



## Demiryollarında Akıllı Ulaşım Sistemi Çözümleri için Bir Öneri: Dijital Demiryolu

Hasan Burak GÖKÇE<sup>\*1</sup>, Serhan SUBAŞI<sup>2</sup>, Ercan KIZILAY<sup>2</sup>,  
Ahmet Ertuğrul HACİCAFEROĞLU<sup>2</sup>, Sami Özge ARIOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş., İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Yapı Merkezi İDİS A.Ş., İstanbul, Türkiye

\*burak.gokce@ym.com.tr

(Alınış/Received: 01.06.2023, Kabul/Accepted: 06.07.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

**Öz:** Yeni bir hat inşaatı yerine rehabilite edilmiş mevcut hatlar üzerinde sensörler, yapay zekâ, büyük veri, ve nesnelerin interneti gibi teknolojilerin kullanımı ile gerçekleştirilecek dijitalleşme hamleleri; demiryollarının rekabetçiliğini ve sürdürülebilirliğini arttıracaktır. Çalışmada, bir dijital demiryolunda bulunması gereken ana ve alt bileşenler aktarılmış olup seçilen bazı bileşenler için yerli olarak geliştirilmiş ve üretilmiş, yurt içi ve yurt dışında, saha ve laboratuvar uygulamaları tamamlanmış, alanında ilkler içeren örnekler sunulmuştur. Demiryollarımızda ilk kez uygulanan deprem uyarı sistemi ile bölgede yaşanan bir deprem ile ilgili öncü bilgiler operatörlere başarıyla ulaştırılmıştır. Prototip olarak geliştirilen yerli akıllı travers üzerindeki sensörler ile zemindeki ani boşalmalar, hat veya araçtaki bakım gereksinimleri rahatlıkla tespit edilebilecektir. Yine ülkemizde geliştirilen ve ihraç edilen çevresel kontrol sistemi ile kasıtlı eylemler önlenmekte ve demiryolu araç yönetim sistemi ile bakım planlamaları iyileştirilmektedir. Sonuç olarak, tüm bileşenleriyle hayata geçirilecek bir dijital demiryolu; kapasitede %35'e varan artışlar, emniyet ve güvenlikte %50'ye varan iyileşmeler, işletme ve bakımda %25'e kadar azalan maliyetler sağlayabilecektir.

**Anahtar kelimeler:** Demiryolu, Dijitalleşme, Modernizasyon, Demiryolu araçları, Sensörler

### A Proposal for Intelligent Transportation System Solutions in Railways: Digital Railway

**Abstract:** Instead of constructing a new railway line, digitization on rehabilitated lines that can be realized through information technologies such as sensors, artificial intelligence, big data and internet of things on rehabilitated existing lines will increase competitiveness and sustainability of railways. In this study, main and sub-components of a digital railway are described. Then, national and international field and laboratory applications of some selected components that are domestically developed and produced and include firsts in their field, are presented. With the earthquake warning system implemented for the first time in our country's railways, pioneering information about an earthquake in the region was successfully delivered to the operators. Sudden discharges under sleepers, maintenance needs on the line or rolling stock will be easily detected with the smart sleeper developed as a prototype. Deliberate actions are prevented through environmental control system which is locally developed and exported, whereas improved maintenance planning is realized through vehicle management system. As a result, with a digital railway that will be implemented with all its components; up to 35% increases in capacities, up to 50% improvements in safety and security, and up to 25% reduced costs in operation and maintenance can be realized.

**Keywords:** Railway, Digitalization, Modernization, Rolling stock, Sensors

## 1. Giriş

### 1.1. Demiryollarının kimi sorunları

Demiryolu endüstrisinde yıllara bağlı olarak ulaşım talepleri artmakta olup, hat bakımı eksiklikleri nedenleriyle yaşanan emniyet ve güvenlik sorunları; yüklerin artması, hatların giderek yaşlanması, periyodik gerçekleştirilen bakımlar ve iklim değişikliği nedenleriyle işletme ve ömür boyu maliyetler de artmaktadır. Ülkemizin demiryolları açısından örneklendirilecek olursa, 2020

Atıf için/Cite as: H.B. Gökçe, S. Subaşı, E. Kızılay, E. Hacıcaferoğlu, S.Ö. Arıoğlu "Demiryollarında akıllı ulaşım sistemi çözümleri için bir öneri: dijital demiryolu," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 133-149, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1308500

yılında 46,2 milyon tren.km olan trafik 2021 yılında 54,2 milyona yükselmiş, diğer bir deyişle trafik baskısı yaklaşık %17 artmıştır [1]. Buna ek olarak, söz konusu yıllarda demiryolu işletme ve bakım giderlerinin toplam giderler içerisindeki payı da %48,6'den %51,8'e yükselmiştir [2]. Ayrıca; altyapı, hatlar, binalar, sistemler ve taşıtlar gibi bileşenlere sahip demiryollarımız her yıl yaşlanmaktadır; hatlarımızın %45'inin sinyalizasyonsuz ve %54'ünün elektrifikasyonsuz olması da emniyet sorunlarını doğrudan arttırmaktadır [3]. 2020 ve 2021 yıllarında kaza sayıları 66'dan ve 73'e yükselirken, deray sayıları ise 22'den ve 29'a yükselmiştir [1].

İklim değişikliği açısından bakıldığında ise, gelecek 100 yıl içerisinde sıcaklık değerlerinin farklı senaryolara göre 2 ila 5°C artacağı kestirilmektedir [4]. Anılan bu değişikliğin demiryolları üzerindeki ekonomik etkileri üzerine kestirimler yapılmaktadır. Örneğin, Avrupa Birliği demiryollarında, taşkın kaynaklı kayıpların 581 milyon €/yıl [5], ray burkulması kaynaklı kayıpların 34 milyon €/yıl [6] ve 2100 yılına kadar köprü oyulmaları adaptasyonu masraflarının 77 milyon €/yıl [6] olduğu kestirilmektedir. Ülkeler bazında bakıldığında, İngiltere demiryollarında iklim olayları nedeniyle yaşanan gecikme ve iptal gibi aksamalara ait masrafların 50 milyon £/yıl'ın üzerinde olduğu hesaplanırken [7-8], ABD demiryolları için 2100 yılına kadar iklim değişikliğinden kaynaklı işletme aksaklıklarının kümülatif olarak 25-45 milyar \$ seviyelerine ulaşması beklenmektedir [9]. Bahsi geçen rakamların yüksekliği demiryolları için ciddi ekonomik riskler ortaya çıkarmaktadır.

### 1.2. Demiryollarında yeni hat yapılması ve mevcut hat modernizasyonu ikilemi

Demiryollarında gerek risklerin azaltılması gerekse kapasitenin artırılması için iki temel strateji düşünülebilir. Bunlardan ilki yeni hat yatırımı olarak adlandırılabilir; mevcut demiryolu ağının genişletilmesi için ağa yeni bağlantılar eklenmesi veya ağ içerisinde yer alan yaşlanmış hatların yerine sıfırdan yeni bir hat yapılmasıdır. İkinci temel strateji ise demiryolu ağı içerisinde bulunan mevcut bir hattın, alt/üst yapılarında gerekli düzeltmelerin yapılması ve çağın getirdiği teknolojik imkânlar ile donatılması, diğer bir deyişle mevcut hattın dijitalleştirilerek modernizasyonu olacaktır.

Burada yaşanan ikilem, aslında mevcut ağ sisteminin yeni yatırımlarla daha da genişletilerek kapasite artışları yaratmak ile mevcut ağın modernize edilerek kapasitesinin artırılması ve sistemin risklerinin azaltılması arasındadır. Her iki strateji farklı bakış açılarından değerlendirildiğinde; yapım maliyetleri, yapım kaynaklı gecikmeler ve yapım sırasında işletmenin açık kalabilmesi gibi gerekçelerle, mevcut hat modernizasyonu stratejisi öne çıkmaktadır (Tablo 1).

**Tablo 1.** Yeni hat yapılması ve mevcut hat modernizasyonu stratejilerinin etki seviyelerinin temel karşılaştırması

Kriter	Yeni Hat Yapılması	Mevcut Hat Modernizasyonu
Proje Yapım Maliyeti	Çok Yüksek	Düşük
Projenin Gecikme Riski	Yüksek	Düşük
İşletme Altında Çalışma Riski	Çok Düşük	Yüksek
Yapım Sırasında Altyapılarla Çakışma Riski	Yüksek	Çok Düşük
Kapasite Artış Potansiyeli	Yüksek	Yüksek
Emniyet Seviyesi Artış Potansiyeli	Yüksek	Yüksek
Güvenlik Seviyesi Artış Potansiyeli	Yüksek	Yüksek
Bakım Maliyetini Azaltma Potansiyeli	Çok Yüksek	Yüksek
Sürdürülebilirlik / Karbon ayak izi Azaltma	Yüksek	Çok Yüksek

### 1.3. Demiryollarında dijitalleşme

Demiryollarında yukarıda anılan riskleri azaltmak için, gelişmiş algılama yeteneklerinden, büyük veri işleme tekniklerinden, bilişim teknolojilerinden ve yapay zekâdan yararlanarak oluşturulacak dijital demiryolu ağları ile işletmecilerine ve kullanıcılarına daha emniyetli, daha güvenli ve verimli bir ulaşım sistemi oluşturulması gerekmektedir. Hedeflenen sisteme ulaşılması yönünde, demiryollarının doğuşundan itibaren birçok sürekli ilerlemeler kaydedilmektedir. 1800'lü yıllarda sefer sıklığı ve blok yöntemleri kullanılırken, 1900'lü yıllarda mekanik anlaşımlar ve gelişen bilgisayar, kontrol, telekom teknolojileri ile birlikte 1900'lerin sonunda bilgisayar tabanlı anlaşımlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler, işletmelerin trenleri, ulusal otomatik tren koruma sistemleriyle korumasıyla devam ederken 1989 itibariyle ERTMS, ETCS sistemleri tren koruma sistemleri olarak geliştirilmeye ve 2000'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Sinyalizasyon alanındaki gelişmeleri 2000'li yıllardan itibaren ise büyük veri, yapay zekâ, bulut bilişim ve en önemlisi sensör teknolojisinin dahil olması izlemiştir. Böylelikle demiryollarında akıllı ulaşım çözümü olarak dijital dönüşüm süreçleri de ilerlemektedir [10 - 13].

Demiryollarında öncü olan birçok ülke bu dönüşüm süreçlerine başlamıştır (Tablo 2). Bu gibi teknolojilerden yararlanarak trafik artışına destek sağlayan, tren ağlarının merkezi yönetimini en üst seviyeye çıkaran, tren hareketlerini otomatikleşen sistemler ve uzaktan algılama teknikleri ile izleyip performansını iyileştiren, emniyet ve güvenliği arttıran, önleyici bakımı mümkün kılarak servis kesintilerini azaltan akıllı altyapılar giderek yaygınlaşacaktır. Ülkemizde de TCDD çatısı altında çok önemli girişimler ve çeşitli uygulamalar, gelişen teknolojiye uygun olarak emniyetli, hızlı ve konforlu demiryolu altyapısını yönetmek ve akıllandırmak amacıyla hayata geçirilmektedir. Bu uygulamalara örnek olarak yüksek hızlı tren yatırımları, titreşim ve yol geometrisi ölçümleri yapan trenin kullanılması, Modernizasyon Dairesi'nin kurulması ve gerçekleştirilmekte olan projeler gösterilebilir. Yapılan uluslararası araştırmalara göre, demiryollarının akıllandırılması ile kapasitelerin %35'e kadar artabileceği; işletme ve bakım maliyetlerinin %25'e kadar azalabileceği, işletme güvenliği ve zamanında ulaşım konusunda %50'ye varan iyileşme olacağı ve emniyetin ise ciddi düzeyde artacağı öngörülmektedir [14 - 17].

**Tablo 2.** Dünyada demiryollarında bazı dijitalleşme adımları

Ülke	Yıl	Proje	Hedefler
Japonya	2000	Cyber Rail	Dijital ağ üzerinden birbirine bağlı demiryolları oluşturulması
Amerika	2002	Intelligent Railway System	Yeni sensörler, bilgisayarlar ve dijital iletişim teknolojilerinin akıllı demiryollarında kullanılması
İngiltere	2007	Network Rail - Intelligent Infrastructure	Öngörülü önleme için altyapı bakım sürecindeki hataları algılama sistemleri oluşturulması
Amerika	2009	IBM - Smarter Rail Development	Daha kapsamlı bir algıya, daha kapsamlı bir ara bağlantıya ve daha derin bir zekâyâ sahip demiryolu oluşturulması
Avrupa Birliği	2014	Shift2Rail	Sürdürülebilir, uygun maliyetli, yüksek performanslı, zamana dayalı, dijital ve müşteri merkezli ulaşım modunun araştırılması
Türkiye	2016	TCDD Modernizasyon Dairesi Başkanlığı	Mevcut demiryolu altyapısının işletme kapasitesini artırmaya, emniyetini geliştirmeye yönelik olarak modernizasyonu
Çin	2017	Smart Stations	Akıllı istasyonların geliştirilmesi ve bu istasyonların yurt içi ve yurt dışında uygulanması
Almanya	2020	Digital Railway Company	Demiryolları için geliştirilecek geleceğin teknolojilerinin bir araya getirilmesi ve bu projelerin koordine edilmesi

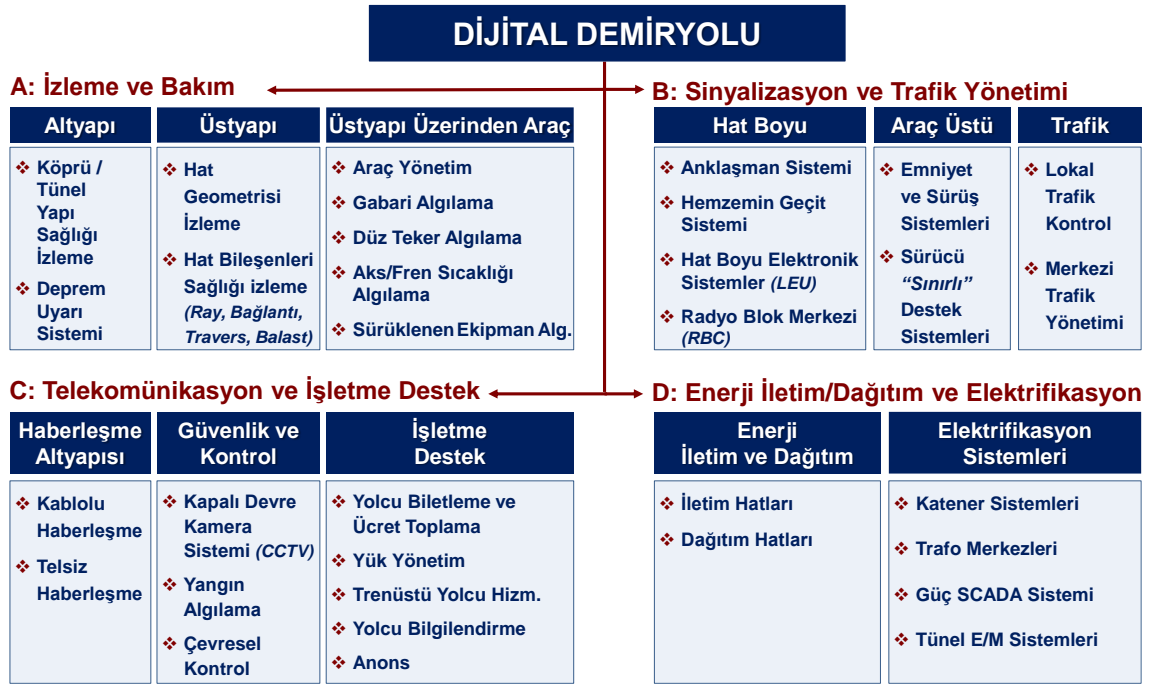
#### 1.4. Amaç ve kapsam

Demiryollarının tarihçesi dikkatle incelendiğinde, teknolojik gelişmelerin demiryollarında uzun yıllardır süregelen etkileri görülmektedir. Günümüzde ise sensörler, yapay zekâ, büyük veri, nesnelerin interneti ve bulut bilişim gibi gelişen yeni nesil bilgi teknolojilerinin demiryollarına entegre edilmesi için çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu entegrasyonlar ile demiryollarının dijitalleştirilerek kapasitelerinin artırılması, emniyet ve güvenliğin iyileşmesi, verimliliğin artması, işletme bakım masraflarının azalması hedeflenmektedir [18]. Dijital demiryolları ile

anlatılmak istenen; demiryollarında kullanılan teknolojik çözümlerin birleştirilmesiyle, bunlardan gelen canlı veri ve geri bildirilen verileri etkin bir şekilde entegre ederek sisteme birçok açıdan katkı getiren bir dijital sistemler bütünüdür.

Dijitalleştirme ile modernizasyonu yapılacak bir demiryolunda dokunulacak unsurlar 4 ana bileşen altında toplanabilir (Şekil 1). Bunlardan ilki demiryolu altyapısının, üstyapısının ve demiryolu araçlarının durumlarının izlenebildiği ve bakım gereksinimlerinin tespit edilebildiği sistemlerden oluşan izleme ve bakım grubudur. Diğer bir grup olan sinyalizasyon ve trafik yönetimi ise hattın trafik durumuyla ilgili bilgileri aktarmakta olup kapsamında ise hat boyu, araç üstü ve trafik sistemleri yer almaktadır. Üçüncü grupta ise telekomünikasyon ve işletme destek bileşenleri bulunmaktadır. Son grupta ise iletim/dağıtım hatlarını içeren enerji sistemleri ile elektrik enerjisini hatta kullanabilir olarak sağlayan elektrifikasyon sistemleridir.

Hazırlanan bu yayının amacı, dijital demiryollarına ulaşmak için kullanılması planlanan ve ülkemizde geliştirilen sistemlerden bazılarının laboratuvar veya proje bazlı örnekler ile tanıtılması ve bunların demiryolu sistemine getirdiği katkıların ortaya çıkarılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, dört adet alt bileşen seçilmiş olup; bunlarla ilgili dünyadaki ve ülkemizdeki gelişmeler aktararak, yerli olarak yapılan uygulamalardan örnekler verilecektir. Takip eden bölümlerde sırasıyla deprem uyarı, akıllı travers, çevresel kontrol ve demiryolu araç yönetimi sistemleri ile ilgili bilgiler aktarılacaktır.



Şekil 1. Dijital demiryolu yaklaşımı ile temas edilebilecek kimi demiryolu bileşenleri

## 2. Deprem Uyarı Sistemi

### 2.1. Genel

Dijital demiryolu bileşenleri içerisinde izleme ve bakım grubunun altyapı izleme kısmında yer alan deprem uyarı sisteminin (Şekil 1) amacı, hasar yaratabilecek düzeydeki bir depremin kaynağa olabildiğince yakın bir noktada anlık olarak tespit edilmesi ve bu bilginin ilgili istasyonlara otomatik olarak ulaştırılarak olası felaketlerin etkilerinin azaltılmasıdır. Deprem uyarı sisteminin temel çalışma prensibi ise odak noktasından yeryüzüne doğru yayılan P ve S dalgalarının hızlarının farklılıkları üzerine kurulmuştur. 5-7 km/sn'ye ulaşan hızları ile P dalgaları

ölçüm istasyonlarına daha hızlı ulaşırlar ve genlikleri düşüktür. Buna karşılık hızları 3-4 km/sn civarında olan daha yüksek genliğe sahip S dalgaları ise daha yıkıcıdır ve istasyona daha geç ulaşırlar [19]. Beklenildiği üzere, her iki tip dalganın da istasyonlara varışlarındaki zaman farkı, depremin odak noktasından uzaklaştıkça artar. İşte bu artış, deprem uyarı sistemine zaman kazandırmaktadır. Kurulan sistem ile, P dalgalarına ait bilgiler birkaç farklı sensörden doğrulandıktan sonra kontrol merkezlerine hızlıca iletilmektedir ve yıkıcı dalgalar gelmeden önce yüksek gerilim hatlarındaki akımın kesilmesi, santrallerde faaliyetlerin durdurulması, ağır ve hafif raylı sistemlerde taşıma araçlarının yavaşlatılması ya da durdurulması gibi birçok tedbirin alınması olası kılınmaktadır.

Deprem uyarı sistemi fikirsel olarak 1868 yılında ortaya atılmış [20] olsa da ilk demiryolu uygulaması ancak 1960 yıllarında Japonya Demiryolları tarafından geliştirilen “S-dalgası algılayıcı” sistemi ile gerçekleşmiştir. Bu sistemde sensörler demiryolu hatları boyunca 20 km aralıklarla yerleştirilmiştir ve pik ivme değerinin 0,04 g’yi aşması durumunda uyarı vermektedir [21]. Japonya’da takip eden yıllarda ise 0,12 g pik ivme değerinin eşik değer kabul edildiği “Kıyı Çizgisi S-dalgası algılayıcı” ve ilk gerçek zamanlı P-dalgası tespitine dayanan “UrEDAS” sistemleri geliştirilmiştir [22]. Geliştirilen sistemler Japonya’da ilk kez 1992 yılında Tokaido - Shinkansen hattında kullanılmıştır. Tayvan’da 345 km uzunluğundaki Taipei - Kaohsiung hattında toplam 51 deprem algılayıcı içeren sistemin 0,04g’den 0,12g’ye kadar değişik alarm seviyeleri için tren yavaşlatma ve durdurma protokolleri belirlenmiştir [23]. Kore’de ise KTX yüksek hızlı tren hattı üzerinde her 13 km’de bir yerleştirilmiş 48 adet algılayıcı bulunmakta olup; 0,045g değeri aşıldığında yavaşlatma ve 0,060g değeri aşıldığında durdurma protokolleri tanımlanmıştır [24]. ABD’de özellikle Kaliforniya eyaletinde deprem uyarı sistemi üzerine çalışmalar uzun yıllardır sürdürülse de sistemin resmî olarak kullanıma başlanması 2019 yılında Bay Area Railway Transportation metro ağında kurulan SHAKEALERT isimli sistemlerdir [25]. Görüleceği üzere, son yıllarda benzer sistemlerin kullanımı iyice yaygınlaşmıştır ve ülkemizde ilk kez Yerköy-Sivas Yüksek Hızlı Demiryolu hattına yerleştirilmiştir. Takip eden bölümde bu sisteme ait bilgiler sunulacaktır.

## 2.2. Geliştirilen sistem ve Yerköy-Sivas yüksek hızlı tren projesi uygulaması

243 km ana hat uzunluğuna sahip olan Yerköy-Sivas Yüksek Hızlı Tren Projesi’nde tasarım hızı 300 km/saat ve işletme hızı ise 250 km/saat’tir. Minimum kurp yarıçapının 3.500 m, maksimum eğimin % 0,16, dingil yükünün 25 ton ve maksimum deverin 130 mm olarak belirlendiği proje güzergâhında 6 istasyon yapısı, toplam uzunlukları 11,6 km olan 32 adet viyadük ve toplam uzunlukları 47,1 km olan 31 adet tünel bulunmaktadır. İşveren TCDD tarafından, Müteahhit Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş.’den projede Türkiye’de ilk olacak bir deprem uyarı sistemi kurulması talep edilmiştir.

Orta Anadolu Bölgesinde yer alan Yerköy-Sivas Hızlı Tren Hattı’nın yaklaşık 150 km kuzeyinde Kuzey Anadolu Fayı ve yaklaşık 100 km güneyinde ise Deliler Fayı yer almaktadır. Bunlara ek olarak, hattı doğrudan kesen en önemli birim ise sol yönlü doğrultu atımlı Yıldızeli Fay Zonu içerisinde yer alan Akdağmadeni Fayı’dır [26]. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayınlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması’na girildiğinde, Akdağmadeni Fayı’nın 475 ve 2.475 yıllık yinelenme periyodları için beklenen pik ivme değerleri sırasıyla 0,20g ve 0,45g olmaktadır [27].

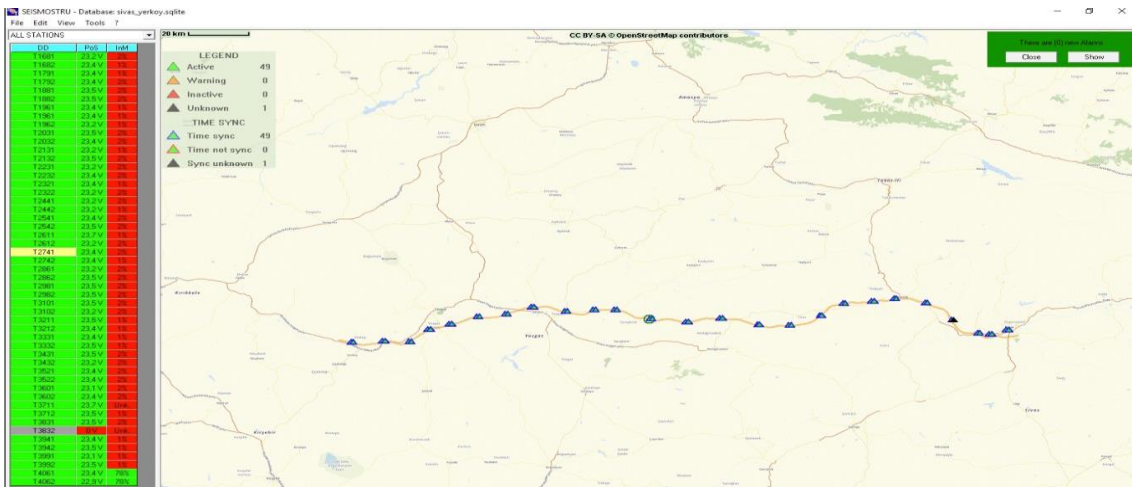
Deprem uyarı sisteminin Türkiye’de bir demiryoluna ilk kez entegre edilmesi için seçilen Yerköy-Sivas projesinde ölçüm sistemi Yapı Merkezi İDİS şirketi ve danışman akademisyenlerin işbirliği ile hayata geçirilmiştir. Kurulan sistemde güzergâh boyunca ortalama her 10 km’de birbirini yedeklemeli iki algılayıcı olacak şekilde 50 adet 0,001g gibi yüksek hassasiyetli ve saniyede 600 veri kaydedebilen sayısal kuvvet dengeli ivmeölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Yerköy-Sivas Hızlı Demiryolu Projesi'nde (a) ivme ölçerlerin yerleştirildiği dolaplar ve (b) dolaplar içerisinde yer alan kuvvet dengeli ivme ölçerler

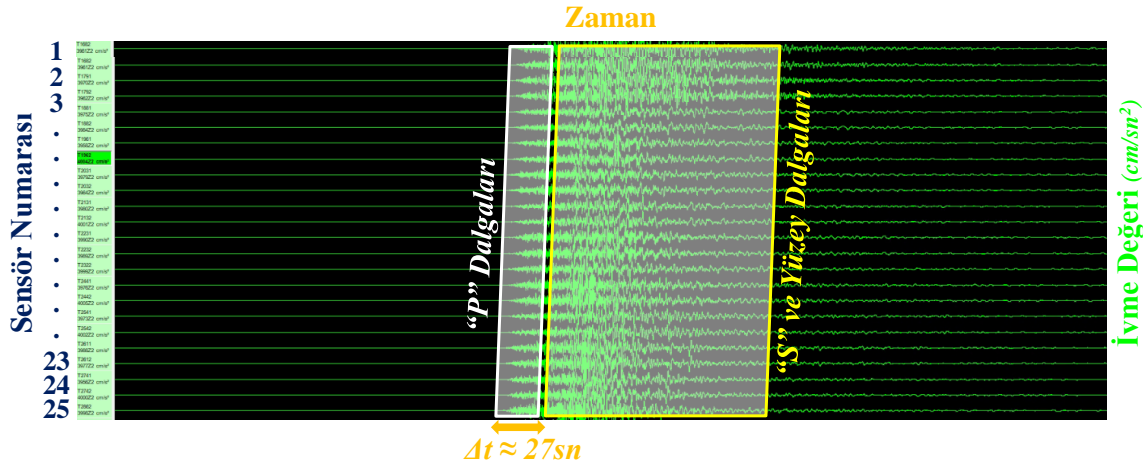
6 Şubat 2023 günü saat 04:17'de AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı verilerine göre merkez üssü Pazarcık-Kahramanmaraş (E: 37.288, B: 37.043), moment büyüklüğü  $M_w=7,7$  ve odak derinliği 8,6 km olan yıkıcı bir deprem meydana gelmiştir. Aynı gün, ilk depremden yaklaşık 9 saat sonrasında yine AFAD verilerine göre, Elbistan-Kahramanmaraş merkezli (E: 38.089, B: 37.239),  $M_w=7,6$  büyüklüğünde, ve odak derinliği 7,0 km olan ikinci bir deprem meydana gelmiştir [28]. Sığ odaklı kabul edilebilecek bu depremlerin etkisi özellikle Doğu, Güneydoğu, İç Anadolu ve Akdeniz bölgesi olmak üzere Türkiye'nin birçok yerinden hissedilmiştir. Depremin yıkıcı etkileri ile karşılaşılacak iller Kahramanmaraş, Gaziantep, Hatay, Osmaniye, Adıyaman, Adana, Malatya, Kilis, Diyarbakır ve Şanlıurfa'dır. Bu illerimizde yıkılan binalardan dolayı çok sayıda can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Söz konusu depremlerden yer ekonomisi nedeniyle sadece ilki için ve deprem uyarı sistemi kayıtları içerisinde en kritik verilerin elde edildiği düşey eksen okumalarına ilişkin bilgiler sunulacaktır.

İlk depremin merkez üssü olan Pazarcık-Kahramanmaraş'tan hattın Yerköy ucuna mesafesi yaklaşık 350 km iken, Sivas ucuna mesafesi ise yaklaşık 270 km'dir. İstasyon'da yer alan deprem uyarı sisteminin entegre edildiği SCADA'ya ait ekran görüntüsü Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu ekrandan 25 noktada yerleştirilen ivmeölçerlerin öncelikle çalışıp çalışmadıkları, sonrasında ise topladıkları verilere göre eşik seviyelere ulaşıp ulaşılmadığına yönelik bilgiler operatöre sağlanmaktadır. Kurulan sistemde eşik seviyeler henüz test aşamasında olup, 3 temel seviye belirlenmiştir: (a) Yeşil  $< 0,03$  g; (b)  $0,03$  g  $<$  Sarı  $< 0,1$  g; (c) Kırmızı  $> 0,1$  g. Ayrıca olası anlık okuma hatalarından arındırmak adına, sistemin alarm oluşturabilmesi için en az 4 ivme ölçerden gelen değerlerin eşik değeri aşması gerekmektedir.



Şekil 3. İstasyonda SCADA içine entegre edilen deprem uyarı sistemine ait ekran görüntüsü

Yaşanan ilk deprem sırasında, hat üzerine yerleştirilen deprem uyarı sistemi algılayıcılarının düşey eksenlerinde okunan ivme kayıtlarına ait grafikler Şekil 4'te sunulmaktadır. Grafiklerden görüleceği üzere, algılayıcılara önce daha küçük genliğe sahip "P" dalgaları ulaşmıştır. Yaklaşık 270 km mesafeden ortalama 6,0 km/sn gibi hızla algılayıcılara ulaştığı düşünüldüğünde, geçen sürenin 45 sn olduğu hesaplanabilir. Buna karşın daha yavaş ilerleyen "S" dalgalarının ise 3,7 km/sn ile ilerlediği kabul edilecek olursa, algılayıcılara ulaşma süresi 72 sn olarak hesaplanacaktır. Aradaki 27 sn'lik sürede ( $\Delta t = 72 \text{ sn} - 45 \text{ sn}$ ), deprem uyarı sistemi eşik değerlere göre gerekirse tren yavaşlatma veya durdurma kararı rahatlıkla alınabilecektir. Burada hatırlatılmalıdır ki, algılayıcılardan uzakta oluşan depremlerde "P" ve "S" dalgaları arasındaki zaman farkı açılmaktadır. Bu yaşanan depremde hattın merkez üssüne uzak olması sebebiyle sadece 1 ölçüm noktasında 0,01 g değeri aşıldığı için sistem herhangi bir alarm oluşturmamıştır. Sistemin eşik değer çalışmaları devam etmekte olup, tamamlanır tamamlanmaz otomatik karar verme mekanizmaları geliştirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 4. 6 Şubat 2023 tarihli moment büyüklüğü  $M_w = 7,7$  olan Pazarcık-Kahramanmaraş depremi sırasında 25 adet kuvvet dengeli ivme ölçerin düşey (z) eksen okumalarına ait grafik

Projede kurulan deprem uyarı sistemi ile hat civarında oluşacak depremlerin etkileri kolaylıkla tespit edilebilmekte olup, bu bilgiler ışığında trenlerin yavaşlatılması ve durdurulması aksiyonları alınarak demiryolundaki emniyet seviyesi artırılmaktadır. Ayrıca yaşanabilecek olası kazaların önüne geçilerek bakım/onarım açısından da tasarruflar sağlanabilecektir.

### 3. Akıllı Travers

#### 3.1. Genel

Akıllı traversler, temel olarak dijital demiryolu bileşenleri içerisinde, üstyapının izlenmesi ve bakımı kısmına girmektedir (Şekil 1). Henüz tam anlamda aktif saha uygulamaları sınırlı olan akıllı traverslerin bakım, değiştirme kararları ve altyapının durumu hakkında bilgi vermek, sayısal modelleme çalışmalarını desteklemek ve doğrulamak ve hatta enerji üretmek gibi çeşitli kullanım amaçları bulunmaktadır [29]. Söz konusu akıllı traverslerin sağlayacağı bilgiler ışığında traverslerin ve demiryolu altyapısının hizmet ömrü uzayacak, yaşam döngüsü maliyetleri düşecek ve hat kapasitesi artacak, dolayısıyla demiryolunu daha sürdürülebilir kılacaklardır.

Yapısal sağlık izleme sistemleri birçok alanda ilerlemesine ve gelişmesine rağmen demiryolu traversleri için henüz pilot uygulamalar ile sınırlıdır. Dünyadaki çalışmalar incelendiğinde, ABD'de travers yüzeyine yerleştirilen gerinim ölçer ve sıcaklık ölçerler ile travers üzerindeki sıcaklık etkilerinin [30] ve Japonya'da traverslerin altına yerleştirilmiş çok ince yük ölçerler ile dinamik etkiler altındaki travers-balast davranışının [31] incelendiği çalışmalar mevcuttur.

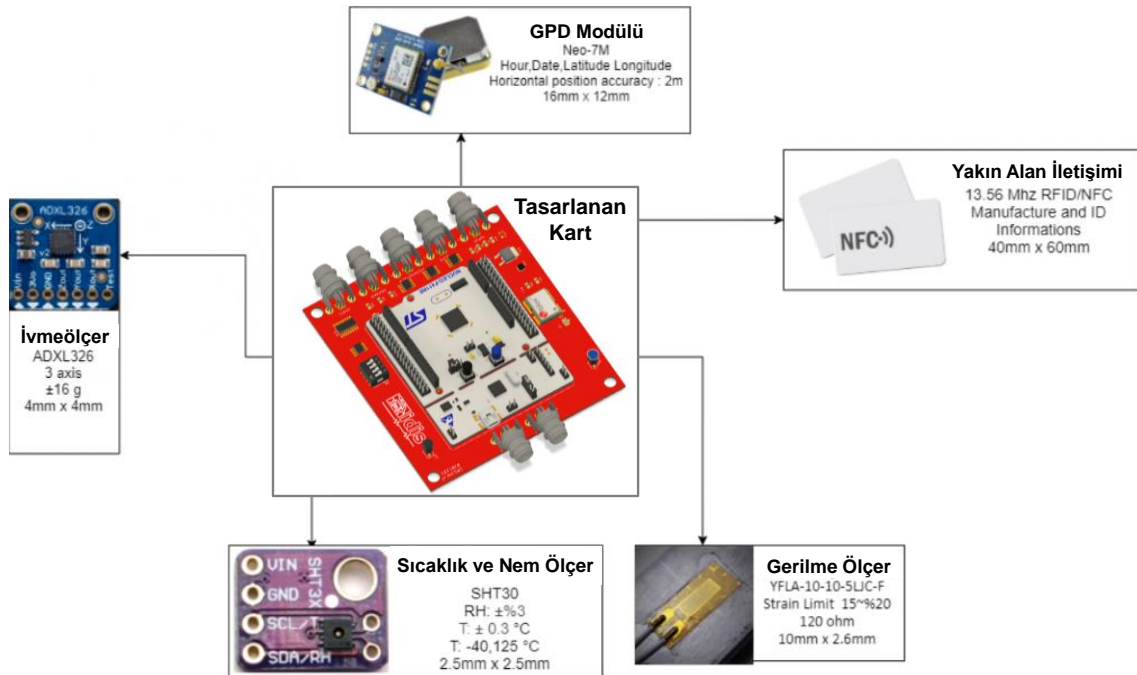
Ayrıca, travers üzerinden toplanan statik ve dinamik veriler ile balastın donması ve soğuk havada ray pedinin sertleşmesi gibi olgular ortaya çıkarılabilmektedir [29]. İtalya’da ise travers yüzeylerine yerleştirilen fotoelektrik pil modülleri ile güneşten [32] veya travers üzerinde yer alan tek serbestlik dereceli bir osilatör ile tren - hat arasında gelişen titreşimlerden gelen [33] enerjiyi kullanmak üzere çalışmalar yürütülmüştür. Bunların dışında, İngiltere’de fiber optik tabanlı ve traverse entegre edilmiş gerinim ve sıcaklık sensörleri kullanılarak traverslerdeki çatlamların tespitine yönelik çalışmalar yürütülmektedir [34]. Son olarak, nümerik modelleme ile yürütülen çalışmalara fayda getirmek için demiryollarına yerleştirilen akıllı traversler üzerinden gelen verilerle balast ile travers arasındaki kuvvetler [35], traverslerin yükler altında çökmesi [36] ve titreşimi [37], balast oturması [38] gibi bilgiler rahatlıkla ortaya çıkarılabilmektedir.

Yukarıda açıklandığı üzere dünyada demiryollarında önde gelen birçok ülkede akıllı traversler ile ilgili çalışmalar giderek artmaktadır. Takip eden bölümde ise ülkemizde bu konuda yürütülen laboratuvar çalışması ile ilgili bilgiler aktarılacaktır.

### 3.2. Geliştirilen sistem ve laboratuvar uygulaması

Ülkemizde yaklaşık 13.000 km demiryolu hattı ve buna karşılık gelen yaklaşık 25 milyon travers olduğu düşünüldüğünde [2], kritik noktalarda ve uygun görülen aralıklarla mevcut traverslerin arasına yerleştirilecek akıllı traversler ile sayısız bilgi üretilebileceği ve risklerin azaltılacağı açıktır. Bu amaca yönelik olarak Yapıray ve YM İDİS firmalarınca yurt içinde yerli bir akıllı travers prototipi üzerinde çalışmaya karar verilmiştir.

Akıllı travers prototipi için Yapıray firması tarafından ön gerdirmeli B70 beton travers üretilmiştir. Bu tip traverslerin uzunluğu 2,0 m ve orta kısımlarında taban genişliği 22,0 cm ve yine orta kısmın yüksekliği 17,5 cm olup, 28 günlük ortalama küp basınç dayanımının 75 MPa olması istenmektedir. Traversin içerisine yerleştirilecek kartın yeri ise moment açısından kritik olmayan uç kısımlar olarak belirlenmiştir. Bu uç kısımlara açılan yuva içerisine sıcaklık, ivme, gerilme ve GPS ölçümleri yapabilecek kabiliyete sahip, yerli olarak tasarlanan ve üretilen özel bir kart yerleştirilmiştir (Şekil 5).



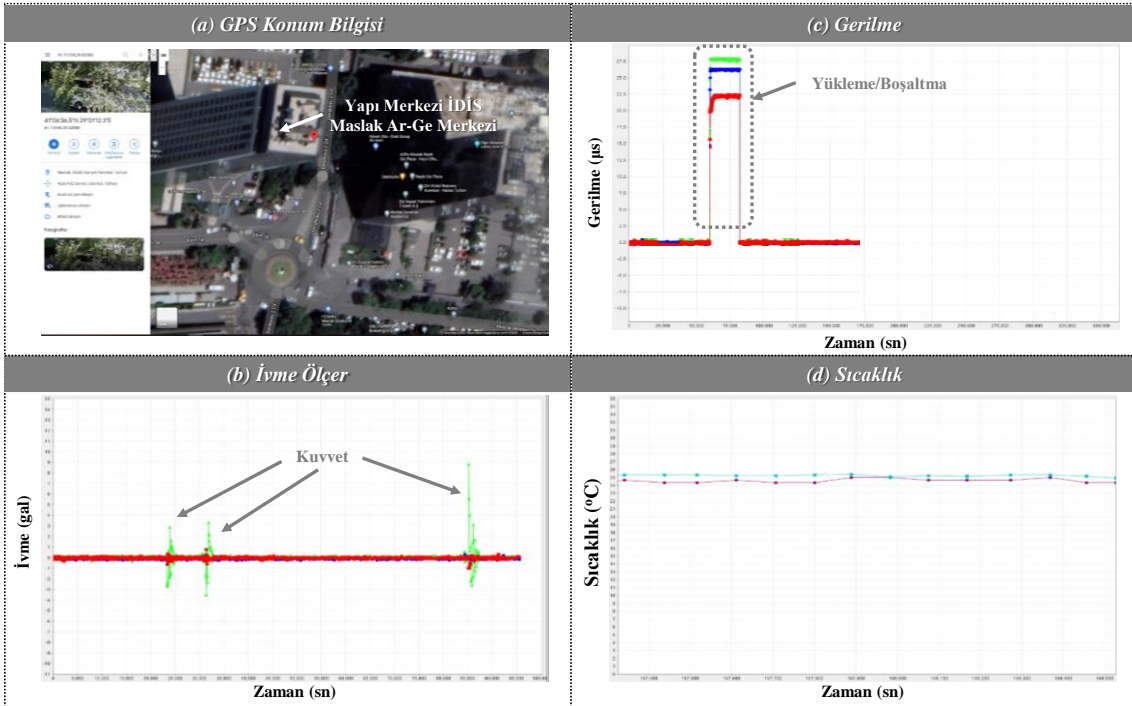
Şekil 5. Sıcaklık, ivme, gerilme ve GPS ölçümleri yapabilecek kabiliyete sahip, yerli olarak tasarlanan ve üretilen özel kartın bileşenleri



Üretim aşaması tamamlanan akıllı travers prototipi, İTÜ Teknokent'te Yapı Merkezi İDİS'in laboratuvarına getirilerek pratik deneylere tâbi tutulmuştur (Şekil 6). Öncelikle, akıllı travers üzerinden konum bilgisi başarıyla alınmıştır (Şekil 7a). Bunu takiben, çekiç ile travers üzerine 3 farklı darbe vurulmuş ve ivme verilerindeki pikler ve sönümlenmeler tespit edilmiştir (Şekil 7b). Daha sonrasında, içerisinde belli ağırlıklar bulunan kutu traversin ortasına konulup kaldırılarak, gerilme ölçerdeki verilerin önce arttığı sonra eski seviyesine döndüğü gözlenmiştir (Şekil 7c). Son olarak, hava sıcaklığı verisi toplanmıştır (Şekil 7d). Prototip üzerinde yapılan ön deneyler sonucunda ana kart ve üzerine yerleştirilen sensörlerden tatmin edici sonuçlar alınmıştır. Takip eden süreçte ise sensör kalibrasyonları tamamlanarak, uygun bir projede saha uygulaması yapılması planlanmaktadır.



Şekil 6. (a) Üretilen akıllı travers prototipi ve (b) Laboratuvar deneyleri



Şekil 7. Laboratuvarında test edilen akıllı travers prototipinde okunan (a) GPS konum bilgisi, (b) gerilme, (c) ivme ve (d) sıcaklık verileri

Henüz prototip olarak geliştirilen bu ürünün saha uygulamalarıyla birlikte hem seyrüsefer emniyeti arttırılacak hem de ölçülen veriler ve yapılan tespitler ile bakım planlamalarında veriye dayalı bilgilerle tasarruflar sağlanabilecektir.

#### 4. Çevresel Kontrol Sistemi

##### 4.1. Genel

Çevresel kontrol sistemi, telekomünikasyon ve işletme destek ana bileşeninin altında, güvenlik sistemleri içerisinde yer almaktadır (Şekil 1). Günümüzde demiryollarının köprü, tünel gibi altyapı bileşenleri çeşitli sensörlerle donatılmakta iken, istasyon veya trafo binalarında akıllı izleme, güvenlik ve risk yönetimi, uygun algılayıcı ve yazılımlar ile daha iyi gerçekleştirilebilir. Bunun temel nedeni, istasyonlar ve trafo merkezleri gibi yapıların deprem, sel ve fırtına gibi doğal afetlerden etkilenmelerinin yanı sıra yangın, suç ve terörizm gibi insan yapımı tehlikelere maruz kalabilmeleridir. Bu tehlikeleri azaltmak için, bir binadaki veya tren istasyonu gibi bir altyapıdaki çeşitli risklerin akıllı bir sensör ağı tarafından izlenmesi kaçınılmazdır [40].

Demiryollarındaki yapılar için, zorlu çevre şartları, trafik akışı, emniyet ve güvenlik riskleri gibi karşılaştıkları birçok zorluk nedeniyle, yeni teknolojileri kullanan ve birbirine entegre olabilen sistemler önerilmektedir [41]. SCADA sistemlerinin içine entegre edilen çevresel kontrol sistemleri, demiryolu ve karayolları hattı boyunca istasyonlardaki ve teknik binalardaki kritik durumları izlemek ve kontrol etmek amacıyla geliştirilen ve algılayıcılar ile birlikte çalışan özel yazılımlardır [42]. Bu sistemlerin temel amacı, çevresel ve temel ekipmanlardan gelen verileri toplayarak ve bu verileri işleyerek yangın, izinsiz giriş ve elektrik kesintisi gibi olası tehlikelere karşı sistemi korumaktır [43].

##### 4.2. Geliştirilen sistem ve Tanzanya Morogoro-Makutupora demiryolu projesi uygulaması

Tanzanya’da önemli demiryolu hamlelerinden biri olan Morogoro-Makutupora Demiryolu Projesi toplam 336 km tek hatta sahip olup, yük ve yolcu trenleri tasarım hızları sırasıyla 120 ve 160 km/saat’tir. Projede 8 yolcu istasyonu, 5 yük istasyonu, 1 depo ve manevra sahası, 1 çok modlu taşımacılığa uygun konteyner tesisi, ve toplam 86 km uzunluğunda 2 adet saydınç yer almaktadır. Projede, Tanzanya demiryollarında ilk kez kullanılacak “Araç Üstü Bilgisayar & Telsiz” ve “Havai Fiber” tasarımları, tedarikleri ve uygulamaları yapılmıştır. Bunlara ek olarak, proje için özel olarak geliştirilen ve SCADA üzerinden yönetilebilen bir çevresel kontrol sistemi de uygulamaya alınmıştır.

Kurulan sistemin, alarm kontrol ünitesi ve SCADA sisteminden oluşan iki temel bileşeni bulunmaktadır (Şekil 8 ve Şekil 9). Alarm kontrol ünitesine sahadan gelen bilgiler, alarm kontrol ünitesi içerisindeki elektronik kart veya PLC vasıtasıyla algılanıp değerlendirilerek eş zamanlı olarak alarm panosu üzerindeki HMI ekranına ve SCADA yazılımına aktarılır.

Alarm kontrol ünitesi; PLC veya elektronik kart, HMI, giriş çıkış modülleri, koruma ekipmanlarından oluşmaktadır. Alarm kontrol ünitesinin temel fonksiyonları; yangın, hırsızlık, sıcaklık artışı, elektrik kesintisi gibi kritik durumların algılanması, değerlendirilmesi ve gerekli alarmların oluşturularak izlenmesidir.

SCADA sistemi; sunucu, SCADA yazılımı, bilgisayar, ekran ve yazıcıdan oluşmaktadır. SCADA sistemi, güvenli izleme yapılabilmesi için alarm sistemi ile entegre olarak çalışmaktadır. Alarm sisteminden gelen kritik bilgiler ve alarmlar SCADA yazılımı üzerinden SCADA operatörünü uyarıp, daha büyük problemlerin oluşmasının önüne geçmekte ve sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Sistem tarafından oluşan alarmlar, geriye yönelik takip edilmesi amacıyla kayıt altına alınmaktadır.

Projede kurulan çevresel kontrol sistemi ile, gerek kazalar gerekse kasıtlı eylemler sonucu ortaya çıkabilecek problemlerin önüne geçilmesine ve dolayısıyla demiryolunun güvenliğine büyük katkı getirilmiş olmaktadır.



Şekil 8. Proje için üretilen (a) alarm kontrol ünitesi ve (b) iç görünüşü



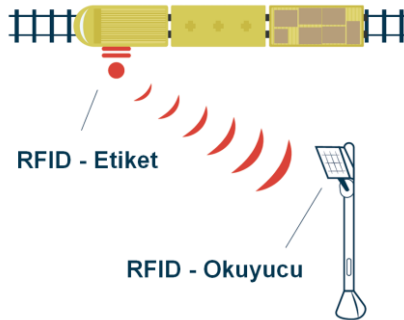
Şekil 9. Projenin SCADA sisteminde (a) alarm sisteminin genel görünüşü ve (b) istasyon görünüşü

## 5. Demiryolu Araçları Yönetim Sistemi

### 5.1. Genel

Dijitalleşen demiryollarının izleme ve bakım bileşeni altında öne çıkan diğer önemli bir başlık ise üstyapı üzerinden araçların izlenmesidir (Şekil 1). Bu başlıkta radyo frekansı ile tanımlama (RFID) teknolojisi kullanılarak demiryolu araçlarının bakımları ve ilgili planlamalar yürütülebilmektedir.

Demiryolu sektöründe kullanımı pek de yeni sayılmayacak olan RFID teknolojisi; okuyucu, etiket ve anten olmak üzere 3 temel bileşenin bir araya gelmesinden oluşmaktadır [44]. Okuyucular; lokomotif veya vagonlara yerleştirilmiş özel tasarımı etiketler üzerinden bunlara ait toplanması istenen bilgileri, radyo dalgalarını kullanarak sayısal bir kod şeklinde alan bileşenlerdir. RFID teknolojisinde, okuyucular ve etiketler arasındaki iletişim ise diğer bir temel bileşen olan antenler aracılığıyla gerçekleşir (Şekil 10). Bu teknolojinin günümüzde değişik amaçlarla aktif olarak kullanıldığı ülkelerden bazıları ABD, Güney Afrika, Avustralya, Çin, Almanya ve Finlandiya'dır [45].



Şekil 10. RFID teknolojisinin şematik gösterimi

RFID teknolojilerinin, biletleme, araç takip ve yer belirleme, hat bileşenlerini denetleme, demiryolu araçlarının uygun işletilmesinin tespiti, bakım planlama gibi, demiryollarında birçok kullanım amacı bulunmaktadır [46]. Söz konusu teknoloji tek başına malzeme aşınma kalınlığı, titreşim veya vagonun aksları arasındaki doğru yük dağılımının ölçülmesini sağlayamaz ancak bunları yapabilmek için diğer özel sensörlere entegre edilebilirler [47]. Bu entegrasyon sonrasında nesnelerin interneti teknolojisi de kullanılarak verilerin çevrimiçi olarak izlenmesi ve analiz edilmesi mümkün olabilmektedir.

### **5.1. Geliştirilen sistem ve Tanzania Dar Es Salaam-Morogoro demiryolu projesi uygulaması**

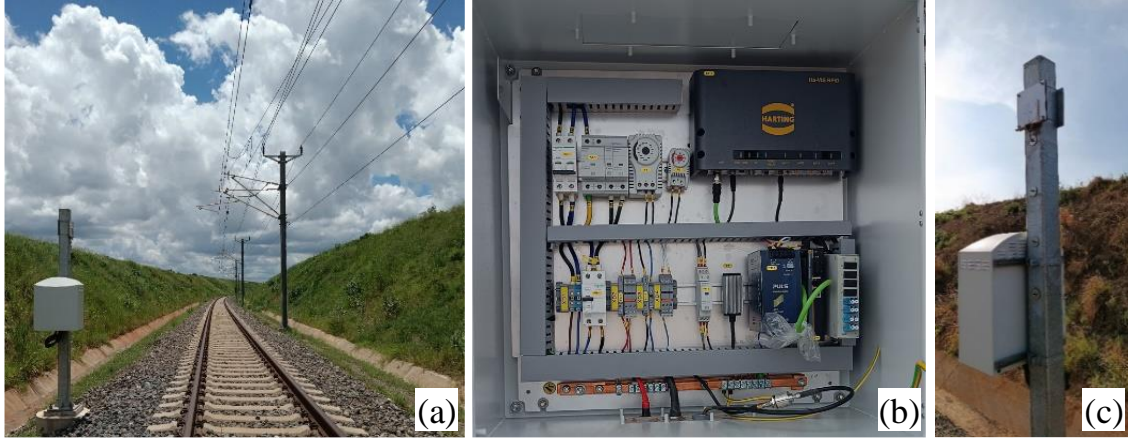
Tanzanya'da yer alan, 205 km tek hat uzunluğuna sahip Dar Es Salaam-Morogoro Demiryolu Projesi'nde yük ve yolcu trenleri için tasarım hızları sırasıyla 80 km/sa ve 160 km/sa olarak belirlenmiştir. Söz konusu proje, 6 adet yolcu ve 4 adet yük istasyonlarının yanı sıra 1 adet depo ve manevra sahası ile 95 km uzunluğunda 2 adet saydinge sahiptir. Bu proje ile Tanzanya'da ilk defa RFID teknolojisi kullanılarak demiryolu araçları yönetim sistemi (RSMS) uygulaması yapılmıştır. Sistem, temel amacı bakımından, yük vagonlarının durumunun teknik kontrollerinin ve önleyici denetimlerin gerçekleştirilmesi için karar verme süreçlerinde insan faktörünün olabildiğince azaltılmasına destek olan bir varlık yönetim sistemidir.

Projede kurulan RSMS sisteminin başlıca bileşenleri, ana ve yedek sunucuları içeren kontrol merkezi ekipmanları; ana saat ve basit ağ zaman protokolü içeren zaman damgalayıcı ekipmanlar; etiket, okuyucu, anten ve kontrol paneli içeren RFID ekipmanları; ve kullanıcılar için geliştirilen araç ve yük yönetim sistemi yazılımlarıdır.

İnşaatı tamamlanmak üzere olan demiryolu hattında kullanılacak her bir lokomotif ve vagon için, sağ ve sol taraflarında 2'şer adet dış ortama dayanıklı RFID etiket sabitlenmektedir. Güzergâh boyunca konumlandırılmış olan saha panoları, diğer bir deyişle RFID okuyucular, önlerinden geçen her bir lokomotif ve vagonun RFID etiketlerini okuyarak ilgili sunuculara kilometre, bakım periyodu, son konum ve işletmeye uygunluk gibi istenen bilgileri iletmektedir (Şekil 11).

İletilen bu bilgiler RSMS sistemi sunucularının bulunduğu merkezde kaydedilir. Ana sunucunun arızalanması durumunda yedekli sunucu işlemleri devralır ve bu da sistem sürekliliğini sağlar. İstasyonlardan geçen lokomotif ve vagonların giriş-çıkışlarına ait veriler, RSMS sunucuları tarafından yönetilmektedir. Bu nedenle, tren filosu ile ilgili tüm veriler saklanabilir ve istendiğinde raporlanabilir durumdadır. İnternet tabanlı teknolojiler kullanılarak geliştirilen sistem, Tanzania'da gelecekte yapılacak olan demiryolu projelerine kolaylıkla entegre edilebilir. Ayrıca kurulan sistemin tüm ekipmanları arasında tarih-zaman senkronizasyonu, basit ağ zaman protokolü entegrasyonu ile yapılacaktır.

Bakım ekipleri sistem üzerinden, bakıma ihtiyacı olmayan, bakımına az süre kalan veya bakımı geciken araçları rahatlıkla tespit edebilmektedir. Yine aynı sistem üzerinden otomatik olarak ilerleyen süreç için bakım fiyatlandırma kestirimleri yapılabilmektedir. Araçların lokasyon ve yön bilgilerinin izlenmesi sağlanabildiği gibi, bakımlarında kullanılacak olan yedek parça takibi de kurulan sistemin getirdiği avantajlardandır. Toplanan bu veriler, yalnızca demiryolu araçlarının teknik durumuna ilişkin bir genel bakış sağlamakla kalmaz, aynı zamanda demiryolu yük vagonlarının servis ve işletimiyle ilgili maliyetleri özet olarak sayısallaştırabilir. Ayrıca, ilerleyen aşamalarda, sistem yük yönetim sistemi ile entegre edilebileceği gibi, hat boyu ekipmanları (HBD/HWD, DED, WILD) ile entegrasyon sağlanınca arızalı ekipmanlara ait alarmlar oluşturulabilecek ve tamir aksiyonları anlık alınabilecektir.



Şekil 11. Projeye yerleştirilen (a) RFID okuyucu, (b) RFID panosunun içi ve (c) RFID anten.

Tanzanya demiryollarındaki ilk demiryolu araçları yönetim sistemi, Dar Es Salaam-Morogoro Demiryolu Projesi için hayata geçirilmiştir. Bu sistemle, bakım planlamaları konusunda daha objektif kararlar alınabilecek, bilgi akışları iyileştirilecek ve yapılacak optimizasyonlar ile doğrudan bakım tasarrufu sağlanacaktır. Ayrıca, etkin bakım takip yöntemi ile dolaylı olarak riskli araçların hatta bulunması engellenerek, teknik durumu kötü olan yük vagonlarının kullanımından kaynaklanan kaza sayısının azaltılmasına katkı getirilmiş olacaktır.

## 6. Sonuçlar

Ülkelerin demiryolu ağları her yıl yaşlanmakta olup, bazı yetersizlikler ile karşı karşıya kalmaktadırlar. İki temel çözüm yolu hatların sıfırdan inşa edilmesi veya rehabilitasyon, elektrifikasyon, sinyalizasyon ve dijitalizasyon ile modernize edilmesidir. Üzerinde dikkatle düşünüldüğünde; hattın işletmeye açık kalması, yapım masrafının daha az olması, gecikme riskinin daha düşük olması ve sürdürülebilirlik açısından modernizasyon tercihi öne çıkmaktadır.

Dijital demiryolu, demiryollarında kullanılan teknolojik çözümleri birleştirerek, bunlardan gelen canlı veri ve geri bildirilen verileri etkin şekilde entegre eden bir sistemler bütünüdür ve temel amacı işletmelerin ve kullanıcıların birçok alandaki ihtiyaçlarına çözüm getirmektir. Tüm bileşenleriyle kurulacak bir dijital demiryolunda; meteorolojik izleme, yapı sağlığı izleme ve olay algılama sistemleri ile, demiryolu iklim değişikliğinin olası etkilerine hazırlıklı hale getirilmeye çalışılacaktır.

Demiryollarında gerçekleştirilecek dijitalleşme hamlesiyle trenler arası mesafe azaltılarak demiryolu ağının kapasitesi %35'lere kadar ciddi oranda arttırmak ve gelişmiş algılayıcılar ile daha az arıza ve hızlı tespit ile tehir ve iptalleri azaltmak; artan sinyalli hatlar ile kazaları %50'ye kadar azaltmak mümkün olacaktır. Bu iki kalemdeki getiriler ise demiryollarının verimliliğine doğrudan etki edecektir. Ayrıca sorunsuz işletme ile enerji tüketimini ve emisyonları azaltarak iklim değişikliğine olumlu katkı sağlanması ve artacak kapasite ile yeni hatlar için gereken alanı azaltarak çevre hassasiyeti amaçlarına da ulaşılmış olacaktır.

Burada aktarılan ve ilkler içeren örnekler yerli imkânlarla geliştirilmiş olup, değişik coğrafyalarda uygulamaları sunulmaktadır. Rekabetin olmazsa olmazı; insana, bilgiye, teknolojiye, inovasyona ve çevreye yatırım ile çözüm üretmek değer yaratmaktır. Türkiye demiryolu sektörü açısından, yerli dijital demiryolu bileşenlerinin geliştirilmesi, sahada uygulanması ve dijital demir ağının artırılması; milli sanayinin gelişmesine katkıda bulunmasını, yurt içi projelerde yabancı bağımlılığı azaltılmasını, yurt dışı projelerde ihracat kalemleri oluşturarak Türkiye'nin rekabet gücünü arttırmasını ve kendi ekonomisine sürdürülebilir şekilde katma değer kazandırmasını sağlayacaktır.

### Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmanın yapılmasında gösterdikleri yakın ilgi ve bilimsel destek için başta YAPI MERKEZİ Holding A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Dr. Müh. Ersin ARIOĞLU'na, teşvikleri için tüm Holding Yönetim Kurulu üyelerine, çalışmanın değişik aşamalarında emeği geçen YAPI MERKEZİ Tasarım Bölümü, YAPIRAY A.Ş. ve İDİS A.Ş. çalışanlarına ve akademik desteklerinden dolayı Prof. Dr. Ergin ARIOĞLU, Prof. Dr. Mustafa ERDİK, Prof. Dr. Ali PINAR ve Dr. Hasan Bülent YAĞCI'ya teşekkür etmeyi, yerine getirilmesi gereken bir görev sayarlar. Çalışılan konseptin ülkemizde geliştirilmesi yolunda çok kıymetli hizmetler ve destekler veren TCDD çalışanlarına ve özellikle TCDD Yapım Dairesi ve TCDD Modernizasyon Dairesi çalışanlarına ve geliştirilen sistemlerin projelerde hayata geçirilmesinde katkı koyan Yerköy-Sivas Yüksek Hızlı Tren Projesi, Tanzania Morogoro-Makutupora ve Dar Es Salaam-Morogoro Demiryolu Projeleri çalışanlarına içten teşekkürlerimizi açıklarız. Son olarak, çalışma metninin titizlikle geliştirilmesinde Akın YILMAZ'a ve görsellerin hazırlanmasında Şerife OTURAKLIOĞLU'na candan teşekkür ederiz. Çalışmada belirtilen tüm görüş ve değerlendirmeler yazarlarına ait olup; YAPI MERKEZİ'ni, diğer herhangi kurum ve kuruluşu bağlamaz.

### Kaynakça

- [1] *Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İstatistik Yıllığı 2017-2021*, ISSN 1300-2503, Ankara, 2022.
- [2] *Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Faaliyet Raporu - 2021*, ISSN 1300-2503, Ankara, 2022.
- [3] Ö. Akbayır, "Dünya'da ve Türkiye'de demiryolu kazaları nedeniyle meydana gelen ölüm oranlarının karşılaştırılması" *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 5, pp. 45-52, Haz. 2017.
- [4] IPCC, "Climate Change 2022 – Mitigation of climate change – Summary for Policymakers", [www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_SPM.pdf](http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf) [Erişim 25/05/2023]
- [5] P. Bubeck, L. Dillenaar, ve L. Alfieri, "Global warming to increase flood risk on European railways", *Climatic Change* 155, 19–36, 2019, doi.org/10.1007/s10584-019-02434-5.
- [6] F. Nemry ve H. Demirel, "Impacts of climate change on transport: a focus on road and rail transport infrastructures", *JRC Scientific and Policy Reports*. Joint Research Center, 93 sayfa, 2012.
- [7] *Network Rail*, "Route weather resilience and climate change adaptation plans", 42 sayfa, 2014.
- [8] *Network Rail*, "Network Rail third adaptation report", 115 sayfa, 2021.
- [9] P. Chinowsky, J. Helman, S. Gulati, J. Neumann, ve J. Martinich, "Impacts of climate change on operation of the US rail network", *Transport Policy*, 75, 183–191, 2019.
- [10] B. Ning, T. Tang, Z. Gao, F. Yan, F.Y. Wang, ve D.Zeng, "Intelligent railway systems in China", *IEEE Intelligent Systems*, Volume: 21, Issue: 5, DOI: 10.1109/MIS.2006.99, 2006.
- [11] J. Zhang, F.Y. Wang, K. Wang, W.H. Lin, X. Xu ve C. Chen, "Data-driven intelligent transportation systems: A survey", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12, 4; 1624-1639, 2011.
- [12] L. Janusova, ve S. Cicmancova, "Improving safety of transportation by using intelligent transport systems", *Procedia Engineering*; 134; 14 – 22, 2016.
- [13] Q.Y. Li, Z.D. Zhong, M. Liu, ve W.W. Fang, "Chapter 14: smart railway based on the internet of things, big data analytics for sensor-network collected intelligence"; *Big Data Analytics for Sensor-Network Collected Intelligence*, Editörler: H. H. Hsu, C.Y. Chang, ve C.H. Hsu, Elsevier, 2017.
- [14] *Digital Railway Company*, 2023, [digitale-schiene-deutschland.de/en](http://digitale-schiene-deutschland.de/en) [Erişim 25/05/2023].
- [15] *McKinsey*, 2017 "The rail sector's changing maintenance game: How rail operators and rail OEMs can benefit from digital maintenance opportunities", [www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/the-rail-sectors-changing-maintenance-game](http://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/the-rail-sectors-changing-maintenance-game), [Erişim 25/05/2023].
- [16] Y. Sarıkavak, "Demiryolu endüstrisinde akıllı ulaştırma sistemleri ve Türkiye'deki uygulama örnekleri", *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*; 1 (2); 22-32, 2018.
- [17] C. Özarpa, İ. Avcı, ve B.F. Kınacı, "Akıllı raylı sistemlerde kullanılan alt sistemlerin kritik seviye analizi", *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 14, sayfa 143-153, doi: 10.47072/demiryolu.937278, 2021.
- [18] J. Polinski, ve K. Ochocinski, "Digitization in rail transport"; *Problemy Kolejnictwa - Railway Reports*, 64(188):137-148, DOI:10.36137/1885E, 2020.
- [19] S.P.Jr. Clark, "Structure of the earth", *Prentice-Hall*; 88 sayfa, 1971.
- [20] J.D. Cooper, "Earthquake indicator", *San Francisco Bulletin*; 3 Kasım 1868.

- [21] K. Ashiya, “Earthquake alarm systems in Japan railways”, *Journal of Japan Association Earthquake Engineering*; 4(3); 112-117, 2004.
- [22] Y. Shunroku, and M. Tomori, Earthquake early warning system for railways and its performance. *Journal of JSCE*. 1. 322-328, 2013.
- [23] Y. Wu, D. Chen, T.L. Lin, C.Y. Hsieh, T.L. Chin, ve W.Y. Chang, “A high-density seismic network for earthquake early warning in Taiwan based on low cost sensors”, *Seismological Research Letters*; 84; 1048–1054, 2013.
- [24] H. I. Lee, C. Cho, J. H. Park, I. S. Lim, B. ve S. Jeong, “Earthquake early warning system for Korea train express (ktx)”; *American Geophysical Union, Fall Meeting*, Aralık 2018.
- [25] D.D. Given, R.M. Allen, A.S. Baltay, P. Bodin, E.S. Cochran, K. Creager, R.M. de Groot, L.S. Gee, E. Hauksson, T.H. Heaton, M. Hellweg, J.R. Murray, V.I. Thomas, D. Toomey ve T.S. Yelin, “Revised technical implementation plan for the ShakeAlert system—an earthquake early warning system for the west coast of the US”, *U.S Geological Survey Report*, 1155, 42 sayfa, 2018.
- [26] R. Demircioğlu ve B. Coşkuner, “Salanda fay zonu’nun Kesikköprü (Kırşehir) ve Yeşilöz (Nevşehir) arasında kalan kesiminin göreceli tektonik aktivitesinin jeomorfik indislerle incelenmesi”; *Pamukkale Univ. Müh. Bilim Derg.*; 28(3); 464-482, 2022.
- [27] AFAD, “Türkiye deprem tehlike haritası”, <https://tdth.afad.gov.tr/>, [Erişim 25/05/2023]
- [28] AFAD, “06 Şubat 2023 Pazarcık  $M_w$  7,7 – Elbistan  $M_w$  7,6 - Depremlerine ilişkin ön değerlendirme raporu”, *Deprem Dairesi Başkanlığı*, 9 Şubat 2023.
- [29] G. Jing, M. Siahkouhi, J.R. Edwards, M.S. Dersch, ve N.A. Hoult, “Smart railway sleepers-A review of recent developments, challenges, and future prospects”, *Constr. Build. Mater.*, 271, 121533, 2021.
- [30] A.E.C. Ruiz, Y. Qian, J.R. Edwards, M.S. Dersch, “Analysis of the temperature effect on concrete crosstie flexural behavior”, *Constr. Build. Mater.*, 196, 362–374, 2019.
- [31] A. Aikawa, “Dynamic characterisation of a ballast layer subject to traffic impact loads using three-dimensional sensing stones and a special sensing sleeper”, *Constr. Build. Mater.*, 92, 23–30, 2015.
- [32] *Greenrail Company*, <https://www.greenrailgroup.com/en/home/> [Erişim 25/05/2023]
- [33] G. Gatti, M. Brennan, M. Tehrani, ve D. Thompson, “Harvesting energy from the vibration of a passing train using a single-degree-of-freedom oscillator”, *Mech. Syst. Signal Process.*, 66, 785–792, 2016.
- [34] L.J. Butler, J. Xu, P. He, N. Gibbons, S. Dirar, C.R. Middleton ve M.Z. Elshafie, “Robust fibre optic sensor arrays for monitoring early-age performance of mass-produced concrete sleepers”, *Struct. Health Monit.*, 17, 635–653, 2019.
- [35] W. Song, B. Huang, X. Shu, H. Wu, ve J. Stransky, “Interaction between railroad ballast and sleeper: a dem-fem approach”, *Int. J. Geomech.*, 19 (5), 04019030, 2019.
- [36] G. Jing, J. Wang, H. Wang, M. Siahkouhi, “Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel slag in ballasted railway track”, *Constr. Build. Mater.* 262, 120015, 2020.
- [37] D. Nishiura, H. Sakai, A. Aikawa, S. Tsuzuki, ve H. Sakaguchi, “Novel discrete element modeling coupled with finite element method for investigating ballasted railway track dynamics”, *Comput. Geotech.*, 96, 40–54, 2018.
- [38] Y. Qian, S.J. Lee, E. Tutumluer, Y.M. Hashash, D. Mishra ve J. Ghaboussi, “Simulating ballast shear strength from large-scale triaxial tests: Discrete element method”, *Transportation R.R.*, 2374 (1), 2013.
- [39] N. Kurata, B.F. Spencer ve M. Ruiz-Sandoval, “Risk monitoring of buildings with wireless sensor networks”; *Struct. Control Health Monit.*, 12, 315–327, 2005.
- [40] H. Alawad, ve S. Kaewunruen, “Wireless sensor networks: toward smarter railway stations wireless sensor networks”, *Infrastructures*, 3, 24, 17 sayfa, 2018.
- [41] A. Vijittanasan, T. Anuwongpinit, B. Purahong ve V. Chutchavong, “Development of Thailand railway station management training system based on SCADA system simulation”, *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*; Aralık 2020.
- [42] H.B. Hu, W.L. Luo, S.X. Liu ve Y.M. Zhang, “Design of a new fire detection and alarm system based on self-organizing wireless sensor networks”; *Applied Mechanics and Materials; Trans Tech Publications: Zürich, Switzerland; Vol. 52; 1142–1146*, 2011.
- [43] F. Finkenzeller, “*RFID handbook*”, 3rd Edition, Wiley, New York, 480 sayfa, 2010.
- [44] A. Rosova, M. Balog ve Z. Simekova, “The use of the RFID in rail freight transport in the world as one of the new technologies of identification and communication.”; *Acta Montanistica Slovaca* 18 (1); 26–32, 2013.
- [45] B. Malakar ve B. Roy, "Survey of RFID applications in railway industry", *Proc. 1st Int. Conf. Autom. Control Energy Syst. (ACES)*, pp. 1-6, 2014.
- [46] M. Balog ve M. Mindas, “Informatization of rail freight wagon by implementation of the RFID Technology”; *Smart City 2015, LNICST*; 166; 592–597, 2016.

## Özgeçmiş

**Hasan Burak GÖKÇE**

Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, yüksek lisans ve doktora eğitimini ise burslu olarak University of Central Florida'da tamamlamıştır. Lisansüstü çalışmaları sırasında bulunduğu üniversitede araştırma görevlisi ve dahil olduğu projelerde araştırma mühendisi olarak çalışmıştır. 2012 yılından beri Yapı Merkezi Ar-Ge Bölümü'nde çalışmaktadır.

E-Posta: burak.gokce@ym.com.tr

**Serhan SUBAŞI**

2013 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Mühendisliği lisans 2016 yılında ise Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği yüksek lisans programlarını bitirmiştir. 2013 yılından beri Yapı Merkezi İDİS firmasında sinyalizasyon sistemi geliştirilmesi ve ürünleştirilmesi kapsamında farklı pozisyonlarda çalışmakta olup, 2023 yılından beri Ürün Geliştirme ve Entegrasyon bölüm koordinatörü olarak görevine devam etmektedir.

E-Posta: serhan.subasi@ymidis.com.tr

**Ercan KIZILAY**

Lisans ve yüksek lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2016-2019 arasında TÜV Rheinland'da güç elektroniği, kablo, tesisat bileşenleri konularında test ve sertifikasyon projelerinde çalışmıştır. 2019 yılından beri Yapı Merkezi İDİS'te sinyalizasyon sistemleri projelerinde geliştirme, uygulama, test, sertifikasyon konularında takım lideri olarak görev almaktadır.

E-Posta: ercan.kizilay@ym.com.tr

**Ahmet Ertuğrul HACICAFEROĞLU**

Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi – University at Buffalo UOLP (Uluslararası Ortak Lisans Programı) İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Lisans eğitiminde betonarme ve çelik konuları üzerine bitirme projeleri hazırlamıştır. 2022 yılından beri Yapı Merkezi İDİS A.Ş.'de Genel Müdürlük bölümünde teknik asistan olarak çalışmaktadır.

E-Posta: e.hacicaferoglu@ymidis.com.tr

**Sami Özge ARIOĞLU**

İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği'ni bitirmiş ve Purdue Üniversitesi İnşaat Bölümü'nde Yüksek Lisans yapmıştır. Çalışma hayatında TBE Group Inc.'de Proje Mühendisi ve Proje Müdürü; Yapı Merkezi İnşaat'ta ise Saha Mühendisi'nden Genel Müdür'e kadar birçok kademede görev almıştır. Çalışmalarına Yapı Merkezi Holding Yönetim Kurulu Üyesi ve Yapı Merkezi İDİS Yönetim Kurulu Başkanı olarak devam etmektedir.

E-Posta: ozge.arioglu@ym.com.tr

**Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Yazarların katkıları: Hasan Burak GÖKÇE: Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme, Kavramsallaştırma. Serhan SUBAŞI: Gözden geçirme, Yazılım, Doğrulama. Ercan KIZILAY: Gözden geçirme, Görselleştirme, Yazılım, İnceleme. Ertuğrul HACICAFEROĞLU: Kaynaklar, İnceleme. Sami Özge ARIOĞLU: Gözden geçirme ve düzenleme, Kontrol, Metodoloji.