve Seyir Süresi*. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı.

Strang, T., Meyer zu Hörste, M., & Gu, X. (2006). A Railway Collision Avoidance System exploiting Ad-hoc Inter-Vehicle Communications and GALILEO. *13th World Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services (ITS 2006)*. London. <https://elib.dlr.de/44434/>

TCDD. (2024, 08 05). *TCDD - Hakkında*. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları. <https://www.tcdd.gov.tr/kurumsal/hakkinda>

Villarim, M. R., Luna, J. V., Medeiros, D. d., Pereira, R. I., Souza, C. P., Baiocchi, O., & Martins, F. C. (2019). An Evaluation of LoRa Communication Range in Urban and Forest Areas: A Case Study in Brazil and Portugal. *Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. Vancouver, BC, Canada: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2019.8936194>

Welch, J., & Orlando, V. (1983). *Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS): A Functional Overview of Minimum TCAS II*. Lincoln Laboratory Massachusetts Institute Of Technology Lexington. https://archive.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Welch_1983_ATC-119_WW-15318.pdf

Yasintimur, S., & Tavas, V. (2021). *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20(2), 297-313.

Zhang, X., & Tentzeris, M. (2011). Applications of Fast-Moving RFID Tags in High-Speed Railway Systems. *International Journal of Engineering Business Management*, 3(1), 27-31. <https://doi.org/10.5772/45676>