



Demiryolu Ray ve Çevresinin Anlamlandırılması için Derin Öğrenme Tabanlı Yöntemlerin Karşılaştırmalı Analizi

İlhan AYDIN¹, Taha Kubilay ŞENER¹, Mehmet SEVİ^{*2}

¹ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elâzığ, Türkiye

² Muş Alparslan Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanı, Muş, Türkiye

m.sevi@alparslan.edu.tr

(Alınış/Received: 02.08.2023, Kabul/Accepted: 14.09.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Demiryollarında ray güvenliği tren kazalarının önlenmesi için oldukça önemlidir. Ray çevresinde ve üzerinde bulunan nesnelere tren için tehlike arz etmektedir. Dolayısıyla demiryoluna izinsiz girişlerin tespit edilerek trenlerin güvenli çalışması akıllı ulaşım sistemleri için oldukça önemlidir. Bu çalışmada raylı sistemlerde ray çevresinin anlamlandırılması amacıyla görüntü bölütleme tabanlı yaklaşımlar karşılaştırılmış ve ray çevresindeki nesnelere tespiti sağlanmıştır. Görüntü bölütleme tabanlı ray ve çevresinin anlamlandırılması için UNet, BiSeNetV2, DeepLabV3 ve PP-LiteSeg modelleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca ray çevresindeki nesnelere tespitinde YOLOv7 uygulanmıştır. Böylece, modellerin gerçek dünya senaryolarında ne kadar başarılı olduğu değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda, hafif yapısıyla dikkat çeken PP-LiteSeg modelinin yüksek segmentasyon performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Eğitim aşamasının nesne tespitinde önemli olduğu görülmüş ve PP-LiteSeg'in Jetson Nano gibi tek devre kartlarda başarılı bir şekilde uygulanabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmadaki bir diğer model YOLOv7, TensorRT kütüphanesi kullanılarak paralel çalışacak şekilde optimize edilmiş ve hafıza alanlarının bağımsız olarak kullanılabilmesi için özel bir kontrol mekanizması geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, PP-LiteSeg modelinin diğer modellere göre daha yüksek doğruluk ve mIoU değerleri elde ettiği görülmüştür. Yapılan çalışma raylı sistemlerde hızlı ve doğru nesne tespiti için segmentasyon modellerinin seçimine yönelik önemli sonuçlar içermektedir. Çalışma PP-LiteSeg modelinin kullanımıyla birlikte sınırlı kaynağa sahip ortamlarda bile yüksek kalitede nesne tespiti yapılabileceğini kanıtlamıştır.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Demiryolu, Nesne tespiti, Akıllı ulaşım, YOLO, Semantik segmentasyon

Comparative Analysis of Deep Learning-Based Methods for Making Sense of Railway and Its Environment

Abstract: Rail safety in railways is very important for the prevention of train accidents. Objects around and on the rails pose a danger to the train. Therefore, the safe operation of trains by detecting unauthorized access to the railway is very important for smart transportation systems. In this study, image segmentation-based approaches are compared in order to make sense of the rail environment in railway systems, and the objects around the rail are detected. UNet, BiSeNetV2, DeepLabV3, and PP-LiteSeg models were analyzed comparatively to segment of the rail and its environment based on image segmentation. In addition, YOLOv7 has been applied to detect objects around the rail. Thus, it was evaluated how successful the models were in real-world scenarios. As a result of the experiments, it was determined that the PP-LiteSeg model, which stands out with its lightweight structure, showed high segmentation performance. It has been seen that the training phase is important in object detection, and it has been concluded that PP-LiteSeg can be successfully applied on single circuit boards such as Jetson Nano. Another model in the study, YOLOv7, has been optimized to run in parallel using the TensorRT library. A special control mechanism has been developed to use memory areas independently. According to the results obtained, it was seen that the PP-LiteSeg model achieved higher accuracy and mIoU values than other models. The study includes important results for the selection of segmentation models for fast and accurate object detection in rail systems. The study proved that with the use of the PP-LiteSeg model, high-quality object detection can be achieved even in environments with limited resources.

Atıf için/Cite as: İ. Aydın, T. K. Şener, M. Sevi, "Demiryolu ray ve çevresinin anlamlandırılması için derin öğrenme tabanlı yöntemlerin karşılaştırmalı analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 1-16, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1336812

Keywords: Deep learning, Railway, Object detection, Intelligent transportation, YOLO, Semantic segmentation

1. Giriş

Demiryolu ve trenlerdeki hızlı gelişim ile demiryolu ulaşımı yük taşımacılığının yanı sıra yolcu taşımacılığında da önemli bir alan haline gelmiştir. Demiryolu hatlarında sıklıkla kazalar meydana gelmekte olup ciddi yaralanma ve ölümler ile sonuçlanabilmektedir [1]. Tren güvenliği mevcut sistemlerde makinistin görüş alanı ve dikkatine bağlıdır. İstasyona giriş çıkışlarda tren düşük hız ile ilerlemekte olup makinistin görüşü yeterli olmaktadır. Fakat hava koşulları değişimi veya yorgunluk gibi etkenlerden dolayı makinist bazı izinsiz görüşleri kaçırabilmektedir [2]. Bu yüzden ray ve çevresinde tehdit oluşturabilecek nesnelerin gerçek zamanlı ve otomatik tespiti önem arz etmektedir. Raylı sistemlerin bir bileşeni olan raylar atmosferik koşullar, coğrafik farklılıklar, doğal felaketler (heyelan, deprem vb.) ve kullanım süresine bağlı olarak deformasyona uğrayabilir. Dolayısıyla rayların zaman zaman kontrol edilmesi ve denetimlerin yapılması oldukça önemlidir. Ray üzerinde çoklu ortam koşullarında nesne tespitinin yapılması, olası hataların tespit edilmesi, ray kavisleri, yabancı cisimler ve benzeri gibi birçok unsur nesne tespitinde güçlüğüne sebep olabilmektedir. Farklı durumlar için, nesne tespit yöntemleri çeşitlilik gösterir ve bu yöntemler, modele, niteliğe, olasılığa ve görünüme bağlı olarak değişmektedir [3-4]. Nesne tespiti, bir görüntü veya video içerisinde belirli nesnelerin konumlarını ve sınıflarını tespit etmeyi hedefler. Ancak görüntülerde olası ışık değişimleri nesne tespiti işlemlerini olumsuz etkileyebilir.

Demiryollarında izinsiz giriş tespiti için literatürde bazı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar daha çok görüntü işleme ve makine öğrenmesi yöntemlerinden faydalanmaktadır [5]. Özellikle bilgisayarlı görme ve nesne tespit sistemlerindeki gelişmeler derin öğrenme yöntemlerinin kullanımı ile daha doğru sonuçlar vermektedir. Derin öğrenme teknikleri, geleneksel tekniklere kıyasla probleme özgü farklı özelliklerin otomatik olarak öğrenilmesine yardımcı olmaktadır [6-8]. Belirli noktalara yerleştirilen video gözetim sistemleri sayesinde ray ve çevresindeki insanlar, hayvanlar ve araçlar otomatik olarak tespit edilebilmektedir [3]. Ye ve ark. [2] demiryolundaki izinsiz girişleri tespit etmek amacıyla az veri kullanan düşük ağırlıklı bir derin öğrenme modeli sunmuşlardır. Az veri kullanan sistemin performansını geliştirmek için ince ayar özelliği ve sınıflandırma modeli önermişlerdir. Geliştirilen sistemin tek kamera ve gömülü bir bilgisayar üzerinde prototipi oluşturulmuştur. Zheng ve ark. [4] metro istasyonlarında ray ve çevresindeki anormallikleri tespit etmek amacıyla sıralı güncellenebilir bir anormallik tespit yöntemi önermiştir. Önerilen sistem ile girişlerinde yasak bölgede bulunan kişilerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Gong ve ark. [9] demiryolu hatlarında izinsiz giriş tespiti için bölütleme ve birkaç adımlı öğrenme tabanlı çözüm önermiştir. Önerilen yaklaşım farklı hava koşullarında test edilmiş ve doğru sonuçlar elde edilmiştir. Demiryolu sistemlerinde video gözetimi ve yapay görme ile çevre ihlallerini tespit etmek amacıyla çoklu görev tabanlı bir sinir ağı modeli önerilmiştir [10]. Önerilen yaklaşım ilk olarak ufuk noktası tespiti için bir regresyon ağını eğitmektedir. Daha sonra kaybolan ufuk noktasının tespiti için kodlayıcı-kod çözücü bir bölütleme yaklaşımı kullanılmaktadır. Son aşama ise kodlayıcı-kod çözücü ile bölütleme sonucu ufuk noktasının işaretlenmesidir. Ding ve ark. [11] ray üzerindeki yabancı nesnelere tespit etmek amacıyla YOLOv5 tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Önerilen yaklaşım diğer nesne tespit yöntemleri ile karşılaştırılmış ve daha doğru sonuçların elde edildiği deneysel olarak belirlenmiştir. Oluşturulan veri seti gerçek ray verileri yerine el ile oluşturulmuş verilerden oluştuğundan gerçek zamanlı uyarlanabilirliği düşüktür. Demiryolu hattına izinsiz girişlerin tespiti için EfficientNet tabanlı tek atışlı çoklu kutu tespit edicisi (Single Shot MultiBox Detector-SSD) önerilmiştir [3]. Önerilen yaklaşım SSD'deki VGG16 omurgası yerine EfficientNet omurgası kullanılmıştır. Böylece CPU üzerinde de saniyede 11 frame işlenecek şekilde gerçek zamanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Fakat

eğitimde kullanılan veriler Pascal VOC veri setinden olup ray ve çevresinin anlamlandırılması ve ray üzerinde bir nesnenin belirlenmesini içermemektedir. Ray üzerinde bulunan nesnelerin insansız hava aracından alınan görüntülerden tespiti için evrişimsel uzun kısa süreli hafıza ağı tabanlı bir hibrit yöntem önerilmiştir [12]. Önerilen yaklaşım ile rayın güvenli olup olmadığı şeklinde iki sınıflı bir sınıflandırma yapılmaktadır. Cao ve ark. [13] ray ve çevresindeki izinsiz girişleri belirlemek amacıyla düşük ağırlıklı bir derin sinir ağı mimarisi önermişlerdir. Önerilen yaklaşım geleneksel görüntü işleme ile derin öğrenme yöntemlerini birleştirmektedir. Ayrıca giriş görüntüleri sıkıştırılmadığı için küçük boyutlu nesnelerin tespit performansı da artırılmıştır. Ray ve çevresinin anlamlandırılması için UNet tabanlı bir performans artırma yöntemi önerilmiştir [14]. Önerilen yöntem UNet'in omurga kısmında VGG16, Resnet34 ve MobileNetV2'yi kullanan modellerin birleştirilmesine dayalıdır.

Literatürde ray ve çevresinin anlamlandırılması için yapılan çalışmaların büyük bir kısmı daha çok ray ve çevresine izinsiz girişlerin tespit edilmesi üzerinedir. Literatürde bölütleme tabanlı ray ve çevresinin anlamlandırılması, ray tespiti ve tespit edilen ray bölgesine göre izinsiz giriş tespiti ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Nesne tespiti olarak ele alınan izinsiz giriş tespitinde nesnelerin rayın üzerinde olup olmadığına bakılmamaktadır. Bu çalışmada ray ve çevresinin anlamlandırılması için dört farklı derin öğrenme modeli kullanılmıştır. Bu modellerden UNet ve DeepLabV3 gibi klasik modellerin yanı sıra BiSeNetV2 ve PP-LiteSeg gibi gerçek zamanlı bölütleme yaklaşımları test edilmiştir. Bölütleme için kullanılan yöntemler bir kıyaslama veri seti üzerinde test edilmiş ve tespit performansı ile çalışma süresine göre en iyi performansı veren model belirlenmiştir. Ayrıca görüş açısına göre trene yakın olan iki ray bileşeni bölütlenerek ray üzerinde olan izinsiz girişler YOLOv7 nesne tespit algoritması ile tespit edilmiştir. Çalışmanın özgün katkıları aşağıda sıralanmıştır.

- Ray ve çevresinin gerçek zamanlı olarak bölütlenmesi için derin öğrenme tabanlı yöntemlerin karşılaştırılması,
- Ray ve çevresindeki izinsiz girişlerin tespit edilmesi,
- Ray bölgesinin çıkarılarak görüntü içerisinde belirlenmesi ve takibi için yeni bir yaklaşım sunulması
- Piksel tabanlı görüntü segmentasyonunda kullanılan hafif ve etkili bir derin öğrenme modeli olan PP-LiteSeg modeli ile demiryolu sistemleri ve hareket analizinin gerçek zamanlı olarak hassas bir şekilde belirlenmesi,
- Kameralı bir İHA ile pilotaj olmadan demiryolu rayı hattını takibini sağlamak,
- Bilgisayarlı görme sistemi geliştirilerek belli boyutlardaki farklı nesnelerin tanınması, otomatik olarak hareketli nesnenin belirlenmesi ve takibi.

2. Ray ve Çevresinin Anlamlandırılması için Derin Öğrenme Tabanlı Yaklaşım

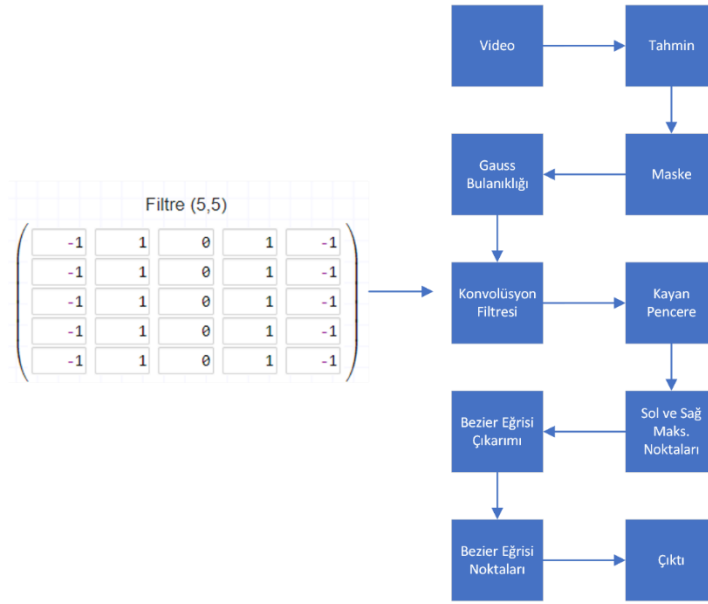
Bu çalışmada ray ve çevresinin anlamlandırılması için farklı bölütleme yöntemleri test edilmektedir. Eğitim aşamasında ray ve çevresindeki nesnelerin bölütlenmesi için derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu amaçla UNet [15], DeepLabV3 [16], BiSeNetV2 [17] ve PP-LiteSeg [18] yöntemleri kullanılmaktadır. Daha test aşamasında bölütlenen görüntüden sadece ray bölgesi belirlenmekte ve ray takibi için rayların işaretlenmesi sağlanmaktadır. Aynı zamanda ray çevresindeki tehdit oluşturan nesnelerin tespiti YOLOv7 [19] nesne tespit yöntemi ile tespit edilmektedir. Şekil 1'de önerilen yaklaşımın akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. Ray ve çevresinin anlamlandırılması için önerilen yaklaşım

Şekil 1’de demiryolu sistemleri üzerinde ray ve çevresinin anlamlandırılması için Railsem19 veri seti üzerinde UNet, BiSeNetV2, DeepLabV3 ve PP-LiteSeg modelleri ayrı ayrı test edilmiştir. En iyi başarımları ve hız performansını veren bölütleme yaklaşımını daha sonra seçilmektedir. Bölütlenen görüntüden ray bölgesini içeren alan çıkarılmakta ve ray takibi ve izinsiz giriş için ilgili bölge belirlenmektedir. Daha sonra ilgili bölgedeki izinsiz girişler YOLOv7 nesne tespit modeli ile tespit edilmektedir. Bu amaçla, COCO veri seti kullanılmaktadır. Hibrit modelde, iki modelin harmonik bir şekilde bir arada çalışması için bazı değişiklikler yapılmalıdır. Çünkü her iki model de sınırlı bir kaynağa sahip olan ekran kartı hafızasını ve CUDA çekirdeklerini kullanarak çıkarım yapmaktadır. Dolayısıyla modellerin ayrı hafıza alanlarında bağımsız olarak çıkarım yapabilmeleri için özel bir kontrol mekanizması gerekmektedir. Bu kontrol mekanizması sayesinde, her iki modelin hatalarının birbirlerinin hafıza alanlarını işgal etmeden, çıkarım yapması kritik öneme sahiptir. Bu gereksinimi sağlamak için TensorRT kütüphanesi kullanılmıştır. TensorRT, segmentasyon ağına öncelik vererek modelin gereksinim duyduğu hafızayı almasını sağlar ve geri kalan hafıza alanını en iyi şekilde kullanarak iki modelin paralel olarak çalışmasını sağlar. Bu şekilde, ek bir bekleme süreci olmaksızın ortak sonuçlar elde edilmesi mümkün olur.

İki modelin çıkarımına ek olarak, bir konvolüsyon filtresi yardımı ile demiryolu rayları üzerinde yapılan çıkarımın etraftaki gürültü olarak oluşmuş veya trenin üzerinde olmadığı rayların çıkarım yapılması engellenmiştir. Şekil 2’de görüldüğü gibi kullanılan bu yöntem sayesinde sol ve sağ rayların birbirinden ayrı biçimde oluşturulabilmesi mümkün olmuştur. Demiryolu raylarının iç kısmında kalan bölümün rahatlıkla çıkarımının yapılabilmesiyle, hem raylar üzerinde yapılacak incelemelerin daha kolay olması hem de ray üzerinde kalan alan içerisindeki nesnelerin diğer objelerden ayırt edilmesi sağlanmıştır. Çünkü raylı sistemler çoklu ortam koşullarına sahip olup, bir görüntüde birden çok nesne bulunabilmektedir.



Şekil 2. Sol ve sağ rayların bulunması

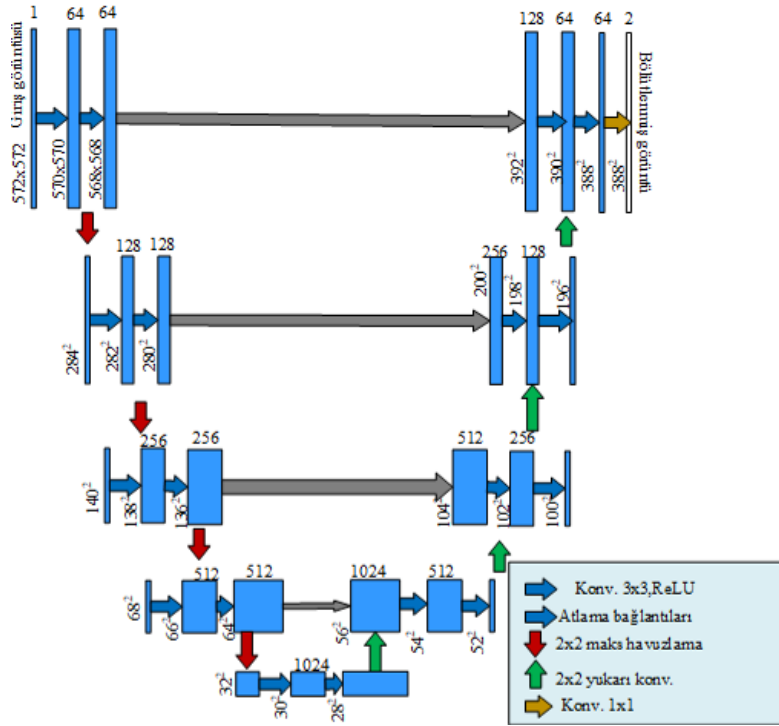
Çalışmada demiryolu rayı, elektrik direkleri, yerleşim alanları, hareketli nesne (kuş, araç vs.) ayrı ayrı sınıflara bölünmüştür. Kullanılan Railsem19 [20] veri seti 8500 adet görüntüden oluşmaktadır. Görüntüler 21 alt sınıfa ayrılmıştır. Her bir sınıf için görüntü artırımı teknikleriyle 8500'in üzerinde etiketlenmiş görüntü verisi temin edilmiştir. Görüntü artırımı teknikleri olarak parlaklık, görüntü çevirme ve gürültü ekleme kullanılmıştır.

2.1. YOLOv7

YOLO (You Only Look Once-Sadece bir kez bak) nesne tespit algoritması, Redmon ve ark. [21] tarafından gerçek zamanlı nesne tespiti yapılabilmesi için geliştirilen bir algoritmadır. Araştırmacılar, bu yaklaşımla doğrudan piksellerden nesnelerin yerini hızlıca belirleyebildiler. Ayrıca, Titan X GPU ile SSD de 45 resim saniyeler içinde belirlenirken, YOLO'da saniyede 150 resim belirlenebiliyor olduğu görüldü. YOLO algoritması, R-CNN mimarisinde belirlenen alanların çıkartılması, alanların sınıflandırılması problemini bir ağ ile çözebilme özelliğine sahiptir. Bu algoritma geleneksel nesne tespit yöntemlerinin aksine sınıf olasılıklarının hesaplanması, sınırlayıcı kutuların bulunması ve hemen hemen tüm işlemleri tek bir regresyon problemi olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yani, YOLO ile görüntü üzerinde hangi nesnelerin nerede olduklarını tespit etmek için görüntüye yalnızca bir kez bakılması yeterlidir. YOLO tespit modeli, eğitim seti kapsamındaki her görüntüyü NxN kafeslere böler. Bu kafeslerin her biri bir hücreyi temsil eder. Modelin sorumluluğu, belirlenen nesnelerin merkez konumunu tespit etmek ve merkezin bulunduğu hücreyi o nesneyi tespit etmekten sorumlu tutmaktır. Bu çalışmada son popüler YOLO modellerinden YOLOv7 nesne tespiti için kullanılmaktadır.

2.2. UNet

UNet 2015 yılında Ronneberger ve ark. [15] tarafından sunulmuş, bir kodlayıcı (encoder) ve çözücü (decoder) yapısından oluşan bir mimardır. Kodlayıcı yolu, tipik bir evrişimli sinir ağı gibi giriş görüntüsünü aşağı örnekleme yaparak yüksek seviyeli özellikleri çıkarırken mekânsal bağlamı yakalar. Her kodlayıcı blok sırasıyla konvolüsyonel katmanlardan, ReLU aktivasyon fonksiyonundan ve maksimum havuzlama işlemlerinden oluşmaktadır. Aşağı örnekleme işlemi mekânsal boyutları azaltırken özellik kanallarının sayısını artırmaktadır. Çözücü yolu ise kodlayıcı yolundan gelen düşük çözünürlüklü özellik haritalarını orijinal görüntü boyutuna yükseltme işleminden sorumludur. Şekil 3'te UNet mimarisi verilmiştir.



Şekil 3. UNet model mimarisi

Şekil 3'te her çözücü blok, kodlayıcı yolundaki karşılık gelen özellik haritalarıyla yukarı örnekleme edilen özellik haritalarını birleştirir. Bu atlayış bağlantıları, ağırlıklı ölçeklerde hem yerel hem de global bağlamsal bilgiyi yakalamasını sağlar. Atlayış bağlantılarının birleştirilmesi, kodlayıcı yolundan gelen ince ayrıntıların yükseltme işlemi sırasında korunmasını sağlar. Bu bağlantılar, düşük seviyeli özellikleri ve mekânsal bilgiyi çözücüye aktararak segmentasyon sınırlarını iyileştirir ve daha doğru segmentasyon sonuçları üretmeye yardımcı olur. UNet, tıbbi görüntü segmentasyonu, hücre çekirdeği segmentasyonu ve otonom sürüşte yol segmentasyonu gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Başarısı, sınırlı eğitim verisiyle başa çıkma yeteneği ve yerel ve global bağlamsal bilgiyi yakalama etkinliği ile ilişkilendirilebilir.

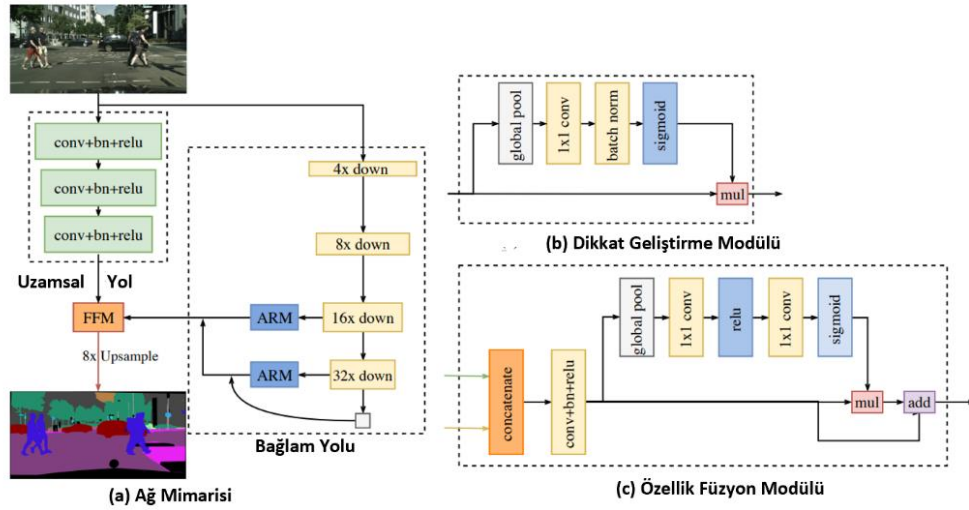
2.3. DeepLabV3

Google tarafından geliştirilen bu model bilgisayarlı görüde yaygın olarak kullanılan bir derin öğrenme modelidir. Özellikle piksel tabanlı görüntü segmentasyonunda etkili sonuçlar vermektedir [16]. Evrişimsel sinir ağı tabanlı mimariye sahip olup, daha önceki versiyonlarına kıyasla oldukça yüksek bir segmentasyon performansı sunmaktadır. Bu modelde, dilatasyon konvolüsyon ve atrous konvolüsyon gibi yenilikçi teknikler sayesinde daha büyük bir reseptif alan elde edilir ve ayrıntılar daha iyi bir şekilde yakalanabilmektedir [22]. Mimari olarak DeepLabV3, derinlik bilgisi eklemek için önceden eğitilmiş bir evrişimli sinir ağını omurga olarak kullanır. Bu omurga modeli, görüntüyü önce birkaç evrişimli ve havuzlama katmanından geçirerek özellik haritalarını çıkarır. Tipik olarak, Xception, ResNet ve MobileNet gibi güncel omurga modelleri kullanılır. Aşırı Uzaysal Piramit Havuzu (ASPP) modülü kullanılarak çıkarılan özellik haritaları işlenir. Bu modül, farklı dilatasyon oranlarına sahip atrous konvolüsyon katmanları içermesi sebebiyle, farklı ölçeklerdeki nesnelere ve nesnelere detaylarını doğru bir şekilde yakalayabilmesine olanak sağlar. Özellik haritaları piksel tabanlı sınıflandırma yapmak için bir konvolüsyonel ağa verilir. Bu aşamada, çıktı haritası elde edilir ve her pikselin sınıf etiketi belirlenir. Genellikle, çıktı haritasını daha pürüzsüz hale getirmek için bir rötüş işlemi olan eşikleme veya Gauss filtresi uygulanır. Görüntü segmentasyonunda bu model üstün bir performansa sahiptir.

2.4. BiSeNetV2

BiSeNetV2 (Bilateral Segmentation Network- İkili Segmentasyon Ağı V2), görüntü segmentasyonunda kullanılan bir derin öğrenme modelidir. BiSeNetV2, tamamen konvolüsyonel bir ağıdır. Bu model, gerçek zamanlı uygulamalarda hızlı ve yüksek doğruluk sağlayabilen bir segmentasyon yöntemi sunar [17]. BiSeNetV2, biri yol-odaklı bir diğeri detay-odaklı olarak iki farklı özellik çıkarımını sunar. Yol-odaklı özellik uzun menzilli bağlamsal bilgiyi yakalamak için geniş bir görüntü alanına odaklanırken, detay-odaklı özellik kısa menzilli detay bilgisini korumak için daha yakından odaklanır. Bu iki yol birleştirilerek hem genel bağlamı hem de detayları yakalayan bir segmentasyon ağı oluşturulur.

BiSeNetV2 modeli sınıf-etiketi ve kenar pikselleri tahmin edilebilmektedir. Böylece nesnelerin keskin kenarları korunurken, aynı zamanda doğru bir şekilde segmentasyon yapılabilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, yanıtlama haritalarını kullanarak segmentasyon performansını geliştirmiştir. BiSeNetV2, hızlı ve doğru segmentasyon sonuçları sağlayan, ölçeklenebilir bir segmentasyon ağıdır. Bu model, sürücüsüz araçlar, robotik, video analizi ve diğer birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. BiSeNetV2 modeli Şekil 4'te verilmiştir.

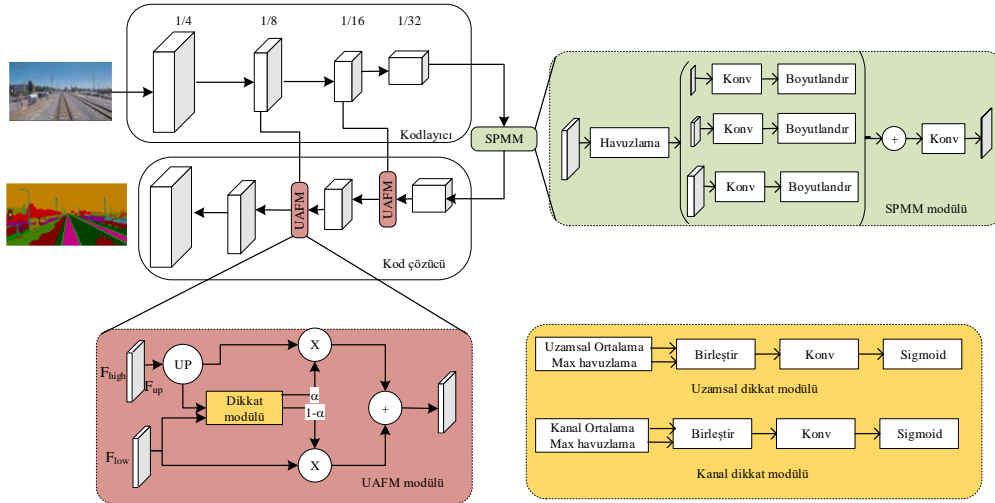


Şekil 4. BiSeNetV2 model mimarisi [17]

Şekil 4'te görüldüğü gibi iki farklı ölçekli gözetim yöntemini ile hem yüksek hem de düşük ölçekli özellik haritalarının segmentasyon sonuçlarıyla eğitimini sağlayarak daha iyi segmentasyon performansı elde eder. Bu, hem genel nesne yapısını doğru bir şekilde tahmin etmeyi hem de daha küçük nesnelerin detaylarını yakalamayı sağlar [17].

2.5. PP-LiteSeg

PP-LiteSeg (Progressive Perception Lite Segmentation- Aşamalı Algılayıcı Basit Segmentasyon) piksel tabanlı görüntü segmentasyonunda kullanılan hafif ve etkili bir derin öğrenme modelidir [18]. Bu model, yüksek performans sergilerken daha az hesaplama gücü ve bellek kullanımı gerektiren uygulamalara odaklanmıştır. PP-LiteSeg, önceden eğitilmiş bir evrişimli sinir ağı ve birden fazla aşamalı algılayıcı modülünden oluşan bir ilerleyici öğrenme stratejisini birleştirir. Bu strateji, segmentasyon performansını aşamalı olarak artırarak daha hafif bir modele olanak tanır. Şekil 5'te PP-LiteSeg modelinin şematik bir görünümü verilmiştir.



Şekil 5. PP-LiteSeg bölütleme mimarisi

Şekil 5'te verilen PP-LiteSeg mimarisi kodlayıcı-kod çözücü ve gerçek zamanlı çalışan bir bölütleme yöntemidir. Bu model kodlayıcı-kod çözücü tabanlı bir bölütleme yöntemi olup birleşik dikkat füzyon modülü (Unified Attention Fusion Model-UAFM) ve basit piramit havuzlama modülüne (Simple Pyramid Pooling Module-SPPM) sahiptir. UAFM çerçevesi bir α ağırlığı üretmek amacıyla dikkat modülü kullanmaktadır. F_{high} ve F_{low} olarak verilen giriş özelliklerini α ve $1-\alpha$ ile çarpılarak çıkış olan F_{out} 'u elde eder. Dikkat modülü olarak kanal ve uzamsal modüller kullanılmaktadır. Uzamsal dikkat modülü giriş özelliklerinde her bir pikselin önemini gösterirken kanal dikkat modülü ise giriş özelliklerinde her bir kanalın önemini vurgular. SPPM modülü ise giriş özelliklerini kaynaştırmak için piramit havuzlama modülü kullanır. Bu havuzlama modülü boyutları 1×1 , 2×2 ve 4×4 olan üç havuzlama modülüne sahiptir. Boyutlandırma aşamasından sonra ise toplama ve evrişim modülleri bulunmaktadır. SPPM modülü birleştirme işlemi yerine toplama işlemini kullanması orta ve çıkış katmanlarını azaltmasından dolayı gerçek zamanlı modeller için uygundur. Modelin temelinde, evrişimli sinir ağı tabanlı omurga modeli bulunur. Bu omurga modeli, giriş görüntüsünden özellik haritalarını çıkarmak için kullanılır. PP-LiteSeg'de, genellikle hafif ve hızlı çalışan omurga modeli olarak MobileNetV2 tercih edilir. Birden çok aşamalı algılayıcı modülü kullanır. PP-LiteSeg'de aşamalı algılayıcı modülleri, modelin sırasıyla geliştirilmesi ve eğitilmesi ile elde edilir. PP-LiteSeg, hafif bir yapıya sahip olmasına rağmen yüksek segmentasyon performansı sunar. Özellikle sınırlı kaynağa sahip cihazlar veya gerçek zamanlı uygulamalar için oldukça uygundur.

2.6. Metrikler

Modelin test edilmesi için model eğitimi tamamlandıktan sonra eğitilen ağırlıklar kullanılarak model değerlendirilir. Segmentasyon modellerinin performansını değerlendirmek için mIoU, tahmin edilen segmentasyon sonuçlarıyla gerçek etiketler arasındaki örtüşmeyi ölçmek içinse IoU kullanılmıştır. Segmentasyon, bir giriş görüntüsünü piksellerine göre farklı nesne veya bölgelere ayırmayı hedefleyen bir görsel işleme görevidir. Bu nedenle, bir segmentasyon modelinin ne kadar doğru ve hassas olduğunu değerlendirmek için etkili bir ölçüt gereklidir. İşte mIoU bu amaçla kullanılan bir ölçüdür. mIoU, her bir sınıf için IoU değerlerinin ortalamasını olarak hesaplanır. IoU'nun hesaplama denklemi Denklem 1'de gösterilmiştir.

$$IoU = \frac{\text{Gerçek} \cap \text{tahmin}}{\text{Gerçek} \cup \text{tahmin}} \quad (1)$$

Bu denklemde tahmin, modelin tahmin ettiği piksellerin kümesini, gerçek ise gerçek etiketlere karşılık gelen piksellerin kümesini temsil etmektedir. mIoU, sınıf başına IoU değerlerinin ortalamasını alarak hesaplandığından, her sınıfın katkısı dengelenir. Dolayısıyla, modellerin çoklu sınıflarla çalıştığı senaryolarda da adil bir performans ölçütü sağlar. mIoU değeri genellikle %0 ile %100 arasındadır. Yüksek bir mIoU değeri, modelin segmentasyon görevini daha iyi yerine getirdiğini gösterirken, düşük bir mIoU değeri doğruluk düşüklüğünü veya yanlış tahminleri gösterebilir. Model geliştirme sürecinde mIoU değeri, modelin performansını izlemek, hiper parametre ayarlamalarını yapmak ve farklı modelleri karşılaştırmak için kullanılabilir. Çıkarım hızı, bir segmentasyon modelinin giriş görüntüsünü işlemek ve tahminleri üretmek için geçen süreyi ifade eder. Bu hız, modelin ne kadar hızlı çalıştığını ve gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilirliğini belirler. Segmentasyon modelleri, genellikle derin öğrenme ağı tabanlıdır ve genellikle GPU'lar veya özel işlem birimleri gibi yüksek hesaplama gücü gerektiren donanımlar üzerinde çalışır. Bu nedenle, bir segmentasyon modelinin çıkarım hızı, donanımın özelliklerine, modelin karmaşıklığına ve boyutuna bağlı olarak değişebilir [23]. Bu çalışmada alınan bulgular aynı donanım ve tek bir görüntü üzerinden alınması nedeniyle aşağıdaki sonuçlar bölümünde farklı modellerin kıyaslamaları yapılmıştır.

Semantik segmentasyonun doğruluğunu değerlendirmek için kappa katsayısı istatistiksel ölçü olarak kullanılmıştır. Denklem 2'de gösterildiği gibi bu katsayı, sınıflandırıcılar arasındaki uyumu ölçer ve rastgele ne kadar farklılık olduğunu belirler. Kappa katsayısı, -1 ile 1 arasında bir değere sahiptir. Şayet değer -1 ise tamamen zıt sonuçları, değer 0 ise rastgele sonuçları, değer 1 ise mükemmel uyumu gösterir [24].

$$Kappa\ Katsayısı = \frac{Gözlemlenen\ Doğruluk - Beklenen\ Doğruluk}{1 - Beklenen\ Doğruluk} \quad (2)$$

Bu çalışmada semantik segmentasyonun doğruluğunu ölçmek için, referans etiket ve gerçek etiketlerle birlikte görüntü veri setine ihtiyaç vardır. Doğru sınıflandırılan veri noktaları, modelin tahminlerinin gerçek etiketlerle aynı olduğu veri noktalarını ifade eder. Modelin kesinliğini tespit etmek amacıyla, Denklem 3'te gösterildiği gibi AP (ortalama kesinlik) ve mAP (ortalama kesinlik değerlerinin ortalaması) metrikleri kullanılmıştır [25].

$$Doğruluk = \frac{Doğru\ Sınıflandırılan\ Veri\ Noktalarının\ sayısı}{Toplam\ Veri\ Noktalarının\ sayısı} \quad (3)$$

Denklem 3'te doğruluk değeri 0 ile 1 arasında olup, genellikle yüzde olarak ifade edilir. Yüksek bir doğruluk değeri, modelin doğru tahminlerde bulunma yeteneğini gösterirken, düşük bir doğruluk değeri yanlış sınıflandırmaların olduğunu işaret eder [22].

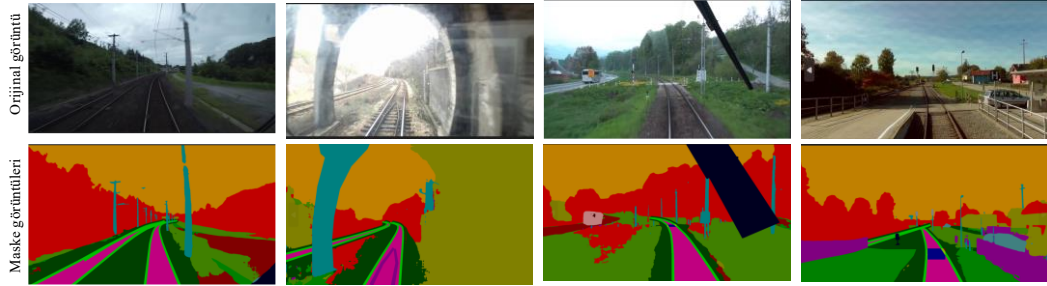
3. Bulgular

Geliştirme ortamı olarak Ubuntu 20.04 LTS işletim sistemi üzerine Python 3 versiyonu kurulmuştur. Grafik kartı olarak Nvidia GeForce RTX 4090, merkezi işlemci olarak Ryzen 9 7900X ve 32 GB RAM'e sahip bir kişisel bilgisayar kullanılmıştır. Önerilen bölütleme yöntemlerinin doğrulanması amacıyla farklı ışık ve gün koşullarında alınan bir kıyaslama veri seti olan Railsem19 veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti tren ve şehir içi tramvayın önünden çekilmiş toplam 8500 görüntüden oluşmaktadır. Veri seti semantik bölütleme için etiketlenmiş 21 sınıfa sahip olup ray, kaldırım, trafik levhası, gökyüzü, insan, araba, kamyon gibi nesnelere içermektedir. Tablo 1'de veri setinden her bir etiket için veri setindeki örnek sayısı verilmiştir.

Tablo 1. Railsem19 için sınıf başına etiket sayısı

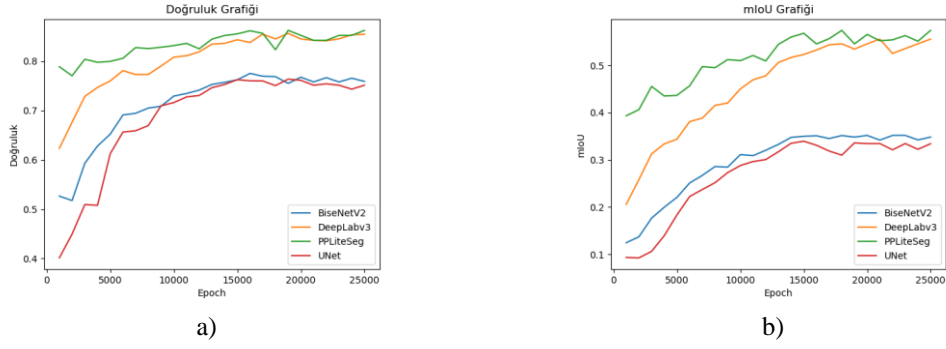
| Etiket | Sayı | Etiket | Sayı |
|---------------------|-------|------------------|-------|
| Dur Levhası | 218 | Statik Anahtar | 2519 |
| Geçit | 2885 | Ray İşaret-Ön | 7404 |
| Korkuluk | 4873 | Ray Geri Sinyal | 3448 |
| Vagon | 1951 | Ray İleri Sinyal | 5768 |
| Platform | 2482 | İnsan Grubu | 62 |
| Ray | 58322 | Araba | 172 |
| Anahtar Tanımlayıcı | 2007 | Çit | 291 |
| Sol Anahtar | 1975 | İnsan | 234 |
| Sağ Anahtar | 2083 | Direk | 10875 |
| Tanımsız Anahtar | 2491 | Ray Engeli | 3920 |
| Kamyon | 11 | | |

Tablo 1’de verilen etiketlere göre özellikle ray çiftlerinin belirlenmesi için yeterli bilginin olduğu görülmektedir. Görüntüler farklı hava koşullarında toplanmıştır. Şekil 6’da veri setinden bazı ray görüntüleri ve maskeleri verilmiştir.

**Şekil 6.** RailSem19 veri seti ve maske görüntüleri

Çalışmada demiryolu raylarının segmentasyonunda birden fazla model incelenmiş ve her bir model üzerinde eğitim gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme yöntemi ile semantik segmentasyon alanında sıkça kullanılan UNet, DeepLabV3 gibi modellerin yanı sıra gerçek zamanlı olarak çalışan BiSeNetV2 ve PP-LiteSeg modelleri test edilmiştir.

Gerçekleştirilen eğitimler belirlenen bulgu parametreleri ile karşılaştırılarak çıktılar elde edilmiştir. Semantik bölütleme modellerinin doğruluk metriği ve mIoU metriklerine göre karşılaştırma sonuçları Şekil 7’de verilmiştir.



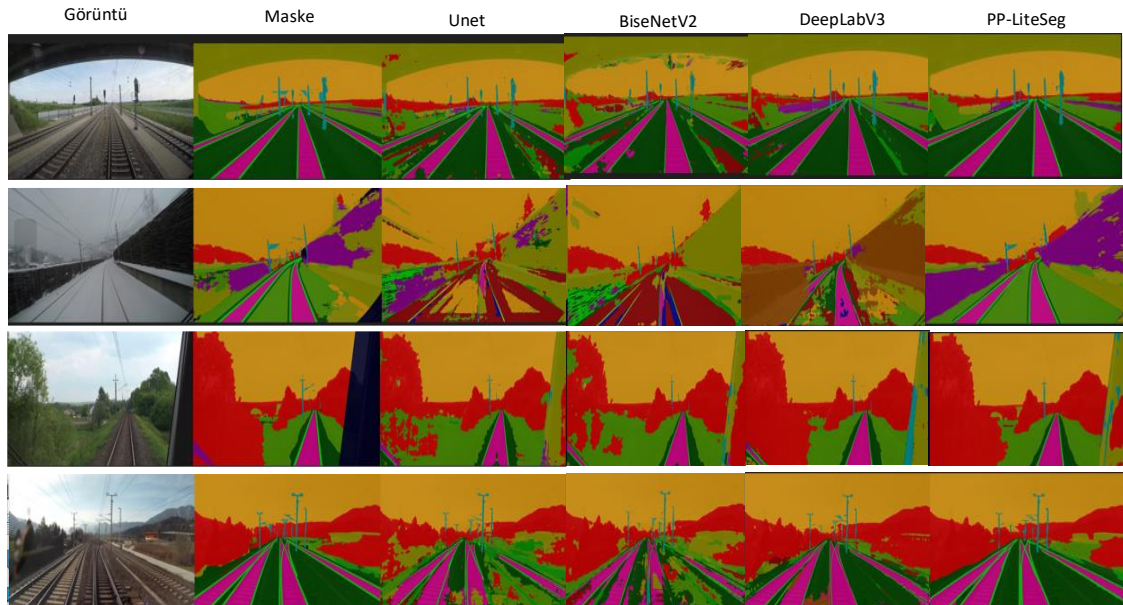
Şekil 7. Derin öğrenme tabanlı bölütleme modellerinin performansı a) Doğruluk grafiği b) mIoU grafiği

Şekil 7’de görüldüğü gibi PP-LiteSeg iki metrikte de diğer modellerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Şekil 7’de DeepLabV3, PP-LiteSeg modelinden sonra en iyi sonucu veren model olarak göze çarpmaktadır. PP-LiteSeg’in çıkarım hızının diğerlerinden daha iyi olması, semantik segmentasyon modeli olarak öne çıkmasına sebep olmuştur. Çalışmayı gerçekleştirirken yapılan deneylerin yanında Railsem19 [20] veri seti çalışmasında önerilen yöntemin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu metriklerin karşılaştırması Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Semantik bölütleme modellerinin performans karşılaştırılması.

| Metrik-Model | PP-LiteSeg | DeepLabV3 | UNet | BiSeNetV2 | Railsem19 [20] |
|--------------|------------|-----------|-------|-----------|----------------|
| Çıkarım (ms) | 3,82 | 11,23 | 6,72 | 8,76 | - |
| Doğruluk (%) | 96,8 | 96,1 | 74,38 | 74,87 | 91,24 |
| mIoU (%) | 58,8 | 57,9 | 32,67 | 31,94 | 56,9 |
| Kappa (%) | 76,7 | 74,8 | 55,3 | 55,2 | - |

Tablo 2’de görüldüğü gibi UNet, DeepLabV3, BiSeNetV2 yanında PP-LiteSeg modeli veri setini eğitmek için kullanılmıştır. PP-LiteSeg modelinin diğer modellere göre hem çıkarım hızı hem de performans metriklerinde daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir. Şekil 8’de dört farklı modelin aynı görüntü üzerindeki bölütleme sonuçları verilmiştir.



Şekil 8. Dört farklı modelin bölütleme sonuçları

Şekil 8’de görüldüğü üzere farklı iklim koşullarında PP-LiteSeg modeli sahneyi daha doğru bölütlemetedir. PP-LiteSeg modeline en yakın sonuçları DeepLabV3 modeli vermiştir. Kullanılan konvolüsyon filtresi ve devamında uygulanan algoritma ile rayların eğrisinin çıkarılması sağlanmış ve sağ-sol ray arasındaki bölge kolaylıkla tespit edilebilmiştir. Şekil 8’de görüldüğü üzere sadece tek rayın olduğu durumlarda değil, rayların birleştiği veya birden çok rayın aynı anda bulunduğu durumlarda dahi rahatlıkla doğru sonuca ulaşılacağı görülmektedir. YOLOv7’nin RTX 4090 ekran kartı kullanılarak yapılan deneylerde sadece 3 milisaniye (ms) çıkarım süresine sahip olması, hızlı ve efektif bir çıkarımın yapılabildiğinin ispatıdır. Modele ait görsel sonuçlar Şekil 9’da görülmektedir.

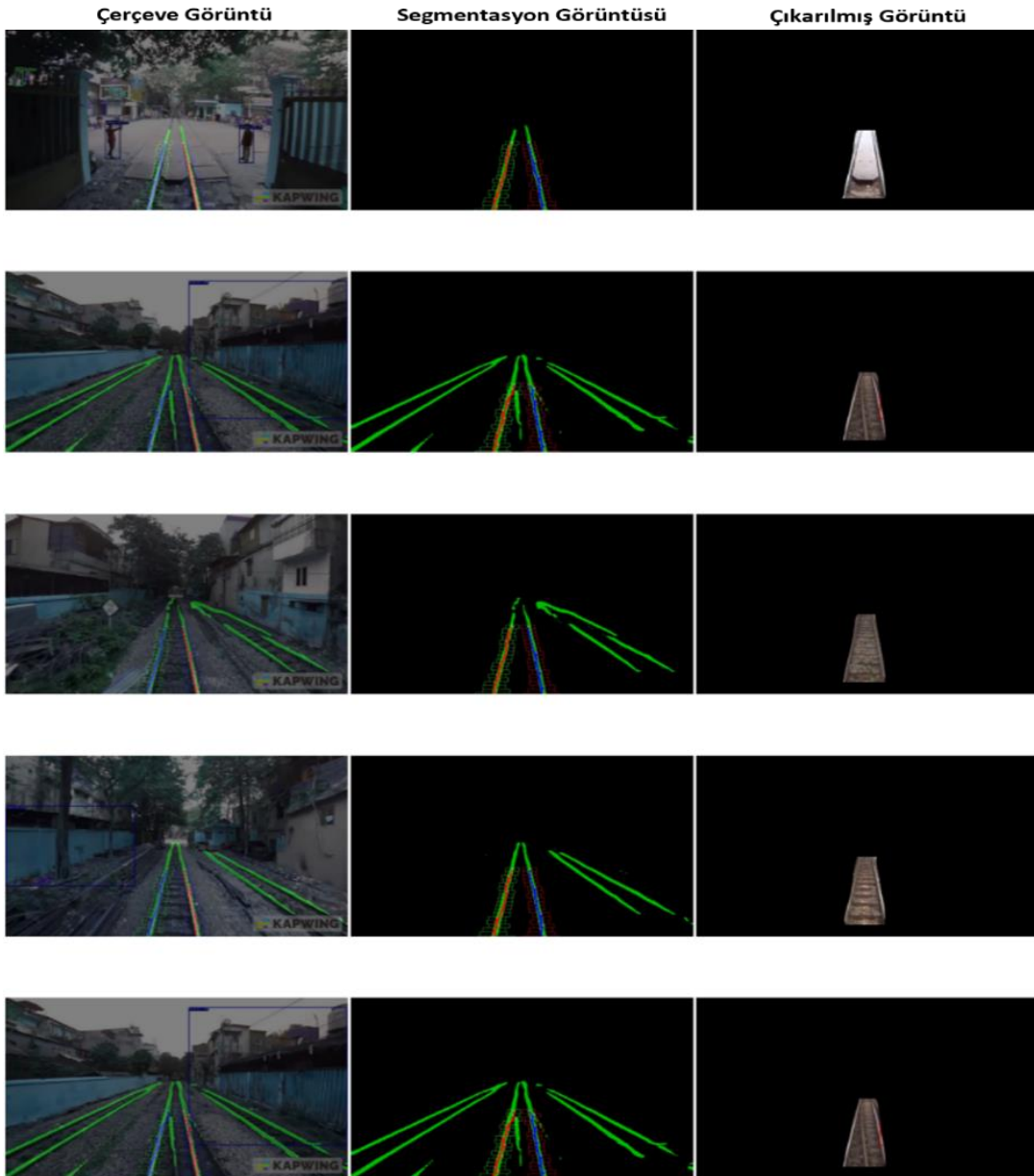


a) Bölütlenmiş ray ve ilgili alanın tespiti

b) Ray ve çevresindeki nesnelerin tespiti

Şekil 9. İlgili ray bölgesinin tespiti ve nesne tespiti

Şekil 9’da ilgili ray bölgesi belirlenmiş ve ray kenarında bulunan nesneler YOLOv7 modeli ile tespit edilmiştir. Şekil 10’da aktif rayın çıkarımı farklı görüntüler üzerinden verilmiştir.



Şekil 10. Aktif ray bölgesinin çıkarımı

4. Sonuç

Bu makalede, atmosferik koşullar, coğrafik farklılıklar, doğal felaketler ve kullanım süresi gibi demiryolu rayları üzerinde meydana gelebilecek olası değişimlerin kontrolünde kolaylık sağlayacak nesne tespitinin yapılabilmesini sağlayacak algoritma modelleri çalışılmıştır. Farklı veri setlerinin hibrit kullanım ile probleme çözüm olabileceği de önerilmiştir. Farklı nesnelere içeren 8500'in üzerindeki görüntü, görüntü artırım işlemine tabi tutulmuştur. Eğitim işleminde 8500 adet ray içeren görüntü kullanarak eğitim tamamlanmıştır. Doğrulama işlemi için 250 adet görüntü, test işlemi için 100 adet görüntü kullanılmıştır. Toplam 21 sınıf üzerinde ortalama %58,8 mIoU oranı elde edilmiş, demiryolu raylarında ise %88,7 IoU oranına ulaşılmıştır. Deneyler sonucunda PP-LiteSeg modelinin yüksek segmentasyon performansı gösterdiği ve sınırlı kaynağa sahip ortamlarda bile yüksek kalitede nesne tespiti yapılabilirliğini kanıtladığı görülmüştür. Ayrıca, YOLOv7 modelinin optimize edilerek paralel çalışabilir hale getirildiği ve özel bir kontrol mekanizması ile hafıza alanlarının bağımsız olarak kullanılabilir hale getirildiği belirtilmiştir.

Kullanılan görüntü işleme ve segmentasyon modellerinin değerlendirilmesi sonucunda, bu çalışmanın güçlü yönleri şunlarla öne çıkmaktadır: yüksek performans, sınırlı kaynaklarla kullanılabilirlik, optimizasyon ve kontrol mekanizması. Bu çalışma, nesne tespitinde topluluk modelleme ve girdi verisinin boyutunu artırmanın başarı oranını etkilediğini göstermiştir. Önerilen model farklı ortam koşullarında test edilmiştir. Ray görüntülerini başarılı bir şekilde tespit eden model bu etkiyi doğrulamıştır. Sistemin demiryolu rayları üzerinde rahatlıkla hata ve anomali tespiti yapabileceği kanıtlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından ADEP.22.02 nolu proje ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] T. Zhu, & JMMS. De Pedro, "Railway traffic conflict detection via a state transition prediction approach," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 5, pp. 1268-1278.
- [2] T. Ye, Z. Zheng, X. Li, Z. Zhao, & XZ. Gao, "An efficient few-shot object detection method for railway intrusion via fine-tune approach and contrastive learning," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- [3] Y. Li, Y. Qin, Z. Xie, Z. Cao, L. Jia, Z. Yu & E. Zhang, "Efficient SSD: a real-time intrusion object detection algorithm for railway surveillance," In 2020 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC), pp. 391-395. IEEE
- [4] Z. Zheng, W. Liu, R. Liu, L. Wang, L. Mao, Q. Qiu, & G. Ling, "Anomaly detection of metro station tracks based on sequential updatable anomaly detection framework," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 32, no. 11, pp. 7677-7691
- [5] X. Ding, X. Cai, Z. Zhang, W. Liu, & W. Song, "Railway foreign object intrusion detection based on deep learning," In 2022 International Conference on Computer Engineering and Artificial Intelligence (ICCEAI), pp. 735-739. IEEE.
- [6] SS. Kırat & İ. Aydın, "Açıklanabilir Yapay Zekâ Tabanlı Denetimsiz Öğrenme ile Ray Kusur Tespiti", *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 18, pp. 1-13. doi:10.47072/demiryolu.1231751.
- [7] M. Sevi, İ. Aydın, E. Akın, "Detection of rail surface defects based on ensemble learning of YOLOv5," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 17, pp. 115-132. doi: 10.47072/demiryolu.1205483.
- [8] D. Çetintaş & T. Tuncer, "Determining the type of document read using eye movement properties by hybrid CNN method," *Traitement du Signal*, vol. 39, no. 4, pp. 1099.
- [9] X. Gong, X. Chen, Z. Zhong & W. Chen, "Enhanced few-shot learning for intrusion detection in railway video surveillance," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 11301-11313.
- [10] X. Li, L. Zhu, Z. Yu, B. Guo, & Y. Wan, "Vanishing point detection and rail segmentation based on deep multi-task learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163015-163025.
- [11] X. Ding, X. Cai, Z. Zhang, W. Liu, & W. Song, "Railway foreign object intrusion detection based on deep learning," In 2022 International Conference on Computer Engineering and Artificial Intelligence (ICCEAI), pp. 735-739. IEEE.
- [12] H. Huang, G. Zhao, Y. Bo, J. Yu, L. Liang, Y. Yang, & K. Ou, "Railway intrusion detection based on refined spatial and temporal features for UAV surveillance scene," *Measurement*, vol. 211, 112602.
- [13] Z. Cao, Y. Qin, Z. Xie, Q. Liu, E. Zhang, Z. Wu & Z. Yu, "An effective railway intrusion detection method using dynamic intrusion region and lightweight neural network," *Measurement*, vol. 191, 110564.
- [14] M. Sevi, İ. Aydın, "Improving Unet segmentation performance using an ensemble model in images containing railway lines," *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, vol. 34, no. 4, pp. 739-750.
- [15] O. Ronneberger, P. Fischer, & T. Brox, "U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation," In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, 2015, Proceedings, Part III* 18, pp. 234-241.

- [16] LC. Chen, G. Papandreou, F. Schroff & H. Adam, “Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation,” *arXiv preprint arXiv:1706.05587*.
- [17] C. Yu, C. Gao, J. Wang, G. Yu, C. Shen & N. Sang, “Bisenet v2: Bilateral network with guided aggregation for real-time semantic segmentation,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 129, pp. 3051-3068.
- [18] J. Peng, Y. Liu, S. Tang, Y. Hao, L. Chu, G. Chen, & Y. Ma, “Pp-liteseg: A superior real-time semantic segmentation model,” *arXiv preprint arXiv:2204.02681*.
- [19] CY. Wang, A. Bochkovskiy & HYM. Liao, “YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors,” *arXiv 2022. arXiv preprint arXiv:2207.02696*.
- [20] O. Zendel, M. Murschitz, M. Zeilinger, D. Steininger, S. Abbasi, S & C. Beleznaï, “Railsem19: a dataset for semantic rail scene understanding,” *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 0-0.
- [21] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick & A. Farhadi, “You only look once: Unified, real-time object detection,” *In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 779-788.
- [22] P. Li, H. Xiong, J. Fan, “Sun dfanet: Deep feature aggregation for real-time semantic segmentation,” *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2019*, pp. 9522-9531
- [23] E. Romera, JM. Alvarez, LM. Bergasa, R. Arroyo, “Erfnet: efficient residual factorized convnet for real-time semantic segmentation,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2017: 19*, pp. 263-272.
- [24] RP. Poudel, S. Liwicki, R. Cipolla, “Fast-scnn: fast semantic segmentation network,” *arXiv preprint arXiv:1902.04502 2019*.
- [25] H. Zhao, X. Qi, X. Shen, J. Shi & J. Jia, “Icnet for real-time semantic segmentation on high-resolution images,” *In: Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV) 2018*, pp. 405– 420.

Özgeçmiş



İlhan AYDIN

1981 yılında Elâzığ’da doğdu. Lisans ve Yüksek Lisans derecelerini Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde 2001 ve 2006 yıllarında aldı. Doktora derecesini 2011 yılında Fırat Üniversitesi, Elâzığ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden aldı. Halen Fırat Üniversitesi’nde Bilgisayar Mühendisliği bölümünde Profesör Doktor olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında optimizasyon, gerçek zamanlı sistemler, hata teşhisi ve durum izleme, sinyal ve görüntü işleme ve derin öğrenme bulunmaktadır.

E-Posta: iaydin@firat.edu.tr



Taha Kubilay ŞENER

1999 Elâzığ doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Elâzığ’da tamamladı. 2018 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği halen eğitimine devam etmektedir. Çalışma alanları yapay zekâ, görüntü işleme ve derin öğrenme alanlarıdır.

E-Posta: tksener23@gmail.com

**Mehmet SEVİ**

1988 yılında Denizli’de doğdu. Lisans derecesini Doğu Akdeniz Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde (Burslu, İngilizce), Yüksek Lisans derecesini ise Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde aldı. Şu an Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde doktora öğrencisidir. Araştırma alanları arasında görüntü işleme ve derin öğrenme bulunmaktadır. Aynı zamanda Muş Alparslan Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığında mühendis olarak çalışmaktadır.

E-Posta: m.sevi@alparslan.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: İlhan AYDIN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Taha Kubilay ŞENER: Kaynaklar, Doğrulama, Yazılım. Mehmet SEVİ: Görselleştirme, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Sıcak Aks Kutusu Tespit Sistemlerinde Arka Plan Işımlarının Kızılötesi Sensor Ölçüm Verilerine Etkisinin İncelenmesi

Kürşad GÖKCE^{ID}

TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Robotik ve Akıllı Sistemler Bölümü, Kocaeli, Türkiye

kursad.gokce@tubitak.gov.tr

(Alınış/Received: 06.09.2023, Kabul/Accepted: 18.09.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Kızılötesi sıcaklık ölçüm teknolojisi, demiryolu taşıtlarının güvenliği ve verimliliği için kritik öneme sahiptir. Ancak çevresel koşullar, özellikle yansıyan radyasyona bağlı arka plan ışımaları (back-ground radiation), doğru ölçümleri engelleyebilir veya yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Bu çalışma, arka plan ışımalarının sıcak aks kutusu kızılötesi sıcaklık sensör ölçüm verilerine olan etkisini incelemekte ve bu etkiyi elimine edecek analitik bir yöntem önermektedir. Bu sayede daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sunmaktadır. Bu amaçla, aks kutusunun gerçek verilerine dayalı bir simülasyon modeli kurulmuş ve farklı ortam sıcaklıklarının sensör ölçüm sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler, ortam ile ölçüm yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı azaldıkça arka plan ışımalarının etkisinin daha yüksek olduğunu göstermiştir. Örneğin 50°C bir hedef yüzey sıcaklığı ve 45°C ortam sıcaklığı altında 6,8°C bir sıcaklık sapması oluşmuştur. Ayrıca kızılötesi sensörün sıcaklığı doğru algılaması için yüzeyin yayıcılık katsayısının düzgün belirlenmesinin önemli olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kızılötesi, Sensor, Ölçüm, Sıcaklık, Aks Kutusu, Demiryolu

Investigation of the Effect of Background Radiations on Infrared Sensor Measurement Data in Hot Axle Box Detection Systems

Abstract: Infrared temperature measurement technology is of critical importance for the safety and efficiency of railway vehicles. However, environmental factors, particularly background radiations, can hinder accurate measurements or lead to misleading results. This study examines the impact of background radiations on the infrared temperature measurement data for hot axle box system and proposes an analytical method to compensate this effect, thereby contributing to achieving more precise and reliable measurements. For this purpose, a simulation model based on actual axle box data was established, and the impact of different ambient temperatures on sensor measurement data was examined. The data obtained from the simulation results indicate that the effect of background radiation becomes more prominent as the temperature difference between the environment and the measurement surface decreases. For example, a temperature deviation of 6,8°C has occurred at a target surface temperature of 50°C and an ambient temperature of 45°C. Furthermore, the results show that accurate determination of the surface's emissivity coefficient is crucial for the infrared sensor to perceive temperature correctly.

Keywords: Infrared, Sensor, Measurement, Temperature, Axle Box, Railway

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı, modern toplumların sürdürülebilir ve verimli ulaşım ihtiyaçlarını karşılamada kritik bir rol oynamaktadır. Demiryolu sistemleri, geniş alanları kapsayarak insan ve yük taşımacılığını en etkili ve çevre dostu şekillerde gerçekleştirmeyi sağlar. Bu sektörün karşı karşıya kaldığı önemli zorluklardan biri, demiryolu altyapısının ve taşıtlarının güvenliği ve verimliliğinin sağlanmasıdır. Bu bağlamda, aks rulman sıcaklık ölçüm sistemi, demiryolu hatlarının güvenli ve sorunsuz işletilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Özellikle demiryolu taşıtlarının yüksek hızlarda seyrettiği hatlarda, kritik aks rulman sıcaklığına sahip araçların önceden tespit edilmesi oldukça önemlidir.

Atıf için/Cite as: K. Gökce, "Sıcak aks kutusu tespit sistemlerinde arka plan ışımalarının kızılötesi sensor ölçüm verilerine etkisinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 17-26, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1355960

Demiryolu taşıtlarında aks kutusu sıcaklığını ölçmek için genellikle iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; Akustik Algılama Sistemi (TADS™) ve Sıcak Aks Kutusu Detektörleridir (HBD). TADS™, yol kenarı mikrofonlar kullanılarak yüksek riskli kusurları tespit etmekte ve kondüktörü uyarmaktadır [1]. Ancak TADS™ genellikle ısınmış aks rulmanlarının tespit edilmesinde yetersiz kaldığı için çok az yerde, ABD (Amerika Birleşik Devletleri) ve Kanada'da toplam 30 noktada kullanılmaktadır [2]. HBD'ler ise en yaygın rulman sıcaklık izleme sistemi olup, ABD'de bu detektörlerden ülke genelinde 6000'den fazla bulunmaktadır [3]. Tipik olarak, HBD'ler özellikle yük vagonlarının yoğun seyrettiği hatlarda yaklaşık 24 ila 48 km aralıklarla konumlandırılır. Her tren geçişinde, HBD'ler rulmanların alt yüzeyini kızılötesi sensörlerle tarar ve hedef yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığına daha önceden belirlenmiş bir değer kadar aştığında bir uyarı verir. Genellikle bir rulmanın sıcaklığı ortam sıcaklığının 94,4°C (170°F) üzerinde veya aynı aksı paylaşan rulmanın sıcaklığından 52,8°C (95°F) daha yüksek ise alarm sinyali üretilir [4]. Sıcak aks kutusu için alarm eşik değerleri ve ölçüm sıcaklık toleransları EN 15437-1:2009 standardında tanımlanmıştır [5]. Standartta tanımlı alarm eşik değerleri Tablo 1'de ve izin verilen sıcaklık doğruluk değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. EN 15437-1:2009'a göre alarm eşik değerleri

| Sıcak Alarmı | Fark Alarmı | Ilık Alarmı |
|--------------|-------------|-------------|
| 95°C | 56°C | - |
| 85°C | 50°C | 85°C |
| 100°C | 30°C | 90°C |
| 105°C | 35°C | 90°C |

Tablo 2. EN 15437-1:2009'a göre sıcaklık doğruluk değerleri

| Ölçüm Sıcaklık Aralığı | Doğruluk değerleri |
|------------------------|--------------------|
| -50°C – 0°C | ≥±10°C |
| 0°C – 15°C | ±10°C |
| 16°C – 20°C | ±5°C |
| 21°C – 90°C | ±3°C |
| 91°C – 120°C | ±5°C |

Tablo 1'de belirtilen fark alarm değerleri aynı aks üzerindeki iki rulman arasındaki sıcaklık farkını göstermektedir. Ilık alarm bilgisi ise sıcak alarm değerine ulaşmadan önce üretilen bir uyarıdır. Tablo 2'de ise farklı ölçüm sıcaklık aralıkları için ölçülen değerlerin gerçek sıcaklık değerinden izin verilen sapma miktarları belirtilmiştir.

HBD sistemleri demiryolu araçlarının tekerlek yataklarında (aks rulman) meydana gelebilecek aşırı ısınma durumlarını izlemek ve aks kitlenmelerini önceden saptamak açısından oldukça kritiktir. Aks kutusunun aşırı ısınması, hem güvenlik hem de işletme verimliliği açısından ciddi tehlikelere yol açabilir. Aşırı ısınmadan kaynaklı arıza öncesinde bir rulmandan yayılan sıcaklık 25 dakikalık bir süre içinde 800°C civarına yükselebilmektedir [6]. Bu ise aks kutularının yanmasına ve raydan çıkmaların yaşanmasına neden olmaktadır. Özellikle yük vagonlarında, yokuş aşağı seyir esnasında uzun süreli frenleme yapılması sonucu ortaya çıkan yüksek ısı, tekerlekler ve buna bağlı olarak aks kutusunun hasar almasına yol açabilmektedir [7]. İstatistikler, 2003-2012 yılları arasında Kuzey Amerika genelinde toplam raydan çıkma vakalarının %20,48'inin sıcak rulman arızalarından kaynaklandığını göstermektedir [8]. Avrupa Demiryolu Ajansının 2011 raporunda da demiryolu araçlarında raydan çıkma olaylarının önemli bir kısmının sıcak aks kutusu tespit sistemindeki arızalardan kaynaklandığı belirtilmiştir [9]. Buna ilişkin en son vaka 3 Şubat 2023 tarihinde Norfolk Southern Demiryollarına ait bir yük treninde yaşanmıştır. Yük treni Ohio'nun East Palestine bölgesinde raydan çıkmış ve sonrasında çıkan

yangında büyük bir zarar meydana gelmiştir. Federal güvenlik araştırmacılarının ön raporuna göre, yük treninin raydan çıkması, sıcak aks kutusu ölçüm sisteminin gerekli alarm bilgisini zamanında üretememiş olmasından kaynaklanmıştır. HBD sistemlerinde alarm sinyalinin daha erken üretilerek bu tip kazaların önüne geçmek mümkündür. Ancak bu durumda yanlış alarm (false-alarm) oluşabilmekte ve arızası olmayan bir tren, hattan çıkartılmakta veya gereksiz duruşlar yaşanabilmektedir. Amsted Rail şirketi tarafından 2001-2007 yılları arasında HBD sistemlerinden toplanan veriler incelenmiş ve rulman arızası nedeniyle müdahale edilen araçların yaklaşık %40'ının arızasız olduğu tespit edilmiştir [10]. Yüksek oranda yaşanan bu yanlış alarm durumları yüzünden hattan çıkartılan trenler işletme açısından zaman ve gelir kaybına yol açmaktadır.

Tüm bu olaylar demiryolu araçlarının sürekli izlenerek aşırı ısınma durumlarının hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesinin, demiryolu taşımacılığının güvenliği ve işletme verimliliği açısından ne kadar hayati bir konu olduğunu göstermektedir. Ancak, demiryolu taşıtlarının çalıştığı çeşitli dış ortam koşulları, sıcak aks kutusu ölçüm sistemlerinin performansını etkilemektedir. Özellikle açık havada veya farklı iklim koşullarında çalışan demiryolu hatlarında, hedef yüzeyin etrafındaki sıcak nesnelere veya yüzeyden yansıyan ve yayılan kızılötesi (infrared) ışığa (radyasyon), doğru sıcaklık ölçümlerini zorlaştırabilir ve yanlış alarm durumlarının oluşmasına yol açabilir. Bu nedenle, demiryolu taşımacılığı alanında kullanılan sıcak aks kutusu ölçüm sistemlerinde arka plan kızılötesi ışığa etkisinin anlaşılması ve ele alınması büyük önem arz etmektedir. Arka plan ışınmasını dikkate alan bir uygulamada diferansiyel dönüşüm yöntemi ile arka plan ışınmaları kompanze edilmiş ve kızılötesi sıcaklık ölçüm sonuçları %0,01-%5 arasında değişen doğrulukta elde edilmiştir [11]. Arka plan ışınmaları, sıcaklık ölçümünde kullanılan kızılötesi termal görüntüleyiciler için de oldukça önemlidir. Kızılötesi termal görüntüleyiciler nesne yüzeyinin yansıtıcılığı (reflectivity) ve yayıcılığı (emissivity), ortam sıcaklığı, atmosferik koşullar ve ölçme mesafesi gibi birçok faktörden etkilenmektedir [12]. Kızılötesi termal görüntüleyicilerde bu faktörlerin ve arka plan ışınmalarının sıcaklık ölçüm sonuçlarına etkisi deneysel olarak da ortaya konmuştur [13]. Bir başka çalışmada ortam sıcaklığı kaynaklı arka plan ışınmasının PbSe (lead selenide) tipi sıcaklık sensör karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiş ve arka plan ışınmalarının parazit etki olarak mutlaka değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Buna ilişkin bir ölçüm düzeneği hazırlanarak lineer kompanzasyon yöntemi ile arka plan ışınmalarının etkisi elimine edilmiş ve 20°C'lik bir ortam sıcaklığı değişimi için 3°C'den daha az sıcaklık ölçüm hatası elde edilmiştir [14].

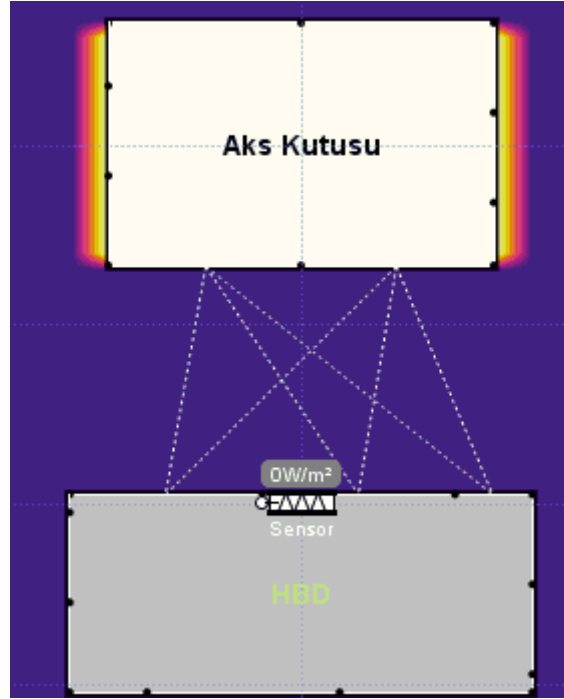
Özetle sıcak aks kutusu kaynaklı raydan çıkmalara önlenmesi veya yanlış alarm durumlarının oluşmaması için hassas bir sıcaklık ölçümü yapılması ve gerekli uyarı sinyalinin zamanında üretilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, HBD sistemlerinin performansını etkileyen arka plan kızılötesi ışınmanın hedef yüzey ölçüm sıcaklığına olan etkisi farklı ortam sıcaklıkları için analiz edilmiş ve bu etkiyi elimine edecek analitik bir yöntem önerilmiştir. Bu analiz çalışması literatürde yapılan bazı deneysel çalışmaların sonuçlarını da destekleyecek şekilde teorik bir altyapı teşkil etmiştir. Analitik bir yöntemle arka plan ışınmalarının etkisinin ortaya konması sadece demiryolu uygulamaları özelinde değil farklı dalga boyu aralıklarında kızılötesi sensör kullanılan başkaca alanlara da bu analizin kolayca uygulanabilmesini sağlamıştır. Ayrıca kızılötesi sıcaklık sensör verilerinin doğru bir şekilde elde edilmesi için yayıcılık katsayısının doğru değerde belirlenmesinin önemi ortaya konmuştur. Makalenin ikinci kısmında sıcak aks kutusu ve kızılötesi sensör davranışını modellemek için kullanılan simülasyon ortamından ve izlenen yöntemden bahsedilmiştir. Üçüncü kısımda ise analiz sonuçlarına değinilmiş ve bulgular ortaya konmuştur. Son kısımda ise yapılan çalışmanın sonuçları verilmiştir.

2. Metot

Kızılötesi sensörden toplanan sıcaklık verilerini simüle etmek için Energ2D termal analiz programında bir sahne ortamı kurulmuştur. Burada örnek bir aks kutusunun taban ölçülerinde

(yaklaşık 200x270 mm) bir geometrik yüzey oluşturulmuş ve hareketli yüzeyden yayılan termal radyasyon (W/m^2) bir sensör yardımıyla algılanmıştır. Sensör, EN 15437-1:2009'da HBD sistemi için verilen montaj ölçülerine uygun olacak şekilde ölçüm yüzeyinden 50 cm aşağıya ve kutuyu en az 100 mm genişlikte tarayacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 1'de oluşturulan simülasyon sahnesi görülmektedir.

Sıcak aks kutusu paslanmaz çelik bir malzemenin özelliklerinde tanımlanmıştır. Simülasyon çalışmalarında kutunun sıcaklığı $100^\circ C$, termal iletkenliği $45 W/mK$, özgül ısı $420 J/kg^\circ C$ ve yoğunluk $7850 kg/m^3$ olarak girilmiştir. Kutunun yayıcılık katsayısının bulunması için TCDD'den temin edilen örnek aks kutusu üzerinde sıcaklık testleri yapılmıştır. Kutu üzerine bağlanan termocouple çiftlerinden okunan değerlerle Fluke marka termal kameradan okunan sıcaklık verileri farklı yayıcılık katsayıları girilerek eşleştirilmiştir. Farklı aks kutuları teste tabi tutulmuş ve ölçüm sonuçlarına bağlı olarak ortalama $0,85-0,90$ arasındaki değerlerin uygun olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak simülasyonda aks kutusu yayıcılık katsayısı $0,875$ olarak girilmiştir. Sıcak aks kutusu sensörün üzerinden belirli bir hızda geçirilerek sensörden okunan termal radyasyon değerleri hesaplamalarda kullanılmak üzere zamana bağlı olarak W/m^2 cinsinden bir tabloya yazılmıştır.



Şekil 1. Simülasyon sahnesi

2.1. Termal radyasyon sıcaklık ilişkisi

Simülasyon çıktısı olan sensör termal radyasyon değerlerinden sıcaklık verisi elde edebilmek için Planck'ın radyasyon kuralından (Planck's Radiation Law) yararlanılmıştır. Bu kural 1900 yılında Alman fizikçi Max Planck tarafından sıcak bir cisimden yayılan spektral radyasyon yayılımını ifade etmek üzere ortaya konulmuştur. Buna göre Denklem 1'de verildiği üzere her cisim sıcaklığına ve dalga boyuna bağlı olarak bir radyasyon yaymaktadır.

$$R = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

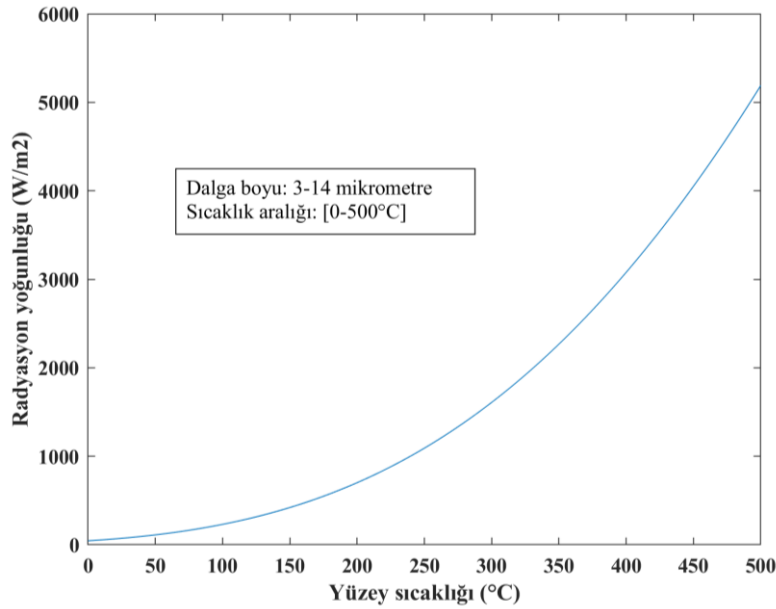
$$c_1 = 2hc^2$$

$$c_2 = h \frac{c}{k_B}$$

Burada λ dalga boyu (m), T yüzey sıcaklığı (K), R termal radyasyon (W/m^2), h Planck sabiti (J/Hz), c ışık hızı (m/sn), k_B Boltzmann sabitidir (J/K). Denklem 2 ile R fonksiyonunun belirli bir dalga spektrum aralığı ve sıcaklık değeri için integrali alınarak o aralık için toplam termal radyasyon yoğunluğu, R_T , elde edilmiştir.

$$R_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R d\lambda \quad (2)$$

Hesaplamlarda sıcak aks kutusu tespit sistemlerinde kullanılan ve piyasada bulunan mevcut kızılötesi sensörlerin spektral algılama ve ölçüm sıcaklık aralıkları dikkate alınmıştır. Buna göre, orta-uzun kızılötesi dalga boyu aralığını kapsayacak şekilde $\lambda_1 = 3\mu m$ ve $\lambda_2 = 14\mu m$ olarak seçilmiştir. $[0-500^\circ C]$ sıcaklık ölçüm aralığı için $1^\circ C$ hassasiyetle sensörün sıcaklığa bağlı termal radyasyon yoğunluk eğrisi Şekil 2'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. Radyasyon yoğunluğuna bağlı sıcaklık eğrisi

Şekil 2'deki eğriden yararlanılarak verilen bir radyasyon yoğunluğu için sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Bunun için eğri Denklem 3'de gösterildiği gibi üçüncü dereceden bir polinom fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.

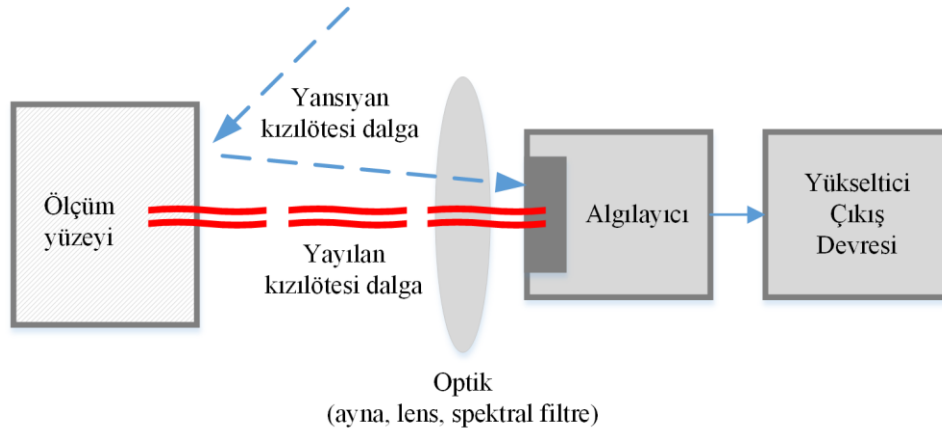
$$R_T = AT_S^3 + BT_S^2 + CT_S + D \quad (3)$$

$$R_T = \prod_{k=1}^n (T_S - r_k)$$

Burada T_S sensörden okunan sıcaklık değerleri olup katsayılar Şekil 2'deki eğriden $A = 2e^{-5}$, $B = 9,4e^{-3}$, $C = 0,55$, $D = 55,76$ olarak hesaplanmıştır. Reel katsayılı ve tek dereceli her polinomun en az bir reel kökü vardır ve bu fonksiyonun verilen bir radyasyon yoğunluğu için elde edilen pozitif reel kökü, $r_k \in \mathbb{R}^+$, sıcaklık bilgisini vermektedir. Böylece simülasyon ortamında sensörden okunan termal radyasyon verilerinden sıcaklık bilgisi elde edilebilmektedir.

2.2. Arka plan ışımasının elimine edilmesi

Kızılötesi sensörler Şekil 3’de görüldüğü gibi belirli dalga boyuna duyarlı optik algılama elemanları üzerinden termal radyasyonu algılamakta ve üzerine düşen sıcaklığa bağlı olarak bu değişimi elektriksel bir sinyale dönüştürmektedirler. Ancak üretilen bu sinyal çok zayıf olduğundan genellikle bir yükseltici devre üzerinden çıkışa aktarılmaktadır. Sensörler sadece ölçüm yüzeyinden gelen radyasyonu değil aynı zamanda ortam içerisinde diğer cisimlerden yansıyan termal radyasyonu da algılamaktadırlar. Arka plan ışıması olarak adlandırılan bu parazit etki ortam sıcaklığına bağlı olarak sensörden okunan sıcaklık verilerini de olumsuz etkilemektedir. Özellikle algılama elemanları tarafından üretilen sinyal çok düşük seviyede olduğundan ve sonrasında bu sinyal yükseltildiğinden parazit bileşende yükseltilerek çıkışa aktarılır ve ölçüm sonuçlarında önemli sapmalara neden olur.



Şekil 3. Kızılötesi sensör algılama birimi

Dolayısıyla ölçüm yüzeyinin gerçek sıcaklığını bulabilmek için yüzeyden yansıyan bu arka plan ışımasının bertaraf edilmesi önemlidir. Sensör tarafından algılanan radyasyon değerinden yansıyan radyasyon miktarı (arka plan ışıması) çıkartılırsa yüzeyden yayılan radyasyon miktarı bulunabilir. Bunun için Denklem 4’de belirtilen analitik ifade kullanılarak arka plan ışımasının etkisi elimine edilmiştir.

$$R_{TG}(T_G) = R_{TS}(T_S) - (1 - \varepsilon)R_{TO}(T_O) \quad (4)$$

Burada ε malzemenin yayıcılık katsayısıdır. Kızılötesi sensörlerin genellikle yayıcılık katsayısı ayarlanabilir olup, sağlıklı ölçüm alınabilmesi için malzemenin yayıcılık katsayısının doğru bir şekilde belirlenerek sensöre önceden tanıtılması oldukça önemlidir. R_{TS} sıcak aks kutusundan yayılan ve yansıyan radyasyon miktarlarının toplamı olup sensör tarafından algılanan simülasyon çıktısıdır. R_{TS} nin bilinmesi durumunda Denklem 3 yardımıyla T_S sensör sıcaklık değerleri elde edilebilir. R_{TO} , ortam sıcaklığı, T_O , ya bağlı yansıyan radyasyon değeridir. Simülasyonda ortam sıcaklığı $T_O = 23^\circ C$ olarak ayarlanmıştır. Denklem 3’deki polinom fonksiyonuna T_O değerleri girilirse bu ortam sıcaklıklarına karşılık gelen R_{TO} değerleri hesaplanabilir. Sensör tarafından algılanan toplam radyasyon değerinden, R_{TS} , yansıyan radyasyon değeri, R_{TO} , çıkartılırsa yayılan radyasyon değeri, R_{TG} , elde edilir. R_{TG} hesaplandığında benzer şekilde yine Denklem 3 yardımıyla ortam sıcaklığına bağlı arka plan ışımasından arındırılmış yüzeyin gerçek sıcaklık değeri, T_G , bulunabilir.

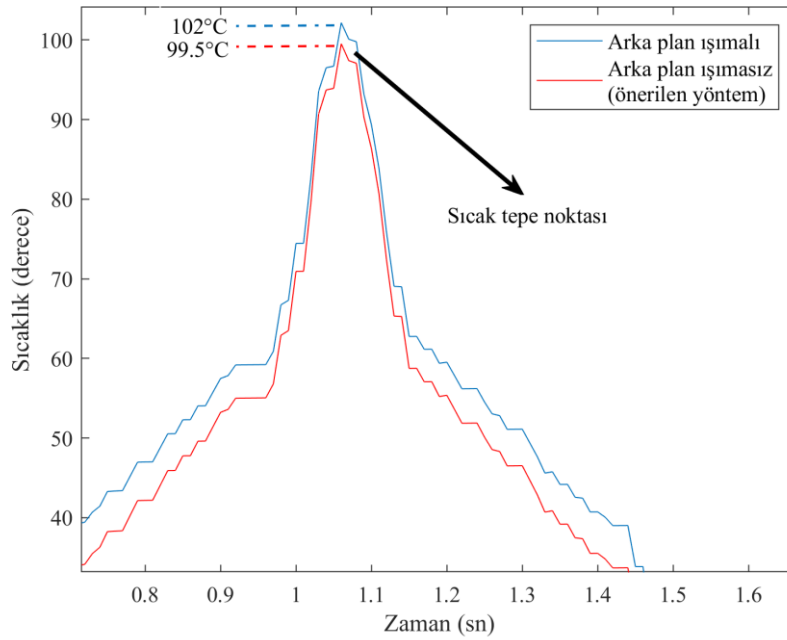
3. Bulgular

Arka plan ışımasının sensör sıcaklık verilerine etkisini incelemek üzere simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon ortamında Tablo 3’de verilen parametreler kullanılmıştır.

Tablo 3. Simülasyon parametreleri

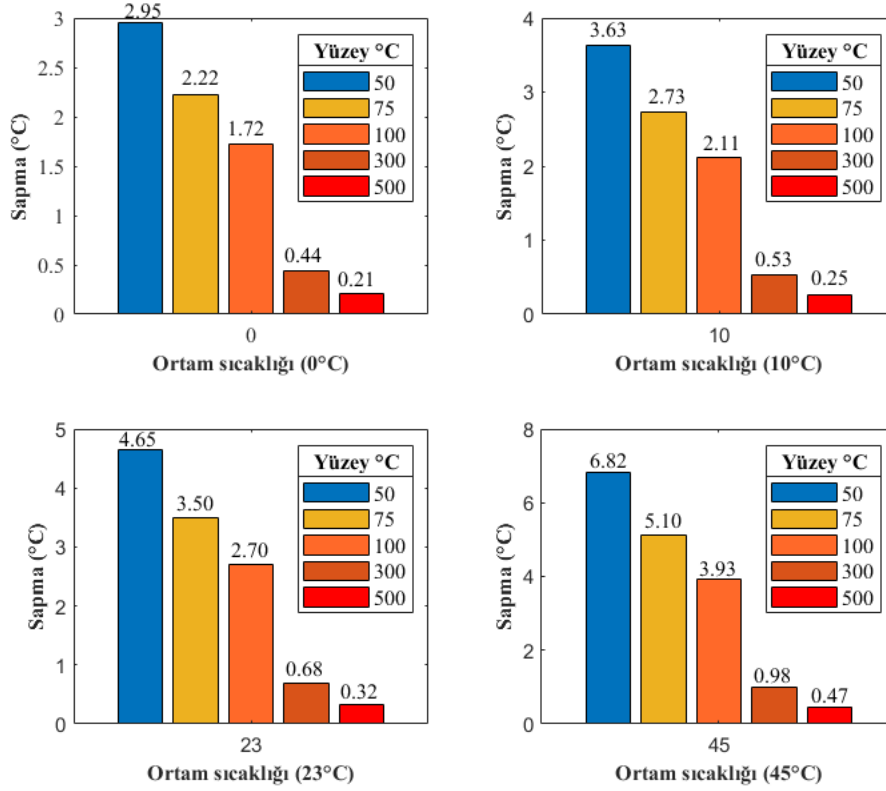
| Parametre | Değer |
|--|------------------------|
| Aks kutusu yayıcılık katsayısı, ϵ | 0,875 |
| Aks kutusu sıcaklık set değeri | 100°C |
| Aks kutusu termal iletkenliği | 45 W/mK |
| Aks kutusu özgül ısısı | 420 J/kg°C |
| Aks kutusu yoğunluğu | 7850 kg/m ³ |
| Ortam sıcaklığı, T_O | 23°C |

Simülasyon ortamında sensör tarafından algılanan R_{TS} değerleri zamana bağlı olarak bir tabloya girilmiştir. Girilen değerler ve Tablo 3’de verilen parametreler kullanılarak sensörün algıladığı T_S ve hesaplanan gerçek sıcaklık değeri T_G elde edilmiştir. Algılanan sıcaklık değeri ile hesaplanan gerçek sıcaklık değeri Şekil 4’de üst üste çizdirilmiştir.

**Şekil 4.** Algılanan ve hesaplanan gerçek sıcaklık değişim grafiği

Şekil 4’de ortam sıcaklığına bağlı arka plan ışımasının etkisi görülmektedir. Gerçek sıcaklığı 100°C olan aks kutusunun en sıcak noktada sensör tarafından algılanan değeri 102°C’dir. Bu ise %2 sapma anlamına gelmektedir. Arka plan ışıması Denklem 4 yardımıyla elimine edildiğinde ise hesaplanan gerçek sıcaklık değeri 99,5°C olup gerçek değere oldukça yakındır. Bu durumda gerçek değerden %0,5 kadar bir sapma söz konusudur.

Şekil 4’de görülen arka plan ışımasının etkisi ortam sıcaklığına, yüzey sıcaklığına ve yüzeyin yayıcılık katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5’de yayıcılık katsayısı sabit tutularak farklı dış ortam sıcaklıkları (0-10-23-45°C) ve farklı yüzey sıcaklıkları (50-75-100-300-500°C) için sensörün algıladığı sıcaklığın gerçek sıcaklık değerinden ne kadar saptığı görülmektedir.



Şekil 5. Algılanan ve hesaplanan gerçek sıcaklık değişim grafiği

Şekil 5'den görüleceği üzere, en büyük sapma 6,82°C olarak dış ortam sıcaklığı 45°C ve yüzey sıcaklığı 50°C olması durumunda gerçekleşmiştir. Yani gerçek sıcaklık değeri 50°C olmasına rağmen arka plan ışımasının etkisiyle sensör bunu 56,82°C olarak algılamıştır. Yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark arttıkça bu sapma miktarı da düşmektedir. Örneğin 300°C yüzey sıcaklığı ve 23°C ortam sıcaklığı için sapma miktarı 0,68°C'dir. Sıcak aks kutusu tespit sistemleri için EN 15437-1:2009'da belirtilen uyarı seviyeleri (95°C-105°C) ve izin verilen doğruluk değerleri ($\pm 3^\circ\text{C}$, $\pm 5^\circ\text{C}$) göz önüne alındığında özellikle yazın sıcak hava koşullarında yanlış alarm durumlarının önüne geçmek için bu sapma miktarlarının dikkate alınması gerektiği görülmektedir.

Ölçüm sonuçlarının doğruluğuna etki eden bir başka parametrede yayıcılık katsayısıdır. Yüksek yayıcılık katsayısına sahip malzemelerin (mat, boyalı yüzeyler) yansıtıcılık (reflectivity) katsayısı düşük olduğundan arka plan ışımasının etkisi de daha azdır. Ancak yüksek yansıtıcı yüzeylerin (açık renkli parlak, cilalı yüzeyler, örneğin disk yüzeyleri) yayıcılık katsayıları düşük olduğundan ($\varepsilon < 0,3$) yüzey sıcaklıklarının doğru bir şekilde algılanabilmesi için kızılötesi sensörlerin yayıcılık katsayısının önceden düzgün bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Aksi halde ölçüm sonuçlarında ciddi sapmalar oluşabilmektedir. Örneğin yayıcılık katsayısı $\varepsilon = 0,3$ olarak bilinen parlak yüzeyli bir malzeme 23°C ortam sıcaklığında 100°C'ye kadar ısıtılmış ve $\varepsilon = 0,9$ olarak kalibre edilmiş bir termal kamera ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Termal kamera ile 100°C'lik yüzey ortalama 50°C olarak ölçülmüştür. Bu ise kritik sıcaklığa ulaşılmış bir aks kutusunun daha düşük sıcaklıkta algılanarak olası bir rulman arızasının önceden tespit edilememesi anlamına gelmektedir. Böyle bir durumda ısınan aks kutusunun yanması ve ciddi kazalara yol açması kaçınılmazdır.

4. Sonuç

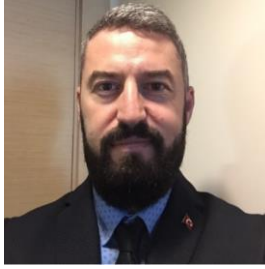
Bu çalışmada, demiryolu taşımacılığında emniyet kritik bir sistem olan sıcak aks kutusu ölçüm sistemlerinin performansını etkileyen arka plan (back-ground) kızılötesi (infrared) ışımının hedef yüzey ölçüm sıcaklığına olan etkisi farklı ortam ve yüzey sıcaklıkları için detaylı bir şekilde incelenmiştir. Simülasyon ortamında aks kutusu hedef ölçüm yüzeyi ve sensör modellemesi yapılarak veriler toplanmıştır. Toplanan verilerden radyasyon yoğunluk dağılım fonksiyonu kullanılarak sıcaklık bilgisi üretilmiştir. Arka plan ışımının parazit etkisi analiz edilerek bu etkiyi elimine edecek analitik bir yöntem önerilmiştir. Arka plan ışımının elimine edilmesiyle hesaplanan sıcaklık değerindeki doğruluk oranının örneğin 100°C yüzey sıcaklığı için 0-45°C ortam sıcaklığı aralığında ortalama %2,6 arttığı görülmüştür. Bu artış, ortam sıcaklığının üzerindeki daha düşük yüzey sıcaklıkları için daha da fazla gerçekleşmiştir. Farklı ortam ve yüzey sıcaklıkları altında arka plan ışımının etkisi analiz edilerek ölçüm sonuçlarının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Hedef yüzey ve ortam arasındaki sıcaklık farkı azaldıkça arka plan ışımaya etkisinin de yüksek olduğu görülmüştür. Sıcak aks kutusu için yaklaşık 100°C'de alarm sinyali üretildiğinden bu etkinin özellikle yazın 40-45°C gibi yüksek sıcaklıklarda yanlış alarm üretilmesine yol açabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca kızılötesi sensörler için yayıcılık katsayısının doğru bir şekilde ayarlanmasının önemi ortaya konmuştur. Yüksek yayıcılık katsayısına ayarlanmış bir sensörün, gerçekte daha düşük yayıcılık katsayısına sahip bir yüzeyin sıcaklığını olması gerekenden düşük ölçtüğü ve buna bağlı olarak kritik seviyeye ulaşmış bir aks rulman arızasının önceden tespit edilememesine yol açabileceği görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları, demiryolu taşımacılığının güvenliği ve verimliliği için daha hassas sıcaklık ölçüm sistemleri tasarımını desteklemeyi amaçlamaktadır. Sıcak aks kutusu ölçümü ile ilgili gelecekte yapılması planlanan saha çalışmaları ile önerilen analitik yöntemin gerçek verilerle de doğrulanması planlanmaktadır. Ayrıca Comsol gibi sonlu elemanlar analizi programı ile de yöntemin doğrulanması sağlanabilir.

Kaynakça

- [1] G. B. Anderson, "Acoustic detection of distressed freight car roller bearings," in *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, Colorado, USA, 2007, pp. 167-171
- [2] J. Montalvo, C. Tarawneh, and A. A. Fuentes, "Vibration based defect detection for freight railcar tapered-roller bearings," in *Proceedings of the 2018 Joint Rail Conference*, Pittsburgh, USA, 2018
- [3] C. Tarawneh, J. Aranda, V. Hernandez, S. Crown, and J. Montalvo, "An investigation into wayside hot-box detector efficacy and optimization," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 8, no. 3, pp. 264-284, 2020, doi: 10.1080/23248378.2019.1636721
- [4] C. Tarawneh, J. Montalvo and B. Wilson, "Defect detection in freight railcar tapered-roller bearings using vibration techniques," *Rail. Eng. Science*, vol. 29, pp. 42-58, 2021, doi: 10.1007/s40534-020-00230-x
- [5] *Railway applications - axlebox condition monitoring - interface and design requirements - Part 1: Track side equipment and rolling stock axlebox*, BS EN 15437-1:2009+A1:2022, 2023
- [6] O. Lunys, S. Dailydka, and G. Bureika, "Investigation on features and tendencies of axle-box heating," *Transport Problems*, vol. 10, no. 1, pp. 105-114, 2015, doi: 10.21307/tp-2015-011
- [7] N. Karagoz, H. İ. Acar, and B. Selcuk, "Pik döküm ve kompozit fren pabucu kullanılan yük vagonunda uzun süreli frenlenme sonucu tekerlekte açığa çıkan ısı dağılımının sayısal analiz metodu ile incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sayı.12, ss.64-72, Tem. 2020, doi:10.47072/demiryolu.746008
- [8] Federal Railroad Administration, Washington, DC, USA. *Effectiveness of wayside detector technologies on train operation safety*. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://railroads.dot.gov/elibrary/effectiveness-wayside-detector-technologies-train-operation-safety>
- [9] European Railway Agency, England. *Assessment of freight train derailment risk reduction measures: Part A Final Report*. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.era.europa.eu/system/files/2022/10/DNV%20study%20on%20freight%20train%20derailments.pdf>

- [10] C. Tarawneh, L. Sotelo, A. A. Villareal, N. D. L. Santos, R. Y. Lechtenberg, and R. Jones, "Temperature profiles of railroad tapered roller bearings with defective inner and outer rings, in *Proceedings of the 2018 Joint Rail Conference*, Columbia, USA, 2016
- [11] D. H. Shin, M. Kim, J. S. Kim, B. J. Lee, and J. Lee, "Precise infrared thermometry with considering background radiation for gas turbine air cooling application," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 158, 2020, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106534
- [12] Y. H. Li, X. G. Sun, and G. B. Yuan, "Accurate measuring temperature with infrared thermal imager," *Optics and Precision Engineering*, vol. 9, pp. 1336-1341, 2007
- [13] Y. Zhang, Z. Wang, X. Fu, F. Yan, and T. Kong, "An experimental method for improving temperature measurement accuracy of infrared thermal imager," *Infrared Physics & Technology*, vol. 102, 2019, doi: 10.1016/j.infrared.2019.103020
- [14] F. J. M. Meca, M. M. Quintas, F. J. R. Sanchez, and P. R. Sainz, "Infrared temperature measurement system using photoconductive PbSe sensors without radiation chopping," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 100, pp. 206-213, doi: 10.1016/S0924-4247(02)00069-9

Özgeçmiş



Kürşad GÖKCE

Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimini, İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimini ve Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimini tamamlamıştır. Endüstriyel otomasyon, demiryolu ve otomotiv sektöründe faaliyet gösteren çeşitli firmalarda elektrik elektronik sistem tasarımı alanında 20 yılı aşkın iş tecrübesi bulunmaktadır. Son 7 yıldır TÜBİTAK RUTE Robotik ve Akıllı Sistemler Bölümünde başuzman araştırmacı ve Proje Yürütücüsü olarak görev yapmaktadır.



E-Posta: kursad.gokce@tubitak.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Erken Cumhuriyet Dönemi Demiryolu İşlerinin Nafia Mecmuası Üzerinden İncelenmesi

Mine POLAT ALPAN^{*1}, Aysun AYDIN SANCAROĞLU²

¹ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Zonguldak, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Trabzon, Türkiye

*minepolat@beun.edu.tr

(Alınış/Received: 05.09.2023, Kabul/Accepted: 22.09.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Bu çalışmada, Erken Cumhuriyet Dönemi'nde yapılan tüm demiryolu çalışmaları 1934-1949 yılları arasında yayınlanan Nafia İşleri Mecmuası isimli dergi üzerinden incelenmiştir. Dönemin hükümeti tarafından aylık olarak çıkarılan dergide, demiryolu ile ilgili yapılan tüm işlerin detayları bildirilmekte ve halkın bu sayede ülkede yapılan işlerden ve bunların detaylarından haberdar olması sağlanmaktaydı. Bu çalışma, Cumhuriyet'in kurulmasının hemen ardından izlenen demiryolu politikasının detaylarını görmek, adımlarını izlemek, ülkede ne gibi faydaların sağlandığını tespit etmek ve bu politikanın hedefine ulaşması noktasındaki başarısını inceleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Nafia İşleri Mecmuasının incelemeleri kantitatif yöntemle yapılmış, dergi okumaları yapıp demiryolu ile ilgili başlıklar ayıklanmış, yıllık olarak içerikler belirlenmiş, tablolaştırılmış ve yorumlanmıştır. Çalışmada sonuç olarak, Nafia İşleri Mecmuası aracılığıyla, Erken Cumhuriyet Dönemi'nde yapılmış demiryolu işlerinin karar, uygulama ve işletme süreçlerindeki tüm detayları belirlenmiştir. Bu teknik detayların yanı sıra devletin benimsediği demiryolu politikası ve izlenen politikanın başarısı da gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Erken Cumhuriyet Dönemi, Ulaştırma, Nafia İşleri Dergisi, Bayındırlık İşleri, Demiryolu

An Examination of Early Republic Period Railway Projects Through the Nafia Journal

Abstract: In this study, all railway works carried out during the Early Republican Period have been examined through the journal "Nafia İşleri Mecmuası" published between 1934 and 1949. In the journal, which was published monthly by the government of the period, detailed information about all railway-related projects was reported, allowing the public to be informed about the works conducted in the country and their specifics. This study aims to investigate the details of the railway policy pursued immediately after the establishment of the Republic, trace its steps, determine the benefits achieved in the country, and assess the success of this policy in reaching its objectives. The examination of the Nafia İşleri Journal was conducted using a quantitative method, involving reading the journal, extracting headings related to railways, categorizing content annually, creating tables, and interpreting the data. As a result of the study, all the details of railway works conducted during the Early Republic Period in terms of decision-making, implementation, and operational processes have been identified through the Nafia İşleri Journal. In addition to these technical details, the railway policy adopted by the government and the success of the policy pursued have also been observed.

Keywords: Early Republican Period, Transportation, Nafia İşleri Journal, Public Works, Railway

1. Giriş

Türkiye Cumhuriyeti kurulduktan hemen sonra devletin en önem verdiği işlerden birisi, hatta en önemlisi ulaştırma ile ilgili olan işler olmuştur. Çünkü hükümet siyasal, ekonomik, kültürel ve ticari gelişim için ulaştırmanın önemini bilmektedir. Bu bilinçle, ulaştırma yatırımları dönemin ekonomik yetersizliğine rağmen ilk sıralara konulmuştur. Ülkenin en batısıyla en doğusunu birbirine bağlama fikri, başta Atatürk olmak üzere tüm yöneticiler tarafından önemsenmiş ve hiç

Atıf için/Cite as: M. Polat Alpan, A. Aydın Sancaroğlu, "Erken Cumhuriyet Dönemi demiryolu işlerinin Nafia Mecmuası üzerinden incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 27-55, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1355476

durmadan harekete geçilmiştir. Öncelik, merkeze uzak olan ve neredeyse merkezle hiçbir bağlantısı bulunmayan, doğunun batıyla bağlanması olmuştur.

Cumhuriyetin ilk yıllarındaki ulaşım politikalarının ağırlığı demiryolları üzerinden ilerlemiştir. Demiryolları politikasında esas olan konulardan biri İmparatorluktan kalan ve yabancıların elinde bulunan hatların satın alınması, bir diğeri ise ülkenin baştan sona demiryoluyla bağlanmasıdır. Bu amaçla önce yabancı sermayenin elinde olan hatlar satın alınarak devletleştirilmiş ve ülke menfaati için işletilmiştir. Sonrasında da ihtiyaçlar doğrultusunda yeni demiryolu hatları inşa edilerek bir ağ oluşturma sürecine girilmiştir [1]. 1950 yılına kadar demiryolları altın çağını yaşamış ve ülke baştanbaşa demir ağlarla örülmüştür. Demiryolu hatlarının çoğalmasında sonucunda, karayoluna da ihtiyaç duyulmaya başlanmış ve karayolu ile ilgili çalışmalara hız verilmiştir. II. Dünya Savaşı'nın bitiminden sonra da Türkiye'nin ulaşım politikalarında büyük bir değişim gerçekleşmiştir. Yapılan düzenlemeler, iktidarın ulaşım politikasında izlediği yoldaki değişimler ve savaşın hasarlarının azaltılması için verilen yardımlar karayollarının hızla gelişmesini sağlamış, gerek yapım gerekse işletim faaliyetlerinin zor olması nedeniyle demiryolları ve deniz ulaşımı adeta ihmal edilmiştir. İlk aşamada demiryollarının bağlantısını sağlamak üzere yapılması planlanan karayolları, 1950 sonrasında esas ulaşım sistemi olarak kabul edilmiştir [2].

Türkiye Cumhuriyetinin ulaşım politikasının demiryoluyla başladığı tüm kaynaklarda belirtildiği gibi, bu makale çalışmasında incelenen Nafia İşleri Mecmuasında da açıkça görülmektedir. Cumhuriyet Döneminde yapılmış olan demiryolu çalışmalarının dağılımlarının neler olduğu, bu işlerin devlete ve hükümete yansımaları ve planlanan politikaların işleyişiyle ilgili ayrıntıların bu dergi üzerinden incelenmesiyle dönemin ideolojisinin daha detaylı ve farklı bir açıdan inceleneceği düşünülmektedir. Genele bakılacak olursa ulaşım politikasında demiryolu ve karayolunun yeri bellidir. Fakat planlanan ulaşım politikalarının adımları nelerdi, nereden başlandı ve nasıl ilerlendi, nelere öncelik verildi, halk bunun neresindeydi gibi soruların cevaplarını ilgili dönemin hükümetine ait bir dergi üzerinden inceleme fikri, bu çalışmada çıkış noktası olmuştur. Nafia İşleri Mecmuası, Erken Cumhuriyet Dönemine ait tüm bayındırlık işlerinin toplandığı ve dönemin hükümeti tarafından çıkarılan bir dergi olması açısından, incelenmek istenilen konularla ilgili en doğru kaynak olarak düşünülmüştür.

2. Erken Cumhuriyet Dönemi Demiryolu Politikasına Genel Bir Bakış

Osmanlı döneminde yapılan demiryollarının bir kısmı sınırlarımız dışında bir kısmı da sınırlarımız içinde kalmıştır. Mısır, Suriye, Filistin, İsrail, Ürdün, Suudi Arabistan, Romanya ve Bulgaristan'da kalan demiryolları yabancı şirket hatları ve devlet hatları olarak iki grup halinde ele alınmıştır. Osmanlı'dan Cumhuriyete kalan demiryolu uzunluğu 4112 km'dir. Bu demiryollarının 3756 km'si imtiyazlı yabancı şirketler tarafından inşa edilmiş olup aynı zamanda bu şirketler tarafından işletilmiştir. Yabancı şirketler tarafından inşa edilen demiryolları bir ağaç görüntüsünde koloni tipi demiryolları olup, ülkenin menfaatinden çok şirketlerin çıkarları doğrultusunda inşa edilmiştir. Bu demiryolları, limanlar ile iç bölgelerin bağlantısını sağlamaktadır. Ruslardan kalan 356 km'lik Erzurum-Sarıkamış sınır demiryolu dışında Ankara'nın doğusunda yapılmış bir demiryolu bulunmamaktadır. Demiryolları üzerinde hareket eden 118 buharlı lokomotif ile 2186 vagon bulunmaktadır [3].

Ülkeyi demir ağlarla örmeyi amaçlayan demiryolu politikası, ulusal pazar yaratma sürecinin de önemli bir parçası olmuştur [4]. Savaş sırasında tahrip edilen hatların onarılması ve düşük kapasiteyle de olsa demiryollarının işletilmesi ile başlayan çabalar, ülkenin önemli yerleşim üretim-tüketim merkezlerini birbirine bağlayan bir ağın oluşturulması doğrultusunda kararlılıkla sürdürülmüştür [5].

Türkiye, çok partili hayata 1930 yılında Serbest Cumhuriyet Fırkasının kurulması ile geçmiştir. Fırka idarecileri, demiryolu yapımının önemli olduğunu düşünmelerine rağmen bütçenin büyük

kısımının demiryolu yapımına aktarılmaması gerektiğini, ihalelerin yabancı şirketlere verilmesini ve mali yükün yayılmasının gerekliliğini savunmuşlardır. Bu düşünceler Serbest Cumhuriyet Fırkası ile Cumhuriyet Halk Fırkası arasında ciddi tartışmalar yaratmıştır fakat Serbest Cumhuriyet Fırkasının kısa sürede kapanması ile bu tartışmalar sona ermiştir. Cumhuriyet yöneticileri oldukça zor koşullarda demiryolu politikasını başarı ile yürütmüşlerdir. Demiryollarında ülkenin ve halkın yararına olacak tarifeler planlanmış ve uygulanmış hatta kar elde edilerek bu para da yeni hatların yapımında kullanılmıştır. Daha da önemlisi yeni kurulan bir devletin bu zorluklar içerisinde yeni bir demiryolu işletmeciliğini kurup başarılı olabileceğini düşünmeyen ülkeler, demiryolu politikasının ülkede nasıl bir başarı yakaladığını görmüşlerdir [4].

1923 yılında yayımlanan bir yasa ile hatların artık devlet tarafından inşa edilmesi ve işletmesi konusunda karara varılır. İlk ihale 1927’de, ikinci ihale ise 1933’te gerçekleştirilir. İlk ihalede yapımcı yabancı, taşeron ise Türk’tür. İkinci ihalede ise ilk kez bir Türk firması yapıcılığı üstlenir. Böylelikle demiryollarının inşa ve işletmesi “Devlet Demiryolları ve Limanları İdaresi Umumiyesi” adlı kuruluşa devredilerek, Devlet Demiryolları dönemi başlatılır. Bütün olanaksızlıklara karşın demiryolu yapımı İkinci Dünya Savaşına kadar büyük bir hızla sürdürülür, savaş nedeniyle 1940’tan sonra çalışmalar yavaşlar. 1923-1950 yılları arasında yapılan 3578 kilometrelik demiryolunun 3208 kilometresi 1940 yılına kadar tamamlanır. Bu dönemde ayrıca yabancı şirketlerin elindeki demiryolu hatları satın alınarak devletleştirilir. Cumhuriyet öncesinde demiryollarının %70’i Ankara-Konya doğrultusunun batısında kalırken, Cumhuriyet döneminde yolların %78,6’sı doğuya kaydırılır ve günümüzdeki batı ve doğu arasındaki (%46 batı, %54 doğu) oransal dağılım elde edilir. Ana hatları birbirine bağlayan ve demiryolunun ülke düzeyine yayılmasını sağlayan hatların yapımına ağırlık verilir ve 1935-1945 yılları arasında ise hatların birleştirilmesine çalışılır [5].

O dönem uygulanan strateji ile ülkenin uzak köşelerini birbirine bağlayan bir demiryolu şebekesi inşa edilmiştir. Fakat bu hatları destekleyen bir karayolu hattının da gerekliliği gün geçtikçe ortaya çıkmıştır. Mevcut karayolları bakımsız ve yetersizdir. Üstelik tüm politikanın demiryolları üzerinden ilerlemesi sonucunda karayolları ile ilgili oldukça az ilerleme kaydedilmiştir. Demiryolu hatları da kendilerini tamamlayan bir karayolu olmadığı için işletilme aşamasında etkinliği azalmaya başlamış, planlanan ekonomik katkıyı da sağlayamamıştır. Devletin yetersiz kaynakları iyice eridiğinden tam bu noktada yol vergisi gerekliliği ortaya çıkmıştır [6].

Nafia Vekili Ali Bey 10 Ağustos 1934’te gerçekleşen Elazığ demiryolu hattının açılış töreninde yapılan demiryolu işlerinden ve hızla devam ettiğinden bahsetmiştir. Tüm şehirlere demiryolu hatlarının döşenmekte olduğunu ve hatta yakın zamanda yurtdışına da erişimi sağlayacak hatları yapmayı planladıklarını vurgulamıştır. Yapmış oldukları çalışmaların büyüklüğünü anlatmak için ise geçmişte yapılmış olan ve şimdi yapılan işleri kıyaslamanın yeterli olacağını söylemiştir. Osmanlı İmparatorluğu’nda ilk demiryolu hattının yapımı Kırım Savaşı’ndan sonraki döneme denk gelmektedir. Aydın demiryolunun kuruluş tarihi de bu tarihlere kadar uzanmaktadır. Daha sonra İzmir-Kasaba hatları, Bursa-Mudanya, İstanbul-İzmit demiryolu inşası ve Anadolu hatları gelmektedir.

3. Amaç ve Yöntem

Bu çalışmada, Erken Cumhuriyet Dönemi’ne ait genel olarak bilinen demiryolu politikasının, aslında ne gibi amaçlar barındırdığı ve işleyişin nasıl olduğu ile ilgili daha detaylı bilgi edinmek üzere yola çıkılmıştır. Devletin demiryolu politikasına ne için öncelik verdiği ve içinde bulunduğu zorluğa rağmen seçtiği politikanın ne gibi faydalar sağladığı merak edilen bir konudur. Yapılan yatırımların ne ölçüde doğru olduğu ve hangi bölgelere öncelik verildiği de yine incelenmesi gereken konulardandır. Halkın yapılan işlerin neresinde olduğu ve düşünceleri, yurt dışı ile bu dönemde nasıl bir bağlantı kurulduğu, Osmanlı İmparatorluğu döneminde yapılan işler ve son

durumları gibi konular da yine dönemle ilgili ortaya konulması gereken ayrıntılardır. İşte bu sorulara yanıt bulmak amacıyla Nafia İşleri Mecmuası kantitatif yöntemle incelenmiştir. Dergi hükümet tarafından tamamen bayındırlık işlerini duyurmak amacıyla çıkarıldığı için, çalışmada yanıtlanması beklenen soruların tüm cevaplarına dergi aracılığıyla yapılan okumalar sonucunda ulaşılmıştır. Dolayısıyla dönemin dinamiklerinin tüm şeffaflığıyla anlaşılabilmesi açısından derginin doğru bir kaynak olduğu düşünülmektedir.

Nafia İşleri Mecmuasının tüm sayıları Ankara Milli Kütüphane Süreli Yayınlar biriminden temin edilmiştir. Dergilerin arşiv niteliği taşımasından ötürü, 1934 Haziran tarihli ilk sayısından 1949 Aralık tarihli son sayısına kadar toplam 122 adet dergi, taratılma ya da fotokopi yoluyla çoğaltılmıştır. Derginin yayınlanma adı ve sayıları yıllara göre değişiklik göstermektedir. Dergilerin yayınlanma tarihleri, yılları, adları ve yılda kaç adet yayınlandıkları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Dergilere ait bilgiler

| Yıl | Tarih | Derginin Adı | Adet |
|-----|---------------------------------|--|------|
| 1 | 1934 Haziran - 1935 Mayıs arası | Nafia İşleri Mecmuası | 12 |
| 2 | 1935 Haziran - 1936 Mayıs arası | Nafia İşleri Mecmuası/Bayındırlık İşleri Dergisi | 12 |
| 3 | 1936 Haziran - 1937 Mayıs arası | Bayındırlık İşleri Dergisi | 12 |
| 4 | 1937 Haziran - 1938 Mayıs arası | Bayındırlık İşleri Dergisi | 12 |
| 5 | 1938 Haziran - 1939 Mayıs arası | Bayındırlık İşleri Dergisi | 12 |
| 6 | 1939 Haziran - 1940 Mayıs arası | Bayındırlık İşleri Dergisi | 12 |
| 7 | 1940 Haziran - 1941 Mayıs arası | Bayındırlık İşleri Dergisi | 12 |
| 8 | 1941 Haziran - 1942 Mayıs arası | Bayındırlık İşleri Dergisi | 12 |
| 9 | 1942 Haziran - 1943 Mayıs arası | Bayındırlık İşleri Dergisi | 6 |
| 10 | 1943 Haziran - 1944 Mayıs arası | Bayındırlık İşleri Dergisi | 6 |
| 11 | 1944 Haziran - 1945 Mayıs arası | Nafia Dergisi/Bayındırlık Dergisi | 4 |
| 12 | 1946 Mart - 1946 Aralık arası | Bayındırlık Dergisi | 4 |
| 13 | 1947 Mart - 1947 Aralık arası | Bayındırlık Dergisi | 4 |
| 14 | 1948 Aralık | Bayındırlık Dergisi | 1 |
| 15 | 1949 Aralık | Bayındırlık Dergisi | 1 |

Tablo 1’de görüldüğü gibi, ilk yılda 1934 Haziran ve 1935 Mayıs tarihleri arasında yayınlanan derginin her ay bir sayı olmak üzere toplam 12 sayısı bulunmaktadır. Dergi ilk 8 yıl boyunca aynı şekilde yayınlanmıştır. 9 ve 10. yılda 6’şar adet, 11, 12 ve 13. yıllarda ise her üç ayda bir sayı olmak üzere yılda 4 adet yayınlanmıştır. 14 ve 15. yılda ise dergi 1 sayı olarak yayınlanmıştır. Dergi, 1. yıl ve 2. yılın ilk 6 sayısı Nafia İşleri Mecmuası adıyla yayınlanmıştır. Daha sonra 11. yıla kadar olan sayılar Bayındırlık İşleri Dergisi adıyla yayınlanmıştır. 11. yıldaki ilk 2 sayı Nafia Dergisi adıyla, son 2 sayı ise Bayındırlık Dergisi adıyla yayınlanmıştır. Yayın hayatının sonuna kadar da Bayındırlık Dergisi adıyla yayınlanmaya devam etmiştir.

Çalışma kapsamında tüm sayıları elde edilen derginin içerikler kısmında “demiryolu” anahtar kelimesi ile tarama yapılmış ve ilgili başlıklar belirlenmiştir. Belirlenen başlıklar, ilk olarak aylık daha sonra da yıllık olarak gruplandırılmış ve tablolaştırılmıştır. 1934-1949 tarihleri arasında yapılmış olan demiryolu işleri, dergi aracılığıyla yıllık olarak incelenmiştir. Böylelikle hem yıl bazında yapılan çalışmaların yoğunluğunu tek bir tablodan okuma kolaylığı sağlanmış hem de yıllar arasındaki demiryolu işlerindeki ilerlemeleri görmek adına daha nitelikli bir çalışma yapılmıştır.

4. Bulgular

Osmanlı İmparatorluğu’nun 1848 tarihinde kurduğu Nafia Nezareti tarafından gerçekleştirilmiş olan tüm işler tam 75 yıl sonra 1923 tarihinde, Türkiye Cumhuriyeti Nafia Vekâletine geçmiştir.

Nafia Vekâleti de başta demiryolu, karayolu, köprü gibi bayındırlık işlerini kendi imkânları ile ve hatta kendi mühendislerimizle gerçekleştirme arzusuyla işe koyulmuştur. Türkiye Büyük Millet Meclisi'nce 26.05.1934 tarih ve 2443 numara ile kabul edilen Nafia Teşkilat Kanununa göre tercüme, yayın, istatistik ve müze müdürlükleri kurulmuştur. Yayın müdürlüğü her ay idari ve her üç ayda bir fenni olarak iki dergi yayımlayacaktır. Nafia İşleri Mecmuasının yayınlanan ilk sayısında aylık idari derginin çıkış amaçlarından şu şekilde bahsedilmiştir;

- Bayındırlık işleriyle ilgilenen herkesin bilmek ve öğrenmek istedikleri kanunları, kararları, tüzükleri, talimatları ve genelgeleri onlara aynen aktarabilmek.
- Nafia Vekâletini ilgilendiren tüm işlerin, ayrı ayrı tüm uzmanlık şubelerine ait raporlarının ve yapılmış olan iş faaliyetlerinin gösterilmesi.
- Makalelerde olabildiğince ağır konu ve anlatımlardan kaçınarak kısa ve herkesin kolay anlayabileceği konulardan bahsetmek ve imkânlar dâhilinde çeşitli bölgelerdeki özellikleri araştırmak ve ortaya koymaya çalışmak.
- Dünyada meydana gelen bayındırlık gelişmelerini takip etmek, yapılan önemli yapılar hakkında bilgi vermek.

Fenni derginin çıkış amacından ise şu şekilde bahsedilmiştir;

- Nafia Vekâletine bağlı bulunan bütün şubelerini ilgilendiren, faydalı olabileceği düşünülen konular üzerine ilmi ve fenni makaleler yazmak. Her şubenin makalesine yer verebilmek için makalelerin çok uzun olmamasına dikkat etmektir [7].

Nafia İşleri Mecmuasının ilk sayısı 1934 Haziran ayında Türkiye Cumhuriyeti Nafia Vekâleti Neşriyat Müdürlüğü tarafından çıkarılmıştır. Dergi 15 yıl boyunca yayın hayatına devam etmiştir ve son sayısı 1949 Aralık ayında yayınlanmıştır.

4.1. Nafia İşleri Mecmuası 1. yıl (1934 Haziran-1935 Mayıs)

Derginin 1934 Haziran ve 1935 Mayıs tarihleri arasında yayınlanan 12 sayısına ait içerikleri Tablo 2'de sunulmuştur. Tabloların altına ise ilgili kısımlara ait yorumlamalar yapılmıştır.

Tablo 2. Nafia İşleri Mecmuası 1. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|---------------------|--|
| 1934 Haziran [7] | 1) Fevzipaşa- Diyarbakir Hattı İnşaatının İkmali Hakkında Kanun No.2405 12. 4. 934 (sf.11) |
| | 2) Devlet Demiryolları Ve Limanları İşletme Umumi İdaresi Memurları Tekaüt Sandığı Kanunu No.2454 28.5.934 (sf.33) |
| | 3) Sivas – Erzurum Hattını İnşa İçin Dâhili İstikraz Aktine Dair Kanun No. 2463 28.5.934 (sf.35) |
| | 4) İzmir-Kasaba Ve Temdidi Demiryollarının Satın Alınmasına Dair Olan Mukavelenamenin Tasdiki Hakkında Kanun No. 2487 31. 5. 934 (sf.37) |
| | 5) Satın Alınan İzmir-Kasaba Ve Temdidi Hattının Tesellümü Ve Tasfiyesi Ve İşletmesi Muamelatına Dair Kanun No. 2488 31. 5. 934 (sf.49) |
| | 6) Demiryolları İnşaat Haberleri (sf.75) |
| | 7) Devlet Demiryollarında Tarifelerde Tenzilat (sf.75) |
| | 8) İzmir – Kasaba Ve Temdidi Hattı (sf.76) |

| | |
|---------------------------------|--|
| 1934 Temmuz [8] | <ol style="list-style-type: none"> 1) Yunan Parlamento Azasının Türkiye Devlet Demiryolları Üzerinde Meccanen Seyahatleri Hakkında Kanun (sf.59) 2) Ve 2214 Numaralı Kanunlar Mucibince İnşası Mukarrer Afyon – Antalya Ve Filyos-Ereğli Hatları İçin 1934 Mali Senesi Muvazenei Umumiye Kanununun 18 İnci Maddesine Bir Fıkra İlavesine Dair Kanun (sf.61) 3) Demiryolları - Otomobil Rekabeti (sf.74) 4) Nafia Vekili Beyefendinin Teftiş Seyahatleri Şark Vilayetlerimizin Mühimlerinden Biri Olan Elaziz De Demiryolu Şebekemize Bağlandı (sf.83) 5) 1 Temmuz 934 Tarihine Kadar Demiryolları İnşaat Faaliyeti (sf.83) 6) Ray Otobüsleri (sf.85) |
| 1934 Ağustos [9] | <ol style="list-style-type: none"> 1) Elaziz Şube Hattının Açılma Resmi (sf. 13) 2) Afyon-Antalya Demiryolunun Temel Atma Merasimi (sf. 19) 3) Yeni Demiryollarımıza Dair (7 Fotoğraf) (sf. 35) 4) Demiryolları – Otomobil Rekabeti (sf. 41) |
| 1934 Eylül [10] | <ul style="list-style-type: none"> • Konu İle İlgili İçerik Yoktur. |
| 1934 Ekim (İlk teşrin) [11] | <ol style="list-style-type: none"> 1) On Birinci Cumhuriyet Senesinde Demiryolu İnşaat Faaliyetleri (sf. 7) |
| 1934 Kasım (İkinci teşrin) [12] | <ol style="list-style-type: none"> 1) Sivas-Erzurum Demiryolunda Kızıl-Irmak Köprüsü (sf.27) 2) Afyon-Karakuyu Hattı Güzergâhı (sf. 43) |
| 1934 Aralık (İlk kanun) [13] | <ol style="list-style-type: none"> 1) Birinci Teşrin Nihayetinde Demiryolu İnşaatı Vaziyeti (sf. 64) |
| 1935 Ocak (İkinci kanun) [14] | <ol style="list-style-type: none"> 1) Sivas-Erzurum Hattını İnşa İçin Dâhili İstikraz Akdine Dair 28.5.934 Tarihli Ve 2463 Numaralı Kanunun Birinci Maddesine Bir Fıkra İlavesi Hakkında Kanun (sf. 7) 2) Demiryolları İle Beynelmilel Eşya Ve Yolcu Nakliyatına Dair Olan C.I.M, C.I.V. Mukavelelerinin 23 Teşrinisani 1933 De Roma’da Kabul Olunan Yeni Metinlerinin Tasdiki Hakkında Kanun (sf. 9) 3) İkinci Kanun 935 Tarihinde Demiryolu İnşaat Vaziyeti (sf. 89) |
| 1935 Şubat [15] | <ul style="list-style-type: none"> • Konu İle İlgili İçerik Yoktur. |
| 1935 Mart [16] | <ul style="list-style-type: none"> • Konu İle İlgili İçerik Yoktur |
| 1935 Nisan [17] | <ol style="list-style-type: none"> 1) Demiryollarında Ağaç Travers (sf. 43) |
| 1935 Mayıs [18] | <ol style="list-style-type: none"> 1) Aydın Demiryolu Da Satın Alındı (sf.51) 2) Türkiye Cumhuriyetinin Yaptırdığı Yeni Hatlardan Sivas – Erzurum Hattı (sf. 79) |

Tablo 2’de sunulan derginin ilk sayısı olan 1934 Haziran sayısında Fevzipaşa Diyarbakır hattı inşaatı hakkında çıkarılan kanunun detaylarından bahsedilmiştir. Devam eden hatlara ait harcamalar ve inşaatlarının tamamlanması için ayrılan bütçe belirtilmiştir. Devlet Demiryolları ve limanları memurlarını ilgilendiren Tekait Sandığı Kanunuyla ilgili içerikte, sandığın Nafia Vekili idaresinde olduğundan, Devlet Demiryolları İşletme Müdürlüğü amirlerinden oluşan bir meclis tarafından yönetileceğinden, kanundan yararlanılma şekillerinden ve sandığın gelirinin nasıl elde edilebileceğinden detaylıca bahsedilmiştir. Sivas-Erzurum hattı borçlanma sözleşmesi kanununda ise devam etmekte olan hattın inşası için alınacak borç miktarı ve kullanılacak bütçe ile ilgili detaylar belirtilmiştir. İlgili kurum olarak Maliye Vekâleti ile Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası belirtilmiştir. İzmir-Kasaba ve Temdidi demiryollarının satın alınmasına karar verildikten sonra bir kanun çıkarılmış ve içerikte bu konuyla ilgili belirtilen kanunda, satın alınan demiryolu hattının sözleşmesinin onaylandığından bahsedilmektedir. Satın alındıktan sonra da çıkarılan yeni bir kanunla Fransa’dan satın alınan demiryolunun satın alma şartları, karşılıklı anlaşmalar ve paranın temin şekli belirlenmiştir. Bununla birlikte, Fevzipaşa-Diyarbakır hattı, Afyon-Antalya hattı ve Sivas-Erzurum hattındaki inşaat faaliyetleriyle ilgili bilgi verilmiştir. Yeni kullanılmaya başlanan ve halkın çok da alışık olmaması sebebiyle demiryoluna teşvik için seferlerde indirim yapıldığından bahsedilmiştir. Satın alınan demiryollarının resmen Devlet Demiryollarına devredildiği de ilan edilmiştir.

Temmuz 1934 sayılı dergideki içeriklerde Yunan milletvekili ve senatörlerin ülkemizdeki demiryollarını belirtilen şekilde ücretsiz olarak kullanabileceklerinden bahsedilmiştir. Bir diğer kanunda, Afyon-Antalya ve Filyos-Ereğli hatları için bütçe hesaplarıyla ilgili yeni bir madde eklenmiştir. Demiryolları ve otomobilin kullanım alanlarının ayrılması ve bu durumda kazanılacak faydalar ile ayırımın ne şekilde yapılabileceği ile ilgili şartlar belirtilmiştir. Doğudaki birçok alanda önemli olan Elazığ şehrine demiryolu hattının ulaştığı ve ülkenin demiryolu şebekesine bağlandığı, hattın inşaat masrafının da 500.000 olduğu belirtilmiştir. 1 Temmuz 1934 tarihine kadar 669 km. demiryolu hattı ve ray inşa edildiği, 374 km. hattın da inşaatına devam edildiği belirtilmiştir. Ayrıca az yolculu hatlarda kullanılmak üzere ray otobüslerinin de satın alınmış olduğu söylenmiştir.

Ağustos 1934 sayılı dergiye ait içerikte Elazığ'daki demiryolu hattının tamamlandığı ve kullanıma açıldığı belirtilmiştir. Afyon-Antalya hattının inşa çalışmalarına başlandığı bildirilmiş, temel atma töreni ile ilgili bilgiler verilmiş ve Nafia Vekâletinin yöneticisinin konuşmasından bahsedilmiştir. Yeni yapılan demiryolu hatları ile ilgili bilgilerin verilmesinin yanı sıra yapılmış olan işler de belirtilmiştir. 10 yıl gibi bir sürede yaklaşık 2000 km. demiryolu hattının yapıldığı ve yapılmaya devam edildiği bunun yanı sıra 161 tünel ile köprülerin yapıldığı, toplam bütçenin de yaklaşık 245 milyon olduğu bildirilmiştir. Son zamanlarda konuşulmaya başlanan dikkat çekici bir konu olan demiryolu ile otomobil rekabetinden bahsedilmiştir, demiryolu ve otomobil kullanımını arasındaki farklar, bu rekabeti arttıracak koşullardan bahsedilmiştir.

Ekim 1934 sayılı dergi Cumhuriyetin 11. yılına denk geldiği için genel olarak bu tarihe kadar yapılmış işlerin genel bir derlemesi bildirilmiştir. Kasım 1934 sayılı dergide Sivas-Erzurum demiryolunun 3 ve 4. km. arasında bulunan ve demiryolunu Kızılırmak'tan geçiren köprüünün Kızılırmak köprüsü olduğundan ve köprüünün inşa çalışmalarından ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Afyon-Karakuyu hattı, Afyon ve Anadolu Bağdat hatlarını Aydın hattına bağlamış olduğu için ülkenin demiryolu şebekesi açısından önemli bir yeri vardır. Hattın inşa çalışmalarıyla ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir. Aralık 1934 sayılı dergide "Birinci Teşrin nihayetinde Demiryolu inşaatı vaziyeti" başlığında, ekim ayı itibarıyla demiryollarının son durumundan bahsedilmiştir. Sivas-Erzurum ve Malatya, Diyarbakır-Filyos ve Afyon-Karakuyu hatlarının detayları bildirilmiştir.

Ocak 1935 sayılı dergide Sivas-Erzurum hattını inşa için dâhili istikraz akdine dair kanunun birinci maddesine bir fıkra ilavesi hakkındaki kanunda daha önce kabul edilmiş olan kanuna bütçeyle alakalı yapılmış olan ek madde belirtilmiştir. Demiryolları ile uluslararası eşya ve yolcu nakliyatına dair olan 1933 de Roma'da kabul olunan yeni metinlerinin tasdiki hakkında kanunda daha önce kabul olunan kanunun tasdikiyle ilgili bilgi verilmiştir. Ayrıca Diyarbakır Filyos hattı ve Afyon-Karakuyu hattıyla ilgili bilgiler verilmektedir. Nisan 1935 sayılı dergideki içerikte demiryolları traverslerinin malzemesinin ağaç olmasının yararlarından bahsedilmiş ve malzemesi demir olan traversler ağaç olanlar ile karşılaştırılmıştır.

Mayıs 1935 sayılı dergideki içerikte, ülkenin demiryolu politikasında hükümetin en önde tuttuğu işlerden birisi olan yabancı şirketlerdeki hatların satın alınması konusunda atılan önemli adımlardan biri olarak Aydın demiryolu hattının satın alındığı bildirilmiştir. Ancak üzerinde durulan başka bir konu da bu stratejideki amaçtır ki bu konuda da tüm demiryolu hatlarının tek elde yani devlet elinde olmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Yani demiryolunun dönemin en önemli konularından biri olduğu ve yöneticilerin de bu gücü ellerinde tutmak istedikleri açıkça görülmektedir. Bu amaçla, yöneticiler yapılması gereken her şeyi yapmakta ve konunun önemini her fırsatta dile getirmektedirler. Bunun yanı sıra yeni yapılmaya başlanan ve yine önemli hatlardan birisi olduğu düşünülen Sivas-Erzurum hattından "Türkiye Cumhuriyetinin yaptırdığı yeni hatlardan Sivas-Erzurum hattı" şeklinde bir başlıkla bahsedilmiştir. Hattın yapımında karşılaşılan zorluklar ile ilgili bilgi verilmiştir fakat bunun yanı sıra başlıkta oldukça dikkat çekicidir. Her fırsatta hükümetin demiryolu ile ilgili yaptığı çalışmalardan açıkça bahsetmekten kaçınılması, tam da amaçlanan şekliyle dergiye konu olmaktadır. Bu gerek içeriklerde gerekse

başlıklarda açıkça görülmektedir. 1934 Eylül, 1935 Şubat ve 1935 Mart sayılı dergilerde demiryolu ile ilgili herhangi bir içerik bulunamamıştır.

4.2. Nafia İşleri Mecmuası 2. yıl (1935 Haziran-1936 Mayıs)

Derginin 2. yılına ait ilk sayısı 1935 Haziran tarihli dergidir. Yine her ay bir adet olmak üzere toplam 12 adet dergi yayınlanmıştır ve dergi içerikleri Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. Nafia İşleri Mecmuası 2. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|-------------------|---|
| 1935 Haziran [19] | 1) Aydın demiryolu satın alma mukavelesi hakkında bayındırlık bakanı Ali Çetinkaya’nın kamutaydaki söylevleri (sf.13) 2) İzmir-aydın demiryolu anlaşma projesi (sf.19) 3) Devlet demiryolları ve limanları işletme umum müdürlüğü 1934 mali yılı bütçesinde değişiklik yapılmasına dair kanun (sf. 25) 4) Devlet demiryolları ve limanları umum işletme müdürlüğünün 1935 mali yılı bütçe kanunu (sf.26) 5)Aydın demiryollarının satın alınmasına dair mukavelenin tasdiki hakkında kanun (sf.62) |
| 1935 Temmuz [20] | 1) Aydın demiryolları nasıl satın alındı (sf. 32) 2) Aydın demiryolunun hükümete geçmesi (sf.72) 3) Afyon-Antalya hattı (sf. 77) 4) Sivas-erzurum hattı (sf. 81) |
| 1935 Ağustos [21] | 1) Demiryollarımızın memlekette uyandırdığı ticari hareketlerden: samsun (sf.36) |
| 1935 Eylül [22] | 1) Musul Petroları ve Bağdad Demiryolu (sf.13) |
| 1935 Ekim [23] | 1) 1935 Senesi demiryolu inşaat işleri (sf. 16) 2) Türkiye cumhuriyeti devlet demiryollarının genel durumu 1934-1935 (sf. 131) |
| 1935 Kasım [24] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1935 Aralık [25] | 1) Devlet Demiryolları ve Limanları İşletme Umun Müdürlüğü memur ve müstahdemlerinin ücretlerine dair kanun (sf. 5) 2) Satın alınan Aydın ve şubatı demiryollarının tesellüm ve tasfiyesine ve işletme muamelatına dair kanun (sf. 18) 3) İlk tren Diyarbekire giderken (sf. 42) |
| 1936 Ocak [26] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1936 Şubat [27] | 1) Devlet Demiryolları ve Limanları İşletme Umumi İdaresi memurları tekaüt sandığı hakkındaki 2454 sayılı kanuna ek kanun (sf. 6) 2) Aydın Demiryolunda ray otobüsleri (sf. 61) |
| 1936 Mart [28] | 1) Afyon-Antalya Hattı Bozanönü-Isparta yolu (sf.84) 2) Demiryolu raylarının uzunlukları ve bunların kaynakla birleştirilmesi (sf.116) |
| 1936 Nisan [29] | 1) Devlet Demiryolları ve Limanları İşletme Umun Müdürlüğünün 1935 mali yılı bütçesinde münakale yapılması hakkında kanun (sf.7) 2) Yeni demiryollarımız işletmeye açılırken (sf.53) |
| 1936 Mayıs [30] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |

Tablo 3’de görüldüğü gibi 1935 Haziran sayısındaki içerikte Bayındırlık Bakanı Ali Çetinkaya’nın parlamentoda Aydın demiryoluyla ilgili açıklamalarda bulunduğu bahsedilmektedir. Satın alınan demiryolu ile ilgili daha önceki sayılarda açıklamalar bulunmaktadır fakat bu sayıda Çetinkaya hat ile ilgili daha detaylı açıklamalarda bulunmuştur. Hattın Osmanlı devleti döneminde İngiliz bir şirkette olduğu, sonrasında ücretinin ödenerek satın alındığı belirtmiştir. Mevcut durumda Osmanlı devletinden kalan borçlar bulunduğunu, bu borçların hükümet tarafından ödenmekte olduğunu bildirmiştir. Ödenen ve ödenecek borç miktarı hesaplandığında ortaya çıkan yüksek miktartlı harcamanın sonucunda, ülkede kullanılacak ya da halkın yararlanabileceği yatırımların yapılmış olmasını beklediklerini fakat köprü, yol vb. gibi herhangi bir yapının olmadığı belirtilmiştir. İzmir-Aydın hattının İngilizlerden alınması ile ilgili yapılan anlaşma ve içeriklerinden bahsedilmiştir. Devlet demiryolları ve limanlarına ait mali

işlerle ilgili 1934 yılı kanununda bütçede yapılmış olan değişikliklerden bahsedilmiştir. Aynı şekilde 1935 yılına ait düzenlemeler de belirtilmiş ve açıklanmıştır. Aydın demiryollarının satın alınmasındaki anlaşma şartları da açıklanmıştır.

1935 Temmuz sayısı incelendiğinde Aydın demiryollarının nasıl satın alındığı ve devlete geçtiğine yönelik açıklamalar devam etmektedir. Şu açıklama dikkat çekmektedir. “Türk milletinin her sahadaki varlığını, bütünlüğünü gerçekleştirmeyi en büyük bir ülkü sayan Cumhurluk Türkiyesi ekonomik alanda en büyük adımı memleketi demir ağlarla örmek ve bu ağların yabancılar elinde bulunan parçalarını millete mal etmek yolunda atmıştır.” Yine bu cümleyle de demiryolu politikasına verilen önem tekrar tekrar dile getirilmiştir. Hedeflenen yabancılardaki hatların alınması konusunda da, Anadolu'nun döşenen ilk hattı olan Aydın demiryolunun satın alınmasından bahsedilmiştir. Hattı satın almak için yapılan bazı anlaşmalar sonucunda atılan doğru adımlarla hattın 1 Temmuz 1935 tarihinde Türkiye hükümetine geçmiş olduğu belirtilmiştir. Bu içerikte de hattın satın alınmasıyla birlikte gelen tebrikler ve kutlama mesajlarına yer verilmiştir. Bunlara ek olarak da devam etmekte olan Afyon-Antalya hattıyla ilgili bilgiler gelişmeler bildirilmiş ve Sivas-Erzurum hattı üzerinde yapımı devam eden köprülerle ilgili bilgiler verilmiştir.

1935 Ağustos sayılı dergideki içerikte demiryollarının yapımıyla sağlanan faydalara değinilmiştir. Bunlardan en önemlilerinin de ticarete olan hareketlenmeler olduğu belirtilmiştir. Samsun ilinin ekonomik, tarımsal ve coğrafi özelliklerinden bahsedilerek ne kadar önemli olduğundan ve demiryolu hattının sağlandığı takdirde şehrin ticarete dâhil olacağından, şehrin konum açısından taşıdığı önemden dolayıyla şehre bağlantının kesinlikle sağlanması gerektiğinden ve şuan yaklaşmakta olan demiryolu hatlarından bahsedilmiştir. Dergide yapılan işlerin yanı sıra yapılması düşünülen işler de aynı coşkuyla bildirilmekte ve halkın bu işler ile ilgili hem nabzını tutmak hem de bir ön hazırlık yapılması sağlanmaktadır.

1935 Eylül içeriği verilen sayıda, Almanlar tarafından yapımına başlanıp yarım bırakılan Bağdat Demiryolunun tamamlanması ile ilgili düşüncelerin gündeme geldiği bildirilmektedir. B.O.D. şirketi, Musul tarafında bulunan petrolün aktarımını borularla yapamadığı için demiryolu inşa etmek ve petrolü bu yolla aktarmak düşüncesindedir. Hükümetin de Bağdat demiryolunu tamamlamak istemesinin altında yatan ana sebebin bu olduğu düşünülmektedir. İçerikte hat tamamlandığı takdirde, bir kısmı ülke topraklarından geçeceği bildirilerek bunun bir şans olacağı belirtilmiştir. Bunun yanında şirketin ülkede bir rafineri inşa etme isteğinde olduğu, bu durumun da ileriye yönelik düşünüldüğünde karayolunda kullanılacak asfaltı daha uygun fiyatla temin etmek açısından büyük bir avantaj sağlayacağından bahsedilmiştir.

Ekim 1935 sayılı dergi Cumhuriyetin 12. yılına denk geldiği için genel olarak bu tarihe kadar yapılmış işlerin genel bir derlemesi bildirilmiştir. 1935 Kasım ayına ait sayıdan sonra derginin yeni ismi Bayındırlık İşleri Dergisi olmuştur. Dergi içindeki yazılarda da artık dilbilgisine daha fazla dikkat edilmeye başlanmış ve yeni kelimeler de kullanılmıştır.

1935 Aralık sayısındaki içerikte Aydın demiryolları ile ilgili kanunda, kurumda çalışan personellerin maaşlarıyla ilgili açıklamalar yapılmış ve yapılacak zamdan bahsedilmiştir. Zammın yapılacağı tarih olaraksa Cumhuriyet Bayramı seçilmiştir. Bu da yine oldukça dikkat çekici bir tarih olarak göze çarpmaktadır. Yapımı tamamlanan Diyarbakır hattının açılış töreninin ayrıntıları belirtilmiştir. Cumhuriyet yöneticileri ve heyeti hattın tamamlanması şerefine bir trenle Diyarbakır'a yolculuk etmiştir. Trenin varmasıyla birlikte de açılış gerçekleştirilmiştir. Açılışta tekrar Cumhuriyetin kurulmasıyla ülkenin refahının artırılması ve bu kapsamda ülkenin her köşesini demir ağlarla örmenin ne kadar önemli olduğundan Diyarbakır hattıyla da buna bir adım daha yaklaşıldığı belirtilmiştir. Demiryolunun gittiği yere ekonomik olarak büyük katkılar sağladığı ve devletin de bu amacı gözettiği belirtilmiştir. Bayındırlık Bakanının yaptığı konuşma;

hükümete bu konuda teşekkür eden, politikasını destekleyen ve halkı da heyecanlandıran etkileyici bir konuşma olmuştur.

1936 Şubat sayısındaki içerikte Devlet Demiryollar ve Limanları İşletme Umumi İdaresi memurları hakkındaki kanunda, memurların bağlı oldukları emekli sandığı ile ilgili daha önce belirlenmiş şartlara eklenen yeni maddelerden bahsedilmiştir. Memur maaşlarının belirlenen bazı durumlarda değişebileceği ve bu durumların ayrıntılarından bahsedilmiştir. Satın alınan Aydın demiryolu otobüslerinin kullanılmayacak durumda olduğu ve satın alma işlemleri tamamen bittikten sonra acilen yenilenmesi gerektiği bildirilmiştir. Bu konu ile ilgili bütçe ayrıldığı ve bütçe açıklamaları da belirtilmiştir.

1936 Mart sayısındaki içerikte Osmanlı'nın inşa etmiş olduğu hatlardan birinin Isparta yakınında olduğu fakat hattın Isparta'ya bir bağlantısının olmaması nedeniyle şehrin ihmal edildiği dile getirilmiştir. Cumhuriyet hükümetinin kararıyla, Bozönü Isparta hattının Afyon-Antalya hattına bağlanacağı ve şehre ulaşımın sağlanacağı belirtilmiştir. Hatta ait yapılacak işler ve iş kalemleri detaylı olarak açıklanmış, hattın projesine de dergide yer verilmiştir. Yapılan ve yapılması planlanan tüm işlerin detaylıca dergide yayınlanması oldukça önemlidir. Özellikle halkın güvenini kazanmanın önemli olduğu bir dönemde seçilen yol oldukça mantıklıdır. Bunun yanı sıra, Avrupa'daki demiryollarına ait ray uzunluklarıyla ilgili tartışmaların olduğu, bu konuyu geliştirmek için sürekli olarak çalışıldığından ray boylarının ne kadar önemli olduğundan bahsedilmiştir. Aynı şekilde ayların birleştirilme şekilleri ve bunun için kullanılan tekniklerden de ayrıntılarıyla bahsedilmiştir.

1936 Nisan sayısındaki içerikte Devlet Demiryolları Müdürlüğü'ne yapılan mal aktarımından ve bunun maliyetiyle ilgili çıkarılan kanundan bahsedilmektedir. Ayrıca Afyon-Antalya hattının yeni açılacak olan diğer bağlantılarının açılışı için, İsmet İnönü ve heyetin bölgeye gittiğinden ve yapmış olduğu konuşmadan bahsedilmiştir. Konuşmasında İnönü, tüm hatları tamamen halkın yararına yaptıklarını ve ülkeyi demir ağlarla örüp en batıyı en doğuya bağlama hedeflerini tekrarlamıştır. 1935 Kasım, 1936 Ocak ve 1936 Mayıs sayılı dergilerde demiryolu ile ilgili herhangi bir içerik bulunmamıştır.

4.3. Bayındırlık İşleri Dergisi 3. yıl (1936 Haziran – 1937 Mayıs)

3. yıldaki ilk sayı 1936 Haziran'da yayınlanmıştır. 1936 Haziran-1937 Mayıs tarihleri arasında 12 adet derginin incelenmesi Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Bayındırlık İşleri Dergisi 3. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|-------------------|--|
| 1936 Haziran [31] | 1) Devlet Demiryollarının yeni tren tarifeleri (sf.143) |
| 1936 Temmuz [32] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1936 Ağustos [33] | 1) Baladız-Burdur hattı inşaatı (sf.40) 2) Türkiye'de demiryolu inşaatı (sf.56) |
| 1936 Eylül [34] | 1) Devlet Demiryolları ve Limanları İşletme Umum Müdürlüğü Tekaüd Sandığı Nizamnamesi (sf.20) 2) Devlet Demiryolları fidanlıkları (sf.52) |
| 1936 Ekim [35] | 1) Demiryolları inşaatı (sf.9) 2) Devlet Demiryolları (sf.173) |
| 1936 Kasım [36] | 1) Devlet Demiryolları Umum Müdürü Ali Rıza Erem'in Bayındırlık İşleri hakkında Ankara radyosunda verdiği konferans (sf.39) |
| 1936 Aralık [37] | 1) Aydın demiryolları (sf.44) |
| 1937 Ocak [38] | 1) Şark demiryollarının satın alınması hakkında bir etüd (sf.37) 2) Avrupa hattında devlet demiryollarının ilk treni (sf.44) |

| | |
|-----------------|--|
| | 3) Birinci kanun 1936 ayında devlet demiryollarında yapılan tarife değişiklikleri (sf.63) |
| 1937 Şubat [39] | Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1937 Mart [40] | 1) Devlet demir yolları ve limanları işletme umumi müdürlüğünün 1936 mali yılı bütçesine munzam tahsisat verilmesine dair kanun (sf.5) 2) Anadolu demiryolları ve Haydarpaşa liman şirketlerine akdedilen 10-12-1928 tarihli mukavelenamenin bazı maddelerinin tadiline dair iki kıta mukavelenamenin tasdiki hakkında kanun (sf.6) |
| 1937 Nisan [41] | 1) Şark demiryolları satın alma mukavelesi (sf.19) |
| 1937 Mayıs [42] | 1) Satın alınan şark demiryolları imtiyazı ile şirkete ait malların tesellüm ve işletme muamelelerine dair kanun (sf.5) 2) Büyük hızla ilerleyen demiryolu inşaatının bugünkü inkişafına umumi bir bakış (sf.54) |

Tablo 4'te sunulan 1936 Haziran sayısındaki içerikte demiryollarına ait yeni tren tarifeleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tren seferlerinde bazı özel durumlarda indirimli tarife uygulanacağından bahsedilmiştir ve bu özel durumların ne olduğu ya da kimlere uygulanabileceği belirtilmiştir.

1936 Ağustos sayısındaki içerikte Afyon-Antalya hattına ait ilk kısım inşaatın tamamlandığı, Baladız-Burdur hattının da yapılarak Burdur şehir merkezine bağlandığından bahsedilmiştir. Bir diğer başlıkta da Railway isimli demiryolu dergisinde Türkiye'de yapılmakta olan demiryolları ile ilgili bir makale yayınlandığından, makalede ülkedeki Sivas- Erzurum, Fevzipaşa-Diyarbakır gibi hatlardan ve bu hatların öneminden bahsedildiği belirtilmiştir. Ayrıca Marmara'dan Akdeniz'e kadar yapılmış olan hatlar ile ilgili bilgiler de verilmiştir. Böyle bir dergide ülke demiryollarıyla ilgili makale yayınlanması oldukça önemli bulunmaktadır.

1936 Eylül sayısındaki içerikte Devlet Demiryolları ve Limanları İşletmesini ilgilendiren emekli sandığı ile ilgili yeni maddeler ve içerikleri belirtilmiştir. Sandığın kim tarafından yönetildiği, kadrosu, bunların görevleri, sermaye ve muhasebe işlerinin ayrıntıları, sermayenin büyütülmesi için yapılabilecekler, maaşların tahsisi, maluliyet ve ayrılma durumları tüm ayrıntılarıyla belirtilmiştir. Devam eden inşa işlerinin büyüklüğünün yanında aslında önemsiz bir konu gibi görünen işler de dergide aynı önemde sunulmaktaydı. Çünkü dünyadaki tüm gelişmeler de takip ediliyor ve onlara da ayak uydurulmaya çalışılıyordu. Bu aya ait içerikte de görüleceği gibi devlet demiryollarına ait fidanlık normalde önemsenmeyecek bir konu iken dergide yer verilmiştir. Avrupa'daki ülkelerde demiryollarının etrafında kullanılan fidanlıkların çeşitleri, hangi amaç için kullanıldıkları, ne gibi yarar sağlayabilecekleri ile ilgili ayrıntılı bir rapor yazdırılmış ve bu rapor sunulmuştur. Bunun yanı sıra fidanlık müdürü C. Duransoy da Türkiye'deki fidanlık ile ilgili detaylı bir rapor hazırlamış ve dergide bu rapor da sunulmuştur. Bu konu ile ilgili özel bir çalışma yapıldığı belirtilmiştir.

Ekim 1936 sayılı dergi Cumhuriyetin 13. yılına denk geldiği için genel olarak bu tarihe kadar yapılmış işlerin genel bir derlemesi bildirilmiştir. 1936 Kasım sayısındaki içerikte, Müdür Ali Rıza Erem'in bayındırlık işleri ile ilgili Ankara radyosunda bir konferans verdiğinden, bu konferansta da 13 yılda demiryollarının toplam uzunluğunun 6790 km'ye ulaştığını bildirdiğinden ve devam eden inşaatlarla ilgili bilgiler verdiğinden bahsedilmiştir. Ankara Gar binasının öneminden ve oto motris, ray otobüslerinin kullanıma başlanmasından ve ne gibi faydalar sağlayacağından bahsedilmiştir. Ayrıca Erem'in konuşmasında özellikle Atatürk'ün demiryolu yapımına verdiği önemi dile getirdiği ve bu konu ile ilgili çalışmalarını yakinen takip ettiğini bildirdiği, bunun yanı sıra karayolu ve köprü yapımının da gerekliliği ve yapılan işlerin mükemmelliğinden bahsettiği görülmektedir.

1936 Aralık sayısındaki içerikte kullanılmaya başlanan Aydın hattının yolcu ve yük taşımadaki öneminden bahsedilmiştir. Ayrıca Osmanlı'dan kalan tüm borçların ödenerek Şark demiryollarının tamamının da satın alınmış olduğu resmi olarak ilan edilmiştir. 1937 Ocak

sayısındaki içerikte bir önceki sayıda yapılan ilanın detayları belirtilmiştir. Şark demiryolları ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Demiryolu bir nevi tanıtılmıştır ve sonrasında bunun bir Cumhuriyet zaferi olduğu belirtilmiştir. Ulaştırma alanında yapılan tüm çalışma ve yatırımların en önemli sebebi olan yabancı sermayenin elindeki hatların satın alınma amacını gerçekleştirmiş olmanın büyük bir zafer olduğu bildirilmiştir. Avrupa hattındaki ilk tren diye bahsedilen ise, satın alım sonrası Şark demiryollarının isminin değiştirilerek Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları olduğu ve ilk trenin Edirne'ye tüm halkın coşkusuyla yola çıktığıdır. Bunların yanı sıra Aralık 1936'da demiryollarında bir tarife değişikliği yapılmış ve mesafelere göre taşıma ücretlerinde bir takım indirimler uygulanmasına karar verilmiştir.

1937 Mart sayısındaki içerikteki 1936 mali yılı bütçesine ait açıklamalarda, Devlet Demiryollarına bütçeden 1.665.000 lira verildiği bildirilmiştir. Bir diğer mali kanunda da Ankara'da görev yapan kurum memurlarına 60 liralık ek maaş ödemesi yapılacağından bahsedilmiştir. 1937 Nisan sayısındaki içerikte Şark demiryollarının satın alınmasıyla ilgili sözleşmenin ayrıntılarını ve imtiyaz ile şirkete ait malların satın alınması için Nafia vekili Ali Çetinkaya'nın parlamentoda yaptığı konuşma bildirilmiştir. Bu satın alma işi daha önceki sayılarda da belirtilmekte ve neredeyse her sayıda yine dergide konu ile ilgili açıklamalar yapılmaya devam edilmektedir. Bu sayıdaki içerikte Şark demiryollarının kısa bir geçmişinden bahsedilmiş, politik olarak durumu ve konumu ile satın alınma anlaşmasındaki şartlar açıkça anlatılmış, yapmış olunan borçlanmalar bildirilmiştir. Ayrıca Lozan'dan ve 1929'dan sonraki durum da detaylıca anlatılmıştır. Projenin tüm detayları bildirilmiş ve anlaşmanın bütün maddelerinin kabulüyle hükümete devredilen hattın bilgileri verilmiştir.

1937 Mayıs sayısındaki içerikte, Şark demiryollarının tüm yetkilerinin Devlet Demiryolları ve Liman İşletmeleri Müdürlüğüne devredildiğinden ve şirket tarafından işletilir iken yapılan uygulamaların 1938 Mayıs ayı sonuna kadar değiştirileceğinden bahsedilmiştir. Ayrıca demiryolu hatlarının geçtiği şehirlerdeki iş imkânlarının gözle görülür şekilde arttığından da bahsedilmiştir. Ulaşımın ve erişimin kolaylaşmasıyla birçok yere sanayiler kurulmaya başlanmıştır bu da iş imkânlarını arttırmaktadır. Ayrıca yapımı devam eden köprüler ve inşaa aşamalarından ve tünellerden de bahsedilmiştir. 1936 Temmuz, 1937 Şubat sayılarında konu ile ilgili içerik bulunmamaktadır.

4.4. Bayındırlık İşleri Dergisi 4. yıl (1937 Haziran – 1938 Mayıs)

Bayındırlık İşleri dergisinin 4. yılına ait ilk sayısı 1937 Haziran tarihinde yayınlanmıştır. Dergi her ay bir adet olmak üzere 12 adet basılmıştır. 1937 Haziran-1938 Mayıs tarihleri arasında ait dergi incelemeleri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Bayındırlık İşleri Dergisi 4. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|-------------------|--|
| 1937 Haziran [43] | 1) Devlet demiryolları ve limanları işletme umum müdürlüğü memur ve müstahdemlerinin ücretlerine dair olan kanunun bazı maddelerini değiştiren kanun (sf.32) |
| 1937 Temmuz [44] | 1) Devlet demiryollarının ihtiyacı olan muharrrik ve müteharrrik edevatın siparişi için 16 000 000 liraya kadar taahhüt yapılmasına dair kanun (sf.22) 2) Diyarbekir istasyonundan irak ve iran hudutlarına kadar yapılacak demiryolları hakkında kanun (sf.24) 3) Demiryollarımızın inşaat faaliyeti baş döndürücü bir hızla ilerliyor (sf.111) |
| 1937 Ağustos [45] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1937 Eylül [46] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1937 Ekim [47] | 1) Demiryolları inşaatı (sf.21) 2) Demiryollarımız (sf.67) |
| 1937 Kasım [48] | 1) Ankara garının açılma töreni |

| | |
|------------------|--|
| 1937 Aralık [49] | 1) 13. beynelmilel demiryollar kongresi (sf.32) |
| 1938 Ocak [50] | 1) İleri memleketlerde demiryolu, kara ve hava yolları nakliyatının geçirmiş olduğu en mühim safalar (sf.55) |
| 1938 Şubat [51] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1938 Mart [52] | 1) 13. beynelmilel demiryolları kongresi (sf.26) |
| 1938 Nisan [53] | 1) 13. beynelmilel demiryollar kongresi (sf.39) |
| 1938 Mayıs [54] | 1) Sivas Erzurum demiryolunun 208+263. kilometresinde inşa edilen (60.00(demir) x3x20.00 kargır) açıklığında Fırat köprüsü (sf.60) 2) Sivas Erzurum hattındaki inşaat büyük hızla ilerliyor (sf.55) |

Tablo 5’te görüldüğü gibi 1937 Haziran sayısındaki içerikte demiryolları memurları ve diğer çalışanların maaşlarına yönelik yapılan değişikliklerden bahsedilmektedir. Ekim 1937 sayılı dergi Cumhuriyetin 14. yılına denk geldiği için genel olarak bu tarihe kadar yapılmış işlerin genel bir derlemesi bildirilmiştir. 1937 Kasım sayısındaki içerikte 30 Ekim 1937 tarihinde açılan Ankara garının ülkenin başkentinin merkezine yapılmış olmasının büyük bir önem taşıdığından, demiryolları geliştikçe bu garın daha da büyük bir önem taşıyacağından ve hükümetin özellikle bu konuda bu şekilde bir karar vermesinin öneminden bahsedilmiştir. Garın oldukça kısa sürede tamamlanmış ve hızlıca hizmete açılmış olduğu da belirtilmiştir.

1937 Aralık, 1938 Mart ve 1938 Nisan sayılarındaki içeriklerde 13. Beynelmlel Demiryolu Kongresinden bahsedilmiştir. Dünyadaki demiryolu ile ilgili tüm gelişmelerin takip edilmeye çalışılması ve Nafia İşleri heyetinin bu kongreye katılıma da önem verdiğini belirttiği, mevcut durumda büyük bir titizlikle incelemelerin yapıldığı bildirilmiştir. Büyük şebekelerdeki hatların nasıl işletildiği ile ilgili bir bilgilendirme yapılmış ve özellikle bu konunun mali yönü incelenmiştir. Bu konuda elde edilmiş örnek raporlar da incelenmiş ve ileriye yönelik fikir olması açısından değerlendirilmiştir. Kongredeki bir diğer dikkat çeken konu olarak, savaşın ve otomobil rekabetinin demiryolları üzerindeki etkilerinin ne olduğunun konuşulması olmuştur. Konu ile ilgili yazılan raporlar dergide sunulmuştur.

1938 Ocak sayısındaki içerikte “ileri memleketlerde demiryolu, kara ve hava yolları nakliyatının geçirmiş olduğu en mühim safalar” şeklinde belirtilen başlıkta ileri memleketler olarak, gelişmiş ülkeler kastedilmektedir. Gelişmekte olan bir ülkenin örnek alacağı ve kendine rehber edineceği ülkelerin bunlar olduğu düşünülmektedir. Mühendis Arslan Bey 18 Kasım 1937 tarihinde Nafia Vekâletinde bir konferans düzenlemiş ve burada Avrupa ülkelerindeki demiryolu ve karayolu işleri ile ilgili gelişmeleri ayrıntılarıyla sunmuştur. Konferansta, Belçika. İngiltere. Fransa ve Almanya’da demiryolu faaliyetleri, demiryolu ile ilgili işleyiş ve gelişmeler, karayolu ile yapılan nakliyatlar ve otomobil ile ilgili gelişmelerden bahsedilmiştir. Ayrıca havayolu taşımacılığı ile ilgili de bilgiler vermiştir. Bunların yanı sıra ülkelerin yönetimlerinin yapısı da bu bayındırlık işlerindeki gelişmelerle ilişkilendirilmiştir.

1938 Mayıs sayısındaki içerikte bu tarihe kadar yapılan çalışmalar sonucunda Sivas-Erzurum hattının 178 km’sinin hizmete açıldığı belirtilmiştir. Hattın tamamlanması için geriye kalan 370 km’sinin inşa çalışmalarının da sürdüğü belirtilmiştir. Hattın 208 ve 263’üncü km’sinde inşa edilmekte olan Fırat köprüsünün tüm imalat aşamalarından detaylıca bahsedilmiştir. Cumhuriyetin 15. yıldönümünde hattı tamamlamayı planladıklarını ve Erzincan istasyonundan kalkacak olan ilk trenin önemini vurgulamışlardır. 1937 Temmuz sayılı dergiye ulaşamadığı için sadece içerik bilgisi verilmiş, ayrıntılı inceleme yapılamamıştır. 1938 Ağustos, 1938 Eylül ve 1939 Şubat sayılarında konu ile ilgili içerik yoktur.

4.5. Bayındırlık İşleri Dergisi 5. yıl (1938 Haziran – 1939 Mayıs)

Derginin 5. yılına ait ilk sayısı 1938 Haziran ayında olmak üzere tüm yıl boyunca 12 adet dergi yayımlanmıştır. 1938 Haziran-1939 Mayıs tarihleri arasındaki sayılar Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 6. Bayındırlık İşleri Dergisi 5. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|-------------------|--|
| 1938 Haziran [55] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1938 Temmuz [56] | 1) Devlet demiryolları ve limanları işletme umum müdürlüğü 1938 mali yılı bütçe kanunu (sf.29) 2) Devlet demir yolları bir kısım işletme işlerinin sureti idaresine ve demiryolları inşaat mukavelelerinden münbais gümrük resmile diğer vergilerin mahsubuna dair kanun (sf.59) 3) Devlet demir yolları ve limanları işletme umum müdürlüğünün 1934 mali yılı hesabı kati kanunu (sf.68) 4) Devlet demiryolları ve limanları idarei umumiyesinin teşkilat ve vezaifine dair olan 1042 sayılı kanunun 32. maddesinin tadili hakkında kanun (sf.78) 5) Mudanya imar planına nazaran demiryol istasyonunun vaziyeti (sf.130) |
| 1938 Ağustos [57] | 1) 1818 numaralı kanunla devlet demiryolları idaresinden ayrılarak nafia vekâletine bağlanan demiryolları ve limanlar inşaat dairesinin bu ayrılmadan doğan vaziyetini tespit eden kanun (sf.61) |
| 1938 Eylül [58] | 1) Trans iran demiryolu (sf.60) 2) Binici Musul Telküşük demiryolu (sf.61) |
| 1938 Ekim [59] | 1) Cumhuriyet devrinde demiryol yapıcılığı (sf.119) 2) Cumhuriyet devrinde demiryol işletmesi (sf.181) |
| 1938 Kasım [60] | 1) Sivas Erzurum demiryolu inşaatı (sf.53) 2) Sivas Erzurum hattının münakalat muhaberat bakımından temin edeceği faydalar (sf.91) 3) Sivas vilayeti dâhilinde Sivas Erzurum demiryolu istasyonlarına yeniden yapılan yollar (sf.106) |
| 1938 Aralık [61] | 1) Devlet demiryolları ve limanları işletme umum müdürlüğü binası (sf.57) |
| 1939 Ocak [62] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1939 Şubat [63] | 1) Devlet demiryolları ve limanları umumi idaresinin teşkilat ve vazifelerine dair olan 1042 numaralı kanuna ek kanun (sf.5) 2) İstanbul tramvay ve tünel şirketleri de satın alındı (sf.30) |
| 1939 Mart [64] | 1) Demiryollarımızda garanti kilometrik tarihi (sf.14) 2) Şark demiryolları (sf.20) 3) Diyarbakırdan Irak ve İrana doğru ilerleyen demiryollarımızda inşaat faaliyetleri (sf.26) |
| 1939 Nisan [65] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1939 Mayıs [66] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |

Tablo 6’da görüldüğü gibi 1938 Temmuz sayılı dergideki 1, 2, 3 ve 4 numaralı içeriklerde yeni karar verilmiş ve yürürlüğe konulmuş kanunlardan bahsedilmiş ve kanun maddeleri kabul edildiği şekilde yazılmıştır. Ayrıca Mudanya’da hazırlanan bir imar planından, bu planın oldukça sınırlı bir bütçeyle hazırlandığından ve bundan sonra ülkenin geneli için de hazırlanacak olan planlar için önemli bir örnek oluşturacağından bahsedilerek planın detayları da okuyucularla paylaşılmıştır. 1938 Ağustos sayısındaki içerikte, bir kanunla devlet demiryollarından alınarak Nafia vekâletine bağlanan demiryolları ve limanlar inşaat dairesinin bu ayrılma sonucundaki durumu, uygulanacak olan yeni kurallar ve işletmedeki esaslar belirtilmiştir.

1938 Eylül sayısındaki içerikte, önemli olduğu düşünülen Trans İran ve Binici-Musul-Telküşük demiryolları incelenmiş ve bazı bayındırlık haberleri şeklinde yayımlanmıştır. İran demiryolu hattı açılması sebebiyle Atatürk’ün tebrik amaçlı İran şahı Rıza Pehlevi’ye gönderdiği telgraf ve Pehlevi’nin yanıtı bildirilmiştir. Binici-Musul-Telküşük demiryolu hattının da son durumu hakkında ve ilerlemelerle ilgili bilgiler verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi hem Avrupa’da hem de komşu ülkelerde gerçekleşen gelişmeler takip edilmekte ve örnek alınmaktadır. Ekim 1938 sayılı dergi Cumhuriyetin 15. yılına denk geldiği için genel olarak bu tarihe kadar yapılmış işlerin genel bir derlemesi bildirilmiştir.

1938 Kasım sayısındaki içerikte, hükümetin ana amaçlarından biri olan demiryolunu tüm ülkeye yaymak için yapılan çalışmaların oldukça önemli bir kısmı olan Sivas-Erzurum demiryolu hattının, Sivas-Erzincan kesimi inşaatının tamamlandığı ve planlandığı gibi ilk trenin Erzincan'a varmış olduğu bildirilmiştir. Böylelikle büyük bir kısmı tamamlanmış olan hattın geri kalan kısmının inşaa çalışmalarıyla ilgili de bilgiler verilmiştir. Sivas ilinin Sivas-Erzurum demiryolu istasyonlarına yakın bulunan Şarkışla, Kangal ve Divriği kazalarına ulaşımın sağlanabilmesi amacıyla karayollarının da yenilenmiş olduğundan, böylece demiryolu bağlantısının sorunsuz yapılabileceğinden bahsedilmiştir. 1938 Aralık sayısındaki içerikte, demiryolları hatlarının giderek artması ve bu konuya verilen önem düşünülerek mevcut işletme binasının yetersiz olduğuna karar verilmiş ve yeni bir idare binası yaptırılmaya karar verilmiştir. Buranın, yapılmış ve yapılacak olan tüm hatlar için bağlantı noktası gibi olacağı düşünülmüştür.

1939 Mart sayısındaki içerikte, Osmanlı yönetimi zamanında işleyen tüm demiryolları için teminat verildiği ve bu sebeple sürekli borçlu olunduğu ve bu durumdan kurtulamadığı dile getirilmiştir. Yani demiryolu politikasının ülkenin yararına olmasından çok zararına olduğu söylenmektedir. Fakat Cumhuriyetin kurulması ile uygulanan politika ile mevcut borçlanma düzenindeki sistemin değiştirilmek istenmesi ve bununla ilgili hemen çalışmalara başlandığı belirtilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda da şu anki durumda demiryolu politikasının oldukça iyi durumda ilerlediği, başka ülkelerle kıyaslandığında bile durumun oldukça iç açıcı olduğu bildirilmiştir. Osmanlı'nın stratejik olarak hata yaparak hem hatların başkalarında olması hem de para vermesi durumunun ülke için ne büyük bir kayıp olduğunu, şuan ise tam tersine hem para kazanıldığını ve bu kazanılan paranın da yine yeni hatlar yapmak için kullanıldığını, hatların da devletleştirilerek demiryolu politikasının en verimli şekilde sonuçlandığından bahsedilmiştir. Şarkta yani doğuda yeni hatların yapılması ve işletilmesinin ciddi bir mali sorun olduğundan bahsedilmiştir. Başlangıcı Diyarbakır olan ve Irak'la İran'a doğru ilerleyen demiryolunun, Dicle nehri başta olmak üzere geçmek zorunda olduğu birçok su bulunduğu, bu sebeple buralara da köprülerin inşaa ihtiyacı olduğu ve yapımlarına başlandığı, yeni yapılan her işin bir başka imalata gereksinimini ortaya çıkardığını ve böylece büyük bir bayındırlık kalkınması sağlandığı vurgulanmıştır. 1939 Şubat sayılı 5. yılın 9. sayısı olan dergiye ulaşamadığı için içerikle ilgili ayrıntılı açıklama yapılamamıştır. 1938 Haziran, 1939 Ocak, Nisan ve Mayıs sayılarında demiryolu ile ilgili içerik yoktur.

4.6. Bayındırlık İşleri Dergisi 6. yıl (1939 Haziran – 1940 Mayıs)

1939 Haziran-1940 Mayıs tarihleri arasındaki 6. yıla ait dergi içerikleri Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Bayındırlık İşleri Dergisi 6. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|-------------------|---|
| 1939 Haziran [67] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1939 Temmuz [68] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1939 Ağustos [69] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1939 Eylül [70] | 1) Devlet demiryolları 936-37 ve 937-38 Seneleri mayıs ayına ait mukayese cetveli (sf.41) 2) Devlet demiryollarının 937-38 ve 938-39 mali Seneleri onbir ve oniki aylık mukayeseli hasılat cetveli (sf.45) 3) Devlet demiryollarının 1938 ve 1939 Seneleri ilk bir aylık hesbaatını mukayeseli olarak gösterir cetvel (sf.50) 4) Devlet demir yollarının 937-938 ve 936-37 Seneleri işletme neticelerini mukayeseli olarak gösterir cetvel (sf.51) 5) Devlet demiryollarının 1939 temmuz içinde (Avrupa hattı hariç) yolcu nakliyat ve gelirini takribi olarak bildirir mukayeseli cetvel (sf.62) |
| 1939 Ekim [71] | 1) Demiryollar inşaatı (sf.5). |

| | |
|------------------|--|
| 1939 Kasım [72] | 1) Cumhuriyet hükümetimizin büyük zaferlerinden biri daha demiryolu erzurumda (sf.5) 2) Ankara-sivas-erzurum demiryolunun açılması münasebetile (sf.25) |
| 1939 Aralık [73] | 1) Milli demiryollarımızın rakamlarla ifadesi (sf.6) |
| 1940 Ocak [74] | 1) Demiryolu inşaatı faaliyetlerinden (sf.40) |
| 1940 Şubat [75] | 1) Demir ağlarımızın yeni bağlarından (sf.34) |
| 1940 Mart [76] | 1) Demiryollarının röportajı (sf.32) |
| 1940 Nisan [77] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1940 Mayıs [78] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |

Tablo 7’de görüldüğü gibi 1939 Eylül sayısındaki içerikte, devlet demiryollarına ait 1936-1937 Mayıs ve 1937-1938 Mayıs ayının gelir ve giderleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra aynı karşılaştırma 1937-1938 ve 1938-1939 yılları için de yapılmıştır. Bu yıllar arasındaki Avrupa hattı dışındaki tüm yolcu taşıma gelirleri ortalama bir hesapla bildirilmiştir. Karşılaştırmalar da halkın kolayca anlayabilmesi açısından cetveller ve tablolar halinde sunulmuştur. Ekim 1939 sayılı dergi Cumhuriyetin 16. yılına denk geldiği için genel olarak bu tarihe kadar yapılmış işlerin genel bir derlemesi bildirilmiştir. 1939 Kasım sayısındaki içerikte, 20 Ekim 1939’da Ankara-Erzurum hattının açıldığından, bu açılışın büyük bir kutlama havasında geçtiğinden, Türk kafası Türk parası ve Türk ulusunun yüksek azminin bu zaferi sağladığı önemle bildirilmiştir. Ankara-Sivas-Erzurum demiryolu hattının ülke insanının bir eseri olduğu vurgulanarak teknik özellikleri detaylıca anlatılmıştır. Özellikle Türk’ün yüceltiği göze çarpmaktadır.

1939 Aralık sayısı içeriğinde, Cumhuriyet hükümetinin demiryollarını bir ülkeyi medeniyet ve refah nurlarıyla aydınlatan kutsal bir meşale olarak tasvir ettiğini ve 16 yıl gibi kısa sürede toplamda 3189 km’lik tamamen milli olan bir demiryolu ağı oluşturduğu belirtilmektedir. Samsun-Sivas hattı, Amasya-Çukurbük kısmı, Kütahya-Balıkesir hattı, Filyos-Zonguldak kömür hattı, Irmak-Filyos hattı, Batıbel tüneli, Fevzipaşa-Diyarbakır hattı ve tünelleri ile Sivas-Erzurum hattı tüm detaylarıyla belirtilmiştir. Bu işlere ait maddi ayrıntılar da sunulmuştur. 1940 Ocak sayısındaki içerikte, devam eden Aydın hattı, Diyarbakır-İran ve Irak hattı, Erzurum-Sarıkamış hattı ve Adapazarı-Bolu-Gerede hatlarıyla ilgili detaylar verilmiştir.

1940 Şubat sayısında içerikte, Nafia vekâletinin demiryolu hatları ile ilgili yeni birtakım projelerin hazırlığına başladığından bahsedilmiştir. Bu plana göre, şimdiye kadar yapılan tüm çalışmalara ek olarak verimin daha da artırılması, birçok merkezin ana hatlara bağlanması, Ankara ile İstanbul gibi seferlerin en sık ve yoğun olduğu şehirlerin de birbirine bağlanması düşünülmüştür. Bu amaçlarla yeni yapılması planlanan 9 hattan bahsedilmektedir.

1940 Mart sayısındaki içerikte, dergide sunulan tüm içeriklerde yapılan işlerin ne kadar güzel karşılandığını ve işlerin kısa sürede yapılmasından dolayı sanki kolaymış gibi bir algı oluştuğu belirtilmiştir. Bu işlerin aslında görülenin aksine, oldukça zor şartlarda gerçekleştirildiği, hem maddi hem manevi olarak çok yıpratıcı olduğu, işlerin arkasında ciddi bir emek ve çalışma olduğundan bahsedilmiştir. Bunlar işlerin görülmeyen fakat kesinlikle unutulmaması gereken kısımlarıdır. Halkın artık bir şeyi değerlendirirken bu gerçekleri göz önünde bulundurarak değerlendirmesi rica edilmiştir. 1939 Haziran, Temmuz, Ağustos ve 1940 Nisan ve Mayıs aylarına ait dergilerde demiryolu ile ilgili içerik bulunmamaktadır.

4.7. Bayındırlık İşleri Dergisi 7. yıl (1940 Haziran – 1941 Mayıs)

Bayındırlık İşleri Dergisinin 6. yayın yılı bittiğinde, demiryolu ile ilgili başlıklarda bir azalma göze çarpmaktadır. Bu durum, hem devam eden işlerle ilgili sürekli aynı bilgilerin verilmek istenmemesinden hem de artık başka işlerin de yapılmaya başlanmasından dolayı demiryolu odağından uzaklaşılmasından kaynaklanmaktadır. Derginin 1940 Haziran-1941 Mayıs tarihleri arasındaki içerikler Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Bayındırlık İşleri Dergisi 7. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|-------------------|---|
| 1940 Haziran [79] | 1) Diyarbakır istasyonundan Irak ve İran hudutlarına kadar yapılacak demiryolları hakkında 3262 sayılı kanunun birinci maddesinin tadiline dair kanun (sf.5) 2) Kaynaklı uzun raylar (sf.38) |
| 1940 Temmuz [80] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1940 Ağustos [81] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1940 Eylül [82] | 1) Demiryollarının elektrikleştirilmesi (sf.15) |
| 1940 Ekim [83] | 1) İnşaat halinde bulunan hatlarımızdan (Diyarbakır-İrak) demiryolu (sf.13) 2) Yeni yapılacak hatlardan (Elazığ-van) demiryolu (sf.26) 3) Yeni inşa edilmekte olan hatlarımızdan (Zonguldak-kozlu) demiryolu (sf.36) 4) İnşası hazırlıklarına başlanmış olan hatlarımızdan (Adapazarı-bolu) demiryolu (sf.72) 5) (Bozöyük-İnegöl-Bursa-Mudanya) ve (Bursa-Kemalpaşa-Okçugöl) demiryolları (sf.77) |
| 1940 Kasım [84] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1940 Aralık [85] | 1) Kar yağışlarının demiryolları işletmesine tesiri (sf.5) |
| 1941 Ocak [86] | 1) Demiryolları inşaat dairesinin mesai ve faaliyeti hakkında mücmel malumat (sf.48) |
| 1941 Şubat [87] | 1) Demiryolları inşaat faaliyetlerinde inkişaf (sf.75) |
| 1941 Mart [88] | 1) Demiryollarımızda inşaat faaliyetlerinden (sf.91) |
| 1941 Nisan [89] | 1) Demiryolları inşaat faaliyetlerinden (sf.94) |
| 1941 Mayıs [90] | 1) Demiryolları inşaat dairesi faaliyetlerinden Batman betonarme köprüsü aylık faaliyeti (sf.86) |

Tablo 8’de 1940 Haziran sayısındaki içerikte, Diyarbakır istasyonundan Irak ve İran’a kadar yapılacak olan hat ile ilgili yeni bir kanun maddesi ile ilgili açıklamalar yapılmıştır. Buna göre, demiryolu hattının Van gölünden Van’a bağlanması için bazı yerlerde yanaşma iskelesi yapılması ve feribot kullanımı gerekliliğinden bahsedilmiştir. Bir diğer içerikte ise, mühendislerin özellikle son yıllarda kaynaklı uzun raylar konusundaki sorunları araştırdığından bahsedilmiş ve Amerikalı mühendis M. Africano’nun demiryollarındaki kaynaklı uzun raylarla ilgili yaptığı etütlere dergide yer verilmiştir. Africano yaptığı çalışmalar sonucunda birtakım veriler elde etmiş ve uzun rayların olumlu ve olumsuz yanlarını karşılaştırmalı olarak sunduğu bir rapor yayınlamıştır.

1940 Eylül sayısındaki içerikte, demiryolu hatlarının elektrikli olarak kullanılmaya başlanması durumunda sağlanacak faydalardan bahsedilmiştir. Demiryollarının diğer ulaştırma araçlarına nazaran kolektif taşımacılık yaptığı ve mevcut koşullara göre ulaştırmanın en kolay bu şekilde sağlandığı belirtilmiştir. Bir de demiryollarının elektrikli kullanılması başarılı olabilirse o zaman faydaların iki katına çıkacağı belirtilmiştir. Elektriğin demiryollarında kullanılma tarihesi, elektrikleşmenin faydaları ve şartlarından bahsedilmiş, ekonomik ve teknik üstünlükleri incelenmiş ve uygulamayla ilgili bilgiler verilmiştir. Ekim 1940 sayılı dergi Cumhuriyetin 17. yılına denk geldiği için genel olarak bu tarihe kadar yapılmış işlerin genel bir derlemesi bildirilmiştir.

1940 Aralık sayısındaki içerikte, “Kar yağışlarının demiryolları işletmesine tesiri” isimli bir makale sunulmuş ve makalede özellikle İsveç gibi soğuk iklime sahip olan ve kar yağışının yoğun olduğu diğer ülkelerde dikkat edilen noktalardan ve yapılan uygulamalardan bahsedilmiştir. Kar yağışlarının makaslar ve işaret mekanizmaları üzerindeki etkileri, temizlenen karların nakilleri ve manevra servisleriyle ilgili bilgiler verilmiştir. Bundan yola çıkılarak, yoğun yağış sonrası meydana gelebilecek yol kapanması, çığ düşmesi gibi konularda alınabilecek önlemler belirlenmiştir. Normal hava şartlarının dışındaki herhangi bir yağışın yeni yapılmış olan bir demiryolunu nasıl etkileyebileceği konusu tartışılmış ve bu gibi bir durumun yaşanması halinde

oluşacak endişe ve karmaşa için çözüm önerilerinden bahsedilmiştir. 1941 Ocak sayısındaki içerikte, demiryolu inşaat dairesinin kış mevsimi itibariyle zorlaşan hava koşullarından dolayı, arazi çalışmalarına bir süre ara vererek büroda proje ve hesap çalışmalarını yapmalarına karar verildiğinden bahsedilmektedir. Ayrıca Adapazarı-Bolu, Diyarbakır-Cizre, Zonguldak-Kozlu, Elazığ-Van-İran hattıyla ilgili de yapılan son işlerin detayları paylaşılmıştır.

1941 Şubat, Mart ve Nisan sayısında içeriklerde, demiryollarındaki devam eden inşaat faaliyetlerinin tüm detaylarından bahsedilmektedir. Demiryolu inşaatlarında çalışan ameleler ile ilgili hangi bölgelerde kaç kişi çalıştığı, çalışma süreleri ve değişim durumları ile ilgili detaylar verilmiştir. Ayrıca devam eden servis köprüleri, tünel inşaatları, ray döşemeleri ve istasyon binalarıyla ilgili bilgiler de verilmiştir. Kış dolayısıyla bazı çalışmaların tamamen durduğundan, bazılarının ise yarı zamanlı yani hava koşulları uygun olduğu durumlarda devam edildiğinden bahsedilmiştir. Örneğin Diyarbakır-Cizre ve Zonguldak-Kozlu hattının kötü hava şartlarından etkilenmediği ve çalışmaların tüm hızıyla devam ettiği bildirilmiştir. Elazığ-Van-Hudut hattına ise başlanması için gerekli ön hazırlıkların yapıldığı bildirilmiştir. Bunlara ek olarak Batman çayı betonarme köprüsünün bakım ve onarım çalışmaları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Nisan ayında kötü hava şartları dolayısıyla tamamen duran birçok inşaatın havaların düzelmesi ile tekrar devam edilmeye başlandığı bildirilmiştir. Diyarbakır-Cizre hattına ait güzergâhtaki betonarme köprüünün faaliyetlerinin büyük bir hızla devam ettiği ve sona yaklaşıldığı belirtilmiştir. Köprü ayaklarıyla ilgili ayrıntılı açıklama yapılmış ve tamir işlerinden bahsedilmiştir. Bunlara ek olarak da, Zonguldak-Kozlu tüneliyle ilgili açıklamalar yapılmıştır. 1941 Mayıs sayısındaki içerikte Diyarbakır-Cizre üzerindeki Batman çayı betonarme köprüsünün aylık inşa aşamaları ve ilerleme safhalarıyla ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir. 1940 Temmuz, Ağustos ve Kasım sayılarında konu ile ilgili içerik bulunmamaktadır.

4.8. Bayındırlık İşleri Dergisi 8. yıl (1941 Haziran – 1942 Mayıs)

8. yıla ait 1941 Haziran-1942 Mayıs tarihleri arasında yayınlanan 12 adet dergiye ait içerikler Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Bayındırlık İşleri Dergisi 8. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|------------------|--|
| 1941 Haziran[91] | 1) Demiryollar inşaat faaliyetlerinden (sf.101) |
| 1941 Temmuz[92] | 1) Demiryollar dairesinin inşaat faaliyeti (sf.169) |
| 1941 Ağustos[93] | 1) Demiryollarımızdaki inşaat faaliyetlerinden Zonguldak-kozlu hattı (sf.65) |
| 1941 Eylül[94] | 1) Demiryolları inşaat faaliyetinden (sf.74) |
| 1941 Ekim [95] | 1) Cumhuriyetin 18. Yıl dönümünde milli demiryollarımızın inkişafına umumi bir bakış 2) (Elazığ-van-iran) demiryollarımızda inşaat durumu (sf.33) 3) (Diyarbakır-cizre-ırak hudut) demiryolunun inşaat durumunda inkişaf (sf.62) |
| 1941 Kasım [96] | 1) Demiryollarımızın inşaat bölgelerindeki faaliyetlerde ileri verimler (sf.90) |
| 1941 Aralık [97] | 1) Demiryollarımızda inşaat faaliyetleri (sf.70) 2) Demiryollarımızdaki inşaat faaliyetlerinde (Zonguldak- kozlu hattı) (sf.90) |
| 1942 Ocak [98] | 1) Yeni yapılmakta olan demiryollarımızın inşaat durumları (sf.102) |
| 1942 Şubat[99] | 1) Demiryollarımızda (kış mevsimi) inşaat faaliyetlerinden (sf.80) |
| 1942 Mart[100] | 1) Fen kongreleri, ilim ve fen aleminin büyük müesseselerinden demiryol kongreleri (sf.28) |
| 1942 Nisan[101] | 1) Yapılmakta olan demiryollarımızda inşaat ilerleyişinin aylık durumu (sf.85) |
| 1942 Mayıs[102] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |

Tablo 9'da sunulduğu şekliyle dergi içeriklerine ait başlıklar artık tekdüzeleşmiştir. Her sayıda devam eden işlere ait gelişmeler bildirilmektedir ve bu genelde demiryollarındaki inşaat

faaliyetleri şeklinde sunulmaktadır. 1941 Haziran sayısındaki içerikte, Elazığ-Van hattı, Zonguldak-Kozlu hattı, Diyarbakır-Cizre hattıyla ilgili devam eden inşaat durumları belirtilmiştir. 1941 Temmuz sayısında, yapımı devam eden hatların 1941 yılı Haziran ayı itibariyle mevcut durumları ve süren çalışmalarla ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. 1941 Ağustos sayısında, Zonguldak-Kozlu hattına ait inşa çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Bu hat inşaatının kötü hava koşulları etkisiyle duraksamadığı yinelenmiş, belki de hattı diğerlerinden ayıran en önemli özelliği olan karadan kömür nakliyatının yapılabilmesi için büyük bir hızla çalışmalara devam edildiği belirtilmiştir. 1941 Eylül sayısında, yeni başlanması planlanan hatlarla ilgili etüt çalışmalarına başlanmış olduğu bildirilmiştir. Ayrıca Tekirdağ, Bandırma, Erdek ve Gelibolu'da yapılan iskelelerin deniz taşımacılığı açısından öneminden bahsedilerek iskelelerin mevcut inşaat durumları bildirilmiş ve Bandırma iskelesinin yapım aşamaları da tüm detaylarıyla anlatılmıştır.

Ekim 1941 sayılı dergi Cumhuriyetin 18. yılına denk geldiği için genel olarak bu tarihe kadar yapılmış işlerin genel bir derlemesi bildirilmiştir. 1941 Kasım sayısındaki içerikte, devam eden Elazığ-Van-İran demiryolu hattı inşa çalışmalarının kısım kısım yapıldığı ve bu bölgelerde ayrı şekilde devam eden çalışmaların detaylarıyla ilgili bilgi verilmiştir. 1941 Aralık sayısında, da bir önceki sayıda belirtilen çalışmaların detayları verilmeye başlanmıştır. Elazığ-Van-İran hattının birinci kısmına ait toprak işleri hesaplamaları, sanayi işleri detayları, yapılan tüneller ve binalardan bahsedilmiş, ikinci kısmıyla ilgili yine toprak işleri hesaplamaları, tüneller ve balast hazırlıklarından bahsedilmiş, üçüncü kısmıyla ilgili de toprak işleri hesaplamaları ve köprüler ile kalan üç kısım ile ilgili de detaylı bilgiler verilmiştir. 1942 Ocak sayısında, yeni yapılan 3 farklı demiryolundan bahsedilmiştir. Bu hatların birbiriyle herhangi bir bağlantısının bulunmadığı, farklı bölgelere yapıldığı, fakat her hattın bireysel olarak önemli noktalarda inşa edildiğinden bahsedilmiştir. 1942 Şubat sayısında devam eden imalatlardan bahsedilmiştir.

1942 Mart sayısındaki içerikte, dünyadaki bilimsel gelişmeleri takip etmenin gerekliliği her fırsatta dile getirilmekte ve bunu yapmanın da en güzel yolunun kongreleri takip etmek olduğu bildirilmiştir. Bu gibi kongrelere Türkiye bireysel olarak katılamamakta fakat kongre sonrası yapılan yayınlardan faydalanılmakta ve yayınlar Türkçe 'ye çevrilerek dergide yayınlanmaktadır. Bu dergi de bu amaca en iyi şekilde hizmet etmektedir. Kongrelerde yeni geliştirilen yöntemler sunulmakta, kullanılan yöntemlerin eksikliklerinden bahsedilmekte ve bu bilgiler tüm insanlarla paylaşılmaktaydı. Bu fikirler de birçok bilim insanı ve alanında uzman kişiler tarafından görüşülüp tartışılmakta ve çok yararlı kararlar alınmaktaydı. Mevcut bilgilere en güncel bilgileri ekleme noktasında da faydalı çözüm bu kongreleri ve alınan kararları takiple yapılmaktaydı. Demiryolu Kongresi de yıllardır bu amaçla takip edilmekteydi. 1942 Nisan sayısındaki içerikte devam eden işlerin aylık olarak iş kalemleri belirtilmiş ayrıca çalışma koşullarının gittikçe zorlaştığından bahsedilmiştir. Buna rağmen hız kesmeden çalışmalara devam edildiğinden bahsedilmektedir. 1942 Mayıs ayına ait dergide demiryolu ile ilgili içerik bulunmamıştır.

4.9. Bayındırlık İşleri Dergisi 9. yıl (1942 Haziran – 1943 Mayıs)

8 yıl her ay birer adet yayınlanmış olan Bayındırlık İşleri dergisi, 9. yıldan sonra her iki ayda 1 sayı olmak üzere yayınlanmaya başlamıştır. 1942 Haziran-1943 Mayıs tarihleri arasında yayınlanan 6 adet dergiye ait incelemeler Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. Bayındırlık İşleri Dergisi 9. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|---------------------------------|--|
| 1942 Haziran-Temmuz [103] | 1) Demiryollarında emniyet meselesi-nasıl tetkik edilir (çeviren: Yakup kalgay) (sf.20) 2) Yeni demiryollar güzergâhında inşaat durumları (sf.48) 3) İnşaat halinde bulunan demiryollarımızın mayıs ayına ait faaliyetleri (sf.57) |
| 1942 Ağustos-Eylül [104] | 1) Demiryollarında emniyet meselesi nasıl tetkik olunabilir (çeviren-yakup kalgay) (sf.44) |

| | |
|---------------------------------|--|
| | 2) İnşaat halinde bulunan demiryollarımızda haziran 942 faaliyetlerinden (Diyarbakır-cizre) hattı (sf.83) |
| 1942 Ekim-Kasım [105] | 1) Demiryollar inşaatı (sf.21) 2) (Elazığ-van-iran hudut)demiryolu (sf.36) 3) (Zonguldak-kozlu)demir yolu (sf.48) |
| 1942-1943 Aralık- Ocak [106] | 1) İnşaatı devam eden demiryollarımızda faaliyet (sf.87) |
| 1943 Şubat-Mart [107] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1943 Nisan-Mayıs [108] | 1) Zonguldak-Kozlu demiryolunu da işletmeye açtık (sf.102) 2) İnşaat halindeki demiryollarımızda (ikinci kanun ayı içinde) meydana getirilen işler (sf.109) 3) İnşaat halindeki demiryollarımızda (kış mevsiminin müsaadesi nispetinde) ilerlemeler, gelişmeler (sf.116) |

Tablo 10’da 1942 Haziran-Temmuz sayısındaki içerikler incelendiğinde, Science et Monde dergisinden demiryolu emniyeti ile ilgili bir makale Yakup Kalgay tarafından çevrilmiş ve “Demiryollarında emniyet meselesi nasıl tetkik edilir” başlığıyla yayınlanmıştır. Yazıda, 1934 yılında Paris’teki bir kaza sonrasında ortaya çıkan güvenlik sorununu çözmek için İtalyan bir mühendis tarafından keşfedilen ve “ölü adam” olarak adlandırılan bir cihazdan bahsedilmiş ve güvenlikle ilgili ne gibi faydalar sağladığı açıklanmıştır. Cihazın çalışma prensibi olarak, olağanüstü bir durumda devreye girdiği ve sistemin normal seyirde çalışmasını sağladığı bildirilmiştir. Demiryollarının işletme emniyetinin çok önemli olduğu, uzun ve maliyetli yapım aşamaları sonrasında gerekli özenin gösterilerek en iyi güvenlik koşullarının oluşturulmasının sağlanması gerekliliği belirtilmiştir. Yine devam etmekte olan hatlarla ilgili bilgiler verilmiştir.

Bayındırlık İşleri Dergisi Ağustos-Eylül sayısındaki içerikte, önceki sayıda olduğu gibi yine demiryolu emniyetiyle ilgili bir makale çevrilmiş ve ölü adam yöntemine ek olarak yeni yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu tamamen halkı bilgilendirmek amaçlı yapılmaktadır. Vagonlar için de tahta değil demir olanların daha emniyetli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca devam eden Diyarbakır-Cizre hattının inşa durumları ve betonarme Batman köprüsüyle ilgili gelişmelerden bahsedilmiştir. Ekim-Kasım 1942 tarihli dergide, Cumhuriyet’in 19. yılı sebebiyle yapılmış olan tüm işlerin genel bir özeti verilmiştir.

1942 Aralık-1943 Ocak sayısında da devam eden hatlarla ilgili bilgiler verilmiş, 1943 Nisan-Mayıs sayısında da 9 Ağustos 1940 yılında yapımına başlanan Zonguldak-Kozlu demiryolu hattının 2 Mayıs 1943 tarihi itibarıyla tamamlandığı ve kömür vagonlarının geçebilecek hale geldiği için törenle açılışının yapılacağından bahsedilmiştir. Bu açılışın Zonguldaklılar ve Kozlulular tarafından büyük bir coşkuyla karşılandığı da belirtilmiştir. 1943 Şubat-Mart sayısında demiryolu ile ilgili içerik bulunmamıştır.

4.10. Bayındırlık İşleri Dergisi 10. yıl (1943 Haziran – 1944 Mayıs)

1943 Haziran-1944 Mayıs tarihleri arasında incelenen 6 adet dergiye ait içerikler Tablo 11’de sunulmuştur.

Tablo 11. Bayındırlık İşleri Dergisi 10. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|-----------------------------|--|
| 1943 Haziran-Temmuz [109] | 1) İnşaat halindeki demiryollarımızda gelişmeler (sf.112) |
| 1943 Ağustos-Eylül [110] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1943 Ekim-Kasım [111] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1943-1944 Aralık-Ocak [112] | 1) Yapılmakta olan demiryollarında inşaat genel durumu (sf.54) |
| 1944 Şubat-Mart [113] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |

| | |
|------------------------|---|
| 1944 Nisan-Mayıs [114] | 1) Elazığ-van-iran hudut demiryolunda inşaat faaliyeti (sf.47) 2) Yeni demiryollarımızda inşaat ilerlemeleri (sf.53) |
|------------------------|---|

Tablo 11'deki dergi içerikleri incelendiğinde, 1943 Haziran-Temmuz sayısında II. Dünya Savaşı'nın ortaya çıkarmış olduğu zorluklardan bahsedilmiş ve bunun demiryolu işlerindeki etkileri belirtilmiştir. Buna rağmen demiryolu inşaatının dünyada sürekli olarak geliştiği, yapılmakta olan hatların da bu gelişime ayak uydurduğu ve aynı hızda devam edildiği belirtilmiştir. Diyarbakır-Cizre hattının Kurtalan İstasyonuna kadar olan kısmının tamamlandığı, kalan kısmının da yapımına devam edildiğinden bahsedilmiştir. 28 Haziran 1943 tarihinde Diyarbakır-Batman hattının Diyarbakır İstasyonunun büyük bir törenle işletmeye açıldığından bahsedilmektedir. 1943-1944 Aralık-Ocak sayısında, Elazığ-Van-İran hudut hatlarının savaşın etkisiyle yapımının bir hayli zorlaştığı fakat çalışmaların devam ettiği bildirilmiştir. 1944 Nisan-Mayıs sayısında, Elazığ-Van-İran demiryolu hattının birinci ve ikinci kısma ait inşaa çalışmaları ile ilgili bilgiler verilmiş, yeni başlanan Külüşkür köprüsünün ise temel işlemleri anlatılmıştır. İhtiyaç doğrultusunda yeni başlanabilecek demiryolu hatlarının güzergâhlarıyla ilgili bilgiler de verilmiştir. 1943 Ağustos-Eylül, 1943 Ekim-Kasım ve 1944 Şubat-Mart sayılarında demiryolu ile ilgili içerik yoktur.

4.11. Bayındırlık Dergisi 11. yıl (1944 Haziran – 1945 Mayıs)

Dergi bu yıla kadar 6 adet yayınlanırken, 11. yıldan itibaren yılda 4 defa yayınlanmaya başlanmıştır. 1944 Haziran-1945 Mayıs tarihleri arasındaki 4 dergi Ağustos, Ekim, Şubat ve Mayıs aylarında yayınlanmıştır ve bu ayların seçilmesinin özel bir nedeni yoktur. Ağustos 1944 tarihinde yayınlanan ilk sayıda, derginin yayınlanma sıklığının değişmesiyle ilgili bir açıklama yapılmıştır. 10 yıldır idari ve fenni olarak ayrı ayrı yayınlanan derginin, okuyuculara iki ayrı dergiymiş hissi verdiği, ciltleme ve basın işlerinde bazı zorlukların yaşandığı ve bazı teknik sorunlar sebebiyle bundan sonra derginin tek nüsha halinde yayınlanacağı belirtilmiştir. Hükümetin bu karardaki asıl düşüncesinin ise, kâğıt israfının önlenmesi olduğu özellikle belirtilmiştir. 1944 Haziran-1945 Mayıs tarihleri arasındaki dergiler Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 12. Nafia/Bayındırlık Dergisi 11. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|--------------------|---|
| 1944 Ağustos [115] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1944 Ekim [116] | 1) İnşaat halinde bulunan Elazığ-van-iran demiryolu ve inşaat genel durumu (sf.17) 2) Zonguldak kozlu demiryolu (sf.24) 3) Cumhuriyet devrinde yaptığımız demiryollarına bir bakış (sf.36) 4) Bugün inşa halinde olan demiryollarımız (sf.37) 5) Cumhuriyetin son altı yılında başarılı olmuş büyük eserlerden: Sivas Erzurum demiryolu (sf.37) 6) İnşalarına karar verilen yeni demiryollarımız (sf.39) |
| 1945 Şubat [117] | 1) Demiryolu etüdü hakkında notalar (yazan: y m Ekrem k çelikiyol) (sf.22) 2) Demir köprülerin takviyeleri (yazan: y m murat temirhan) (sf.32) |
| 1945 Mayıs [118] | 1) Ray ve emniyet (çeviren: y m Yakup kalgay) (sf.67) |

Tablo 12'den görüldüğü gibi, 1944 Ekim sayısına ait içeriklerde Cumhuriyet'in 21. yılı olmasından dolayı şimdiye kadar yapılmış olan ve daha önceki sayılarda anlatılan tüm demiryolu işlerinin genel bir özeti sunulmuştur. 1945 Şubat sayısındaki içerikte, yüksek mühendis Ekrem K. Çelikkol tarafından yazılmış olan "Demiryolu etüdü hakkında notalar" isimli bir makaleye yer verilmiştir. Makalede yapılması planlanan bir hattın tünel, yarma, imalat ve inşaat aşamalarını göstermek amacıyla yapılan etüt çalışmalarının öneminden bahsedilmiş ve uygulama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Güzergâh tayini için yapılması gereken tüm aşamalar anlatılmıştır. Ayrıca mevcut demir köprülere, mukavemetlerini arttıracak şekilde takviye

yapılması gerektiği ve bu işlem için yapılabilecek uygulamalardan da bahsedilmiştir. 1945 Mayıs tarihli derginin son sayısında daha önce de bahsedilen demiryollarında emniyet sorunuyla ilgili sistemlerin incelenmesine ve bilgi verilmeye devam edilmiştir. Birçok farklı sistemin olduğu, ilgili duruma göre seçilecek sistemi belirleme işinin de uzmanlar tarafından yapıldığından bahsedilmektedir. İşaret kabinesi isimli bir sistemden de detaylıca bahsedilmiştir. CAB sinyal cihazıyla ilgili bilgi verilmiş ve kontrol treni yöntemi de incelenmiştir. Ayrıca demiryolu emniyeti ile ilgili farklı ülkelerdeki uygulamalardan da bahsedilmiştir. 1944 Ağustos sayısında demiryolu ile ilgili içerik yoktur.

4.12. Bayındırlık Dergisi 12. yıl (1946 Mart-1946 Aralık)

Derginin 12. yılına ait sayıları bir önceki sayı ile çıkarıldığı aylar olarak farklılık göstermektedir. Bu yıl için ilk sayı Mart ayında, sonraki sayılar ise Haziran, Ekim ve Aralık ayında yayınlanmış olup, 12. yıla ait tüm sayılar 1946 yılında çıkmıştır. 1946 Mart ve 1946 Aralık tarihleri arasındaki dergilere ait içerikler Tablo 13'te sunulmuştur.

Tablo 13. Bayındırlık Dergisi 12. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|--------------------|---|
| 1946 Mart [119] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1946 Haziran [120] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1946 Ekim [121] | 1) Cumhuriyetin 23. yılında demiryolu inşaatı (sf.13) 2) Demiryolları inşaatında yeni hamleler (sf.28) |
| 1946 Aralık [122] | 1) Demiryollarımızın elektrikleştirilmesi imkânları (çeviren: y m emin yümer) (sf.51) |

Tablo 13'teki içeriklerde, 1946 Ekim sayısında Cumhuriyet'in 23. yılı olmasında dolayı bu zamana kadar yapılan demiryolu işlerinin özeti sunulmuştur. 1946 Aralık sayısında ise, Trabzon-Erzurum demiryolu hattından, bu hattın doğu illerini Karadeniz'e bağlaması bakımından oldukça önemli olduğundan, hat için bir tünel yapılmasının gerektiğinden fakat yapılan etütlerde mevcut eğimin bunun için uygun olmadığından bahsedilmiştir. Bu sebeple hattın elektrikli, dizel elektrikli veya buharlı işletilebilmesi seçeneği göz önünde bulundurulmuş, bu durumda tesis masrafları ve hareket masraflarının karşılaştırması yapılmıştır. Trabzon-Gümüşhane hattının da her 3 durum için ayrı ayrı hesaplamaları yapılmış ve uygun olan yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. 1946 Mart ve Haziran sayılarında demiryolları ile ilgili içerik bulunmamaktadır.

4.13. Bayındırlık Dergisi 13. yıl (1947 Mart-1947 Aralık)

Derginin 13. yılında da 4 adet yayınlanmıştır. 1947 Mart ve 1947 Aralık tarihleri arasındaki dergi içerikleri Tablo 14'te sunulmuştur.

Tablo 14. Bayındırlık Dergisi 13. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|--------------------|---|
| 1947 Mart [123] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1947 Haziran [124] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |
| 1946 Ekim [125] | 1) Cumhuriyetin 24. yılında demiryolu inşaatı ve Elazığ-van demiryolu (sf.17) |
| 1947 Aralık [126] | • Konu ile ilgili içerik yoktur. |

Tablo 14'te 1947 Ekim sayısında Cumhuriyet'in 24. yılı olmasından dolayı bu tarihe kadar yapılmış olan demiryolu ile ilgili genel bir özet sunulmuştur. 1947 Mart, Haziran ve Aralık sayılarında demiryolu ile ilgili içerik bulunmamaktadır. 1 yıllık demiryolu içeriğinden görüldüğü üzere, yeni yapılan bir iş bulunmamaktadır.

4.14. Bayındırlık Dergisi 14. yıl (1948 Aralık)

14. yıl itibariyle derginin yılda yalnızca bir adet yayınlanmasına karar verilmiştir. Her geçen yıl içeriklerde ve yayınlanan dergi adedinde azalma olmasından dolayı, derginin artık yayın hayatında sona yaklaştığı düşünülmektedir. 14. yıla ait içerikler Tablo 15’te sunulmuştur.

Tablo 15. Bayındırlık Dergisi 14. yıl içerikleri

| Sayı | Derginin İçeriği |
|-------------------|---------------------|
| 1948 Aralık [127] | Demiryollar (sf.59) |

Tablo 15’deki demiryolları başlıklı içerikte, mevcut demiryollarının bilgileri verilmiş ve buna ek olarak tünel, viyadük ve büyük köprülerden bahsedilmiştir. Demiryollarının inşa ve işletmesi hakkındaki konulara da yer verilmiştir. İzmir-Aydın hattı, İzmir-Kasaba demiryolları, Anadolu hattı, Bağdat hattı, Mersin-Tarsus-Adana hattı, Cenup hatları, Avrupa demiryolları, Sarıkamış-Kars hudut hattı, Erzurum- Sarıkamış hattı, Ilıca-Palamutluk hattı, Bursa-Mudanya hattı ve Samsun-Çarşamba hattı ile ilgili bilgiler verilmiştir.

4.15. Bayındırlık Dergisi 15. yıl (1949 Aralık)

Bu sayı, derginin son sayısıdır. Derginin içeriği incelendiğinde, bu sayının son sayı olması ile ilgili bir bilgilendirme yazısı bulunamamıştır. Herhangi bir açıklama bulunmadığı için, derginin yayından kaldırılma gerekçesi de, bu kararın planlı olup olmadığı da tam olarak bilinmemektedir. Tablo 16’da 1949 Aralık tarihli 15. yıla ait sayının içeriği sunulmuştur.

Tablo 16. Bayındırlık Dergisi 15. yıl içerikleri

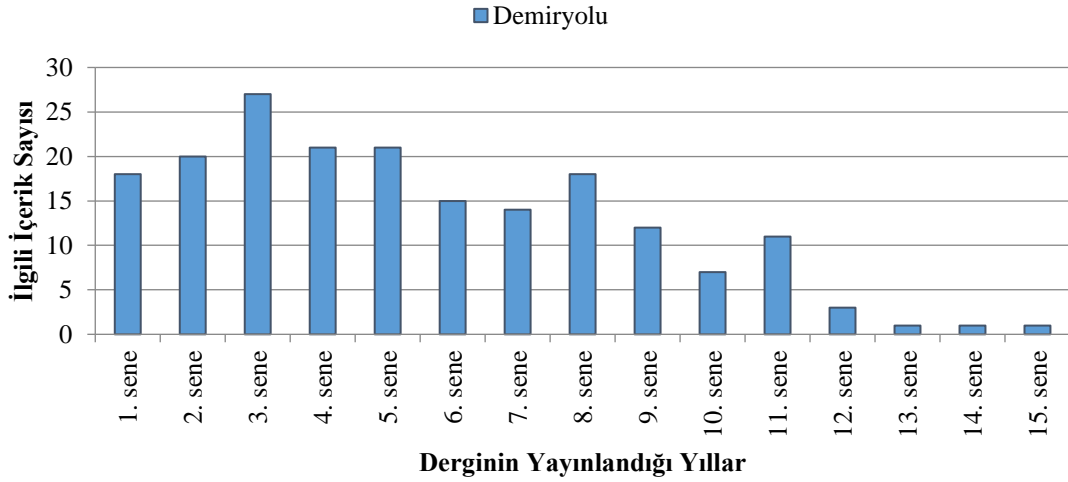
| Sayı | Derginin İçeriği |
|-------------------|-----------------------------|
| 1949 Aralık [128] | Demiryollar İnşaatı (sf.49) |

Tablo 16’daki içerikte, demiryollarında yapılmış olan işlerle ilgili genel bir bilgilendirme yapılmış ve yapılması planlanan işlerle ilgili bilgiler verilmiştir.

5. Sonuç

Bu çalışmada, Erken Cumhuriyet Döneminde yapılmış olan tüm demiryolu işleri, Nafia İşleri Mecmuası adlı dergi üzerinden incelenmiştir. Derginin 15 yıl boyunca yayınlanan her sayısında yapılan ayrıntılı okumalarla, döneme ait demiryolu işleri ve uygulamaları yorumlanmış, izlenen politika belirlenmiştir. Demiryolu politikasını dergi üzerinden inceleme fikrinin en önemli sebebi, hükümet tarafından çıkarılan bu dergide 15 yıla ait tüm bayındırlık işlerinin tüm ayrıntılarıyla anlatılmış olmasıdır.

Demiryolu işlerinin dergi içindeki başlıklarının, yıllara göre nasıl bir değişim geçirdiğini daha net görebilmek ve yorumlayabilmek amacıyla Şekil 1’deki grafik oluşturulmuştur. 1934 Haziran-1935 Mayıs tarihleri arasında yayınlanan 12 adet dergideki demiryolu içeriklerinin sayısı 1. Yıl olarak belirtilmiştir. Bu belirleme diğer yıllara ait sayılar için de yapılmıştır. Demiryolu başlıklarının, derginin içerisindeki ve kendi aralarındaki dağılımının yıllara göre dağılımları Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Bayındırlık dergisindeki demiryolu içeriklerin yıllara göre dağılımı

Nafia İşleri Mecmuasının ilk sayılarındaki demiryolu başlıklarıyla ilgili içeriklerin sayıca fazlalığı Şekil 1’den görülmektedir. İlk yıllara ait içeriklerde, yoğun olarak ülkede yapılan ve yapılması planlanan demiryolu işleri ve bu işlerdeki gelişmeler bildirilmiştir. Demiryolu hatlarının yapım işleri yeni başlamış olduğu için, dergi konu bakımında oldukça yoğun ve dolu bir içeriğe sahip olarak yayın hayatına başlamıştır. Zaman geçtikçe dergi içeriklerinde gözle görülür bir azalma olmuştur. İlk 5 yıl (1934-1939) istikrarlı bir ilerleyiş gösteren derginin, 5. ve 10. yıl (1939-1944) arasındaki içeriklerinde azalma yaşamaya başladığı ve kalan son 5 yıl (1944-1949) içerisinde de ciddi bir azalmayla yayın hayatının sonlanmış olduğu görülmektedir. Bunun, ilk yıllarda dört koldan başlanan demiryolu işlerinin artık o kadar çok yapılmıyor olmasından, yeni yapılmaya başlanan demiryollarının da daha uzun hatlara ait olması dolayısıyla inşaatın tamamlanma sürecinin uzun olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Dergilerin incelenmesi, okunması, tablolştırılıp yorumlanması sonucunda, yayınlanmasındaki birinci amacın halkın yapılan işlerle ilgili doğru bilgilendirilmesini sağlamak olduğu göze çarpmaktadır. Her fırsatta belirtilen bu amacın gerçekleştirilmesi bağlamında derginin yayınlanması sağlanmıştır ancak derginin halka ulaşma aşamasında tam olarak başarı sağlanıp sağlanmadığı bir muammadır. Yapılan ve yapılması planlanan işlerin dergide hem maddi hem de teknik olarak tüm detaylarının bildirildiği görülmektedir. Bunun da yine halkı bilgilendirmeye yönelik yapıldığı kanısına varılmıştır. Yeni kurulmuş bir devletin yapmayı planladıkları tüm işlerin detaylarını paylaşma fikri, halkın bu detayları açıkça görmek isteyeceğinin düşünülmesi ve buna cevap verilmesi oldukça değerlidir.

Dergi içerisinde birçok teknik bilgi de bulunmaktadır. Bu bilgiler de meslekle ilgilenen kişileri bilgilendirmek amacıyla paylaşılmıştır. Çoğu içerikte teknik detaylara yer verilirken bunun yanı sıra halkın da anlayabileceği tarzda yazılar ve içerikler de bulunmaktadır. Yani derginin sadece demiryolu işiyle uğraşan meslek sahiplerine bilgi veren bir teknik dergi olarak kalmasından öte, halkın da okuduğunda anlayabileceği içerikleri olan ve hükümetin yaptığı tüm işleri takip edebileceği bir aracı olması amaçlanmıştır.

İlgili tarihlerde yapılan tüm demiryolu hatlarının açılışlarına halkın yoğun bir ilgiyle katılımı göze çarpmaktadır. Bunun aynı coşkuyla dergiye aktarılması ve dergide kullanılan yazı dilinin özellikle halka seslenir gibi olması da yine dikkat çekici bir diğer konudur. Özellikle Atatürk’ün ve diğer hükümet ve Nafia yöneticilerinin hatların açılışına katılmaları, hem açılışlara halkın da katılmasını sağlamakta hem de açılışların daha büyük bir coşkuyla gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Halkın her açılışta hazır bulunduğu ve özel olarak yöresel kostümlerin giyilip yöresel

dans gösterilerinin yapıldığı, dergideki fotoğraf ve yazılarla açıklanmış ve gösterilmiştir. Yine buradan da anlaşılacağı üzere, yapılan tüm işler ve dergide aktarılış şekli halk önceliklidir. Dergi de, amaçlanan bu doğrultuda yayın hayatını devam ettirmiştir.

Derginin içeriklerinde özellikle yurtdışında yapılan işlere de yer verildiği gözlemlenmiştir. Derginin hemen her sayısında Avrupa ya da Amerika'da gerçekleşen bir konferanstan bahsedilmekte, farklı ülkelerin yayınladıkları bilimsel makaleler çeviri yaptırılıp yayımlanmakta, Türkiye Cumhuriyeti'nin bayındırlık alanındaki mevcut durumuyla diğer ülkelerin mevcut durumları karşılaştırılmakta, Bayındırlık Bakanlığı bünyesinde çalışan mühendisler çeşitli gözlemler ve deneyimler için yurtdışına gönderilmektedir. Yeni kurulan devlet yöneticilerinin modernleşmek, yurtdışındaki gelişmeleri takip etmek ve bu bilgileri ülkeye aktarmak fikrini benimsedikleri görülmektedir.

Hükümetin ulaştırma politikaları demiryolu üzerine kurulmuştur. Ülkeyi demir ağlarla örmek düşüncesindeki idareciler, yeni demiryolu hatlarının yapılmasını uygun görmüşlerdir. Tablo 17'de 1924 yılından itibaren yapılan demiryolu hatlarının uzunlukları ve harcanan bütçelerin yığılımlı olarak toplamları sunulmuştur.

Tablo 17. 1924 yılından 1945 yılına kadar yapılmış olan demiryolları uzunlukları ve toplam bütçeleri

| Yıllar | Yılların Sonunda Hatların Toplam Uzunlukları (Km.) | Bütçelerin Toplamları (TL) |
|--------|---|-------------------------------|
| 1924 | 203 | 8 700 000 |
| 1925 | 251 | 29 000 000 |
| 1926 | 513 | 43 900 000 |
| 1927 | 595 | 72 300 000 |
| 1928 | 783 | 151 500 000 |
| 1929 | 1232 | 161 400 000 |
| 1930 | 1392 | 203 300 000 |
| 1931 | 1690 | 225 600 000 |
| 1932 | 1955 | 232 600 000 |
| 1933 | 2012 | 245 700 000 |
| 1934 | 2399 | 260 800 000 |
| 1935 | 2705 | 282 300 000 |
| 1936 | 2849 | 301 300 000 |
| 1937 | 3012 | 320 400 000 |
| 1938 | 3227 | 341 600 000 |
| 1939 | 3277 | 363 000 000 |
| 1940 | 3277 | 383 900 000 |
| 1941 | 3306 | 398 500 000 |
| 1942 | 3360 | 410 700 000 |
| 1943 | 3360 | 438 000 000 |
| 1944 | 3383 | 454 700 000 |
| 1945 | 3447 | 463 500 000 |

Tablo 17'den görüldüğü gibi, 1924 yılında 203 km. olan demiryolu hat uzunluğu 21 yıl içinde toplam 3447 km'ye çıkartılmıştır. Her yıl yeni demiryolu hatlarının yapıldığı görülmektedir. 21 yıl içerisinde yapılan demiryolu hatları için de toplamda 463.500.000 TL gibi bir harcama yapılmıştır ki bu, o döneme göre içinde bulunan maddi zorluklara rağmen demiryolu politikası için ciddi bir bütçe ayrıldığını göstermektedir. Tablo 16'dan da anlaşıldığı gibi, Erken Cumhuriyet Döneminde Türkiye Cumhuriyeti maddi kaynak konusunda her ne kadar yetersiz olsa da, ulaştırma politikalarında ilk sırada tutulan demiryolu ile ilgili yatırımlardan kaçınılmamıştır. Çünkü tamamlanması halinde demiryolunun hem ekonomik hem de siyasi getirisinin oldukça yüksek olacağı bilinmektedir. Her tamamlanan demiryolu hattının istenilen etkiyi yaratması da, devamlılığı açısından önemli olmuştur. Her yeni hattın yapılmasıyla beraber ülkenin en ücra

köşesine uzanılarak, Türk halkının birbirine erişmesi, kenetlenmesi ve huzur içinde yaşamasının sağlandığı ve tam da bu sebeple bu politikanın ilk sıraya konulduğu görülmektedir.

Yöneticiler yabancı şirketlerin elinde bulunan hatların satın alınmasını da diğer önemli mevzu olarak görmekteydiler. Demiryolu inşa ve işletmesinde o dönemde hâkim olan sermaye ve bilgi tamamıyla yabancılara aitti. İmparatorluk dönemi demiryolu politikasının yabancı sermaye ve yabancı bilgi ile demiryolu yapmak, işletmek ve bu işlere destek vermek olduğu, ülkenin kaynaklarının halkın yabancılar için çalıştırıldığı belirtilmiştir. Türkiye Cumhuriyeti'nin demiryolu politikasının ise imparatorluğun tam tersine, yabancı sermaye ve kredileriyle yapılan işleri Türk aklı, Türk parası ve Türk emeğiyle yapmak ve işletmekti. Elazığ hattı bu düşüncenin ilk uygulaması olması itibariyle çok önemlidir. Yapılan işlere bakılırsa, ülke kaynaklarının, fikir madde ve emeğin bir araya getirilip, planlı olarak uygulanması sonucunda başarılı olunduğu görülebilir. Yapılan her işin Türk mühendisler tarafından yapılması sağlanmış, Türk lirası öne çıkarılmış, Türk işçilerle çalışılarak işçinin emeğinden yararlanılmış ve büyük bir birleşim sağlanmıştır. Kurulan demiryolu atölyesiyle, yeterli üretim yapılmaya başlanmış ve başka ülkelere ihtiyaç duyulmadığı kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Dönemin demiryolu politikaları, siyasal durum ve ideoloji ayrılmamış, birbirini desteklemiş ve beraber büyümüştür. Ulaştırma sistemlerinin bir bütün olarak düşünülmesi gerektiğinden, aslında yalnızca demiryolunun varlığının yetersiz olacağı bilinmekteydi. Dolayısıyla bunu destekleyici olarak karayolu ve hatta köprü yapım işlerinin bile yapılması gerekmektedir. Fakat demiryolu çalışmalarının her zaman gölgesinde kalan karayolu çalışmaları hiçbir zaman tam ihtiyacı karşılayamamıştır. Karayolu ağı, demiryolu hatlarını besleyici olarak düşünülmüş ve sadece buna yönelik yatırımlar yapılmıştır. Dergide de birçok yerde, karayolunun gelişmesiyle ülkeye girecek olan motorlu araçların demiryolu araçlarına kıyasla olumlu özelliklerinden bahsedilse de, tam manasıyla üzerinde durulamamıştır. Yine de yol kanunuyla birlikte karayolu çalışmaları halkın da yardımıyla geliştirilmiştir.

Yapılan çalışmayla görüldü ki, Erken Cumhuriyet Döneminde demiryolu işleri ve yatırımları imkânlar zorlanarak ve belirli bir politika izlenerek, ülkeyi geliştirmek ve ileriye taşımak adına yapılmış olan tüm işlerin en başında düşünülmüş ve uygulanmıştır. Dönemsel olarak büyük bir başarı elde edildiğini de söylemek mümkündür.

Bu çalışmanın, alana katkı sağlaması ve dönemde yapılmış olan demiryolu işlerinin belirlenmesi açısından diğer çalışmalara örnek olması düşünülmüştür. Araştırmacıların, dönemin demiryolu politikasının yapılan çalışmalar üzerinden değerlendirilebileceği bir başka yazılı kaynak bularak benzer bir çalışma yapmaları, bulguların değerlendirilmesi adına çalışmanın geliştirilmesini ve daha değerli hale gelmesini sağlayacaktır. Bu bağlamda araştırmacıların, Nafia Mecmuası gibi döneme ait başka kaynakları araştırmaları önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] İ. Tekeli, S. İlkin, "Cumhuriyetin demiryolu politikalarının oluşumu ve uygulaması," *Kebikeç-İnsan Bilimleri İçin Kaynak Araştırmaları Dergisi*, 11, 125-163, 2001.
- [2] S. Avcı, "Ulaşım coğrafyası açısından Türkiye'nin ulaşım politikaları ve coğrafi sonuçları," *Ulusal Coğrafya Kongresi*, İstanbul, 2005.
- [3] İ. Öztürk, "Osmanlı İmparatorluğu'ndan günümüze demiryollarının gelişimi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [4] A. O. Akalan, "Bir kurum olarak Türkiye cumhuriyeti devlet demiryolları tarihi," Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [5] Türkiye Mühendislik Haberleri, "1923-1940 dönemi demiryolları," 442-443, 2006.
- [6] E. As, "Cumhuriyet dönemi ulaşım politikaları," Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi Enstitüsü, İzmir, 2006.
- [7] Nafia İşleri Mecmuası, 1934. T.C. Nafia Vekâleti, Yıl:1, Sayı: 1.

- [124] Bayındırlık Dergisi, 1947. T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Yıl:13, Sayı: 2.
[125] Bayındırlık Dergisi, 1947. T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Yıl:13, Sayı: 3.
[126] Bayındırlık Dergisi, 1947. T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Yıl:13, Sayı: 4.
[127] Bayındırlık Dergisi, 1948. T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Yıl:14, Sayı: 1.
[128] Bayındırlık Dergisi, 1949. T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Yıl:15, Sayı: 1.

Özgeçmiş



Mine POLAT ALPAN

1990’da doğmuştur. Lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. 2014’ten beri Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları ulaştırma tarihi, trafik mühendisliği, trafik planlama, kavşak tasarımı ve trafik güvenliğidir. E-Posta: minepolat@beun.edu.tr



Aysun AYDIN SANCAROĞLU

Lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümünde tamamlamıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesinde Mimarlık bölümünde Dr. Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları Sosyal ve Beşeri Bilimler, Tarih, Türkiye Cumhuriyeti Tarihi, Mimarlık tarihidir. E-Posta: mimar_aysun@ktu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mine POLAT ALPAN: Kaynaklar, Metodoloji, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Aysun AYDIN SANCAROĞLU: Kavramsallaştırma, Doğrulama, İnceleme, Kontrol.



SKL-21 Tipi Gergi Kıskaçlarının Deneysel Hasar Analizi

Ali MOTAMENİ¹, Ömer Can FARUKOĞLU², Rıza GÜRBÜZ¹

¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

*ali.motameni@raymaklab.com

(Alınış/Received: 06.09.2023, Kabul/Accepted: 13.10.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Bu araştırmanın amacı demiryolu hatlarında kullanılan bağlantı elemanlarından biri olan SKL-21 gergi kıskaçlarının hasar analizinin deneysel olarak tespitidir. Çalışmada kullanılan kıskaçlar aynı şehir içi metro hattından 4 adetlik bir örnektir. Kıskaçların kırılma sebeplerini anlamak için numuneler üzerinden çeşitli ölçümler alınmıştır. Kıskaçlar öncelikle gözle muayene edilmiş ve daha sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeye alınmıştır. Mikroyapı incelemeleri ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerden Vickers sertlik ölçümleri alınmıştır. Yapılan hasar analizi kapsamında, kırılmanın oluşumunda iki farklı mekanizma görülmüştür. İlk duruma göre kıskaçlar hatalı montajdan dolayı ray tabanına göre normalden daha düşük bir pozisyonda kalmıştır. Bu durum; tren ray üzerinden geçerken aşırı deplasmana sebep olmakta ve tren rayın üzerinden geçerken kıskaçların zarar görmesi ile sonuçlanmaktadır. İkinci durum ise bazı bağlantı noktalarında kırılan kıskaçların karşısındaki kıskaçların yeterli torkla monte edilmemesidir; bu da kıskaçların aşırı yüklenerek kırılmasına neden olur.

Anahtar kelimeler: SKL-21 gergi kıskaçı, Hasar analizi, Demiryolu bağlantı sistemi

Experimental Failure Analysis of SKL-21 Type Tension Clamps

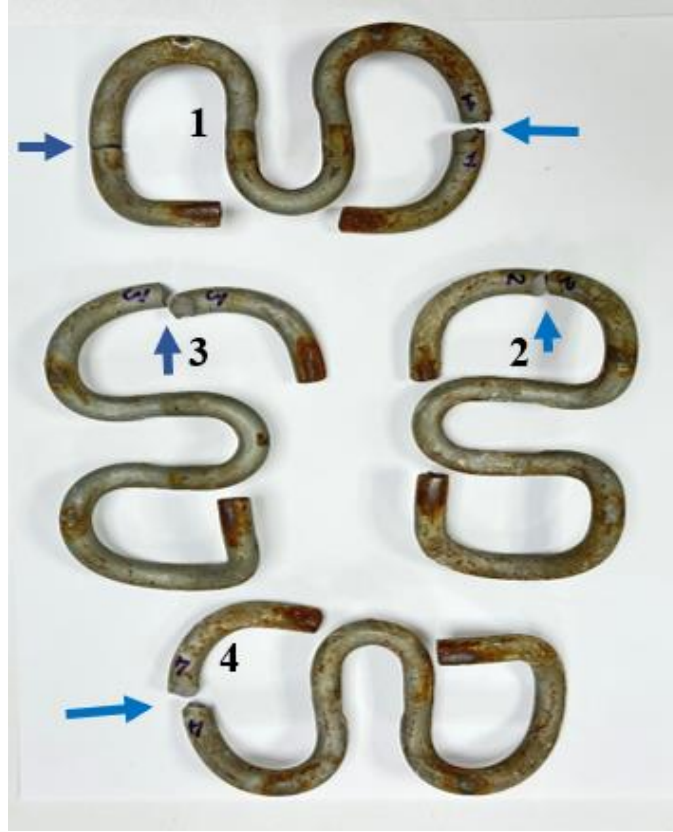
Abstract: The aim of this research is to experimentally determine the failure of SKL-21 tension clamps, one of the fasteners used in railway lines. The clamps used in the study are a sample of 4 from the same urban metro line. Various measurements were taken from the samples to understand the reasons for the fracture of the clamps. The clamps were first visually inspected and then examined by scanning electron microscopy (SEM). Microstructure examinations and energy dispersive spectroscopy (EDS) analyses were performed. Additionally, Vickers hardness measurements were taken from the samples. Within the scope of the failure analysis, two different mechanisms are observed in the formation of the fracture. According to the first case, the clamps remained in a lower position than the rail base due to incorrect assembly. This situation causes excessive displacement and results in damage to the clamps as the train passes over the rail. The second case is that, at some fastening points, the clamps across the fractured clamps are not assembled with enough torque, which causes fracture by overloading the clamps.

Keywords: SKL-21 tension clamp, Failure analysis, Railway fastening system

1. Giriş

Demiryolu taşıma sistemleri sektördeki gelişmelerle birlikte hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. Özellikle Çin, Japonya gibi Asya ülkelerinde faal olan yüksek hızlı demiryolu sistemleri, toplu taşıma için ayrılan bütçelerde belirgin ekonomik kalemler oluşturmaktadır. Benzer yatırımlar Avrupa kıtasında da karşımıza çıkmaktadır. Bu taşıma sistemlerinde hizmet kalitesini ve hızını arttırmak için ülkelerin ulaştırma bakanlıkları ve muhtelif kurumları faal olarak görev sürdürmektedir. Dolayısıyla, hız ve kalitenin artırılması arzusu aşılması gereken bir takım teknik ve mühendislik sorunlarında beraberinde getirmektedir.

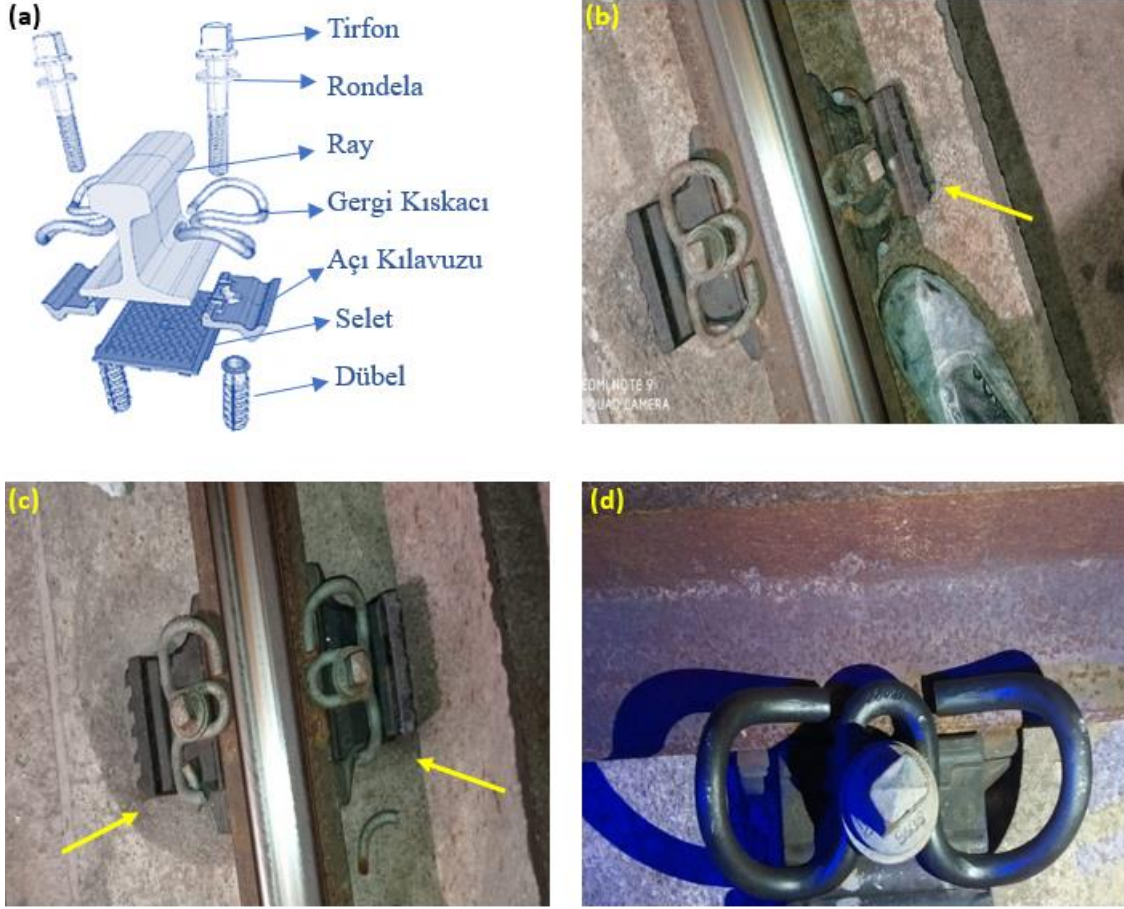
Atıf için/Cite as: A. Motameni, Ö.C. Farukoğlu, R. Gürbüz, "SKL-21 tipi gergi kıskaçlarının deneysel hasar analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 56-66, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1356197



Şekil 1. Hasara uğramış SKL-21 gergi kısıkaçları

Bu çalışmada rayların ve traverslerin birbirine bağlanmasında kullanılan bağlantı elemanlarından biri olan gergi kısıkaçlarında oluşan hasarın sebepleri araştırılmıştır. İşbu analize konu hasar görmüş gergi kısıkaçlarından bir örneklem (4 adet) analiz edilmiştir. Örneklem Şekil 1’de verilmiştir ve her bir hasarlı kısıkaç 1’den 4’e kadar numaralandırılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere kısıkaçlardaki kırılma noktaları oklarla belirtilmiştir. İlk kısıkaç iki yerden kırılırken, diğer kısıkaçlar tek noktadan kırılmıştır. Kısıkaçlar SKL-21 tipidir ve HM tipi ray bağlantılarında kullanılmaktadır. Şekil 2 (a)’da HM tipi ray bağlantı ekipmanları illüstrasyon halinde verilmiştir. Diğer bağlantı tipleri hakkında bilgi edinmek için ayrıca kaynak [1]’e bakılabilir. Şekil 2 (b), (c) ve (d)’de ise kısıkaçları kapsayan saha fotoğrafları sunulmuştur. Kısıkaçların bulunduğu hatta iki tip bağlantı elemanı kullanılmıştır. Bunlar TPS 05 (ray altı pedi rijitlik değeri 30×10^6 N/m) ve TPS 08 (ray altı pedi rijitlik değeri 16×10^6 N/m) bağlantı malzemeleridir. Bağlantı malzemeleri, tırfonun 200-250 Nm torklanması ile monte edilmektedir. Torklama işlemi sırasında herhangi bir yağlama yapılmamıştır. Yağlama işlemi montaj esnasında aşınmayı ve sürtünmeyi azaltırken aynı zamanda montajlanan parçaların birbiriyle uyum içinde çalışması arttırır. Bazı kesimlerde kırılan kısıkaçların karşısındaki veya öncesindeki veya sonraki kısıkaçların torklarının yeterli sıkılmadığı görülmüştür. Hasarlı parçalar üzerinde yapılan test ve incelemelerin detayları ve sonuçları aşağıda hasar analizi bölümünde alt başlıklar halinde verilmiştir.

Teknik analize geçmeden önce literatürde raporlanmış benzer durumlara değinmek yerinde olacaktır. Bu çalışmaya konu SKL tipi gergi kısıkaçları dışında farklı geometriye sahip kısıkaçlarda demiryollarında kullanılmaktadır. Bu kapsamda, e-tipi kısıkaçlar için verilen kaynaklara göz atılabilir [2-6]. Çalışma [2]’de Çin’de şehir içi metro hatlarında kullanılan e-tipi gergi kısıkaçlarının hasar analizi yapılmıştır. Araştırmada sonlu elemanlar yöntemiyle hem statik hem



Şekil 2. (a) HM tipi bağlantı şekli, (b) Rayın tek tarafından kırılan gergi kısıkaçı, (c) Rayın çift tarafından kırılan gergi kısıkaçı, (d) Montajı sağlam yapılmış gergi kısıkaçı

de dinamik analiz yapılmıştır. Statik analizde lineer olmayan temas teorisi kullanılarak gerilme-gerinim analizleri yapılmıştır. Dinamik analizde ise titreşim modları incelenmiştir. Çalışmada kısıkaçların yanlış montaj, rezonans ve gerilim konsantrasyonları sebebiyle hasara uğradığı belirtilmiştir. Araştırma [3]'te e-tipi kısıkaçlar için yorulma analizi yapılmıştır. Modelin simülasyonunda hem Abaqus hem de Fe-safe programlarından yararlanılmıştır. Bu modeller 12 farklı çalışma koşulu için yapılmıştır. Kaynak [4]'te yine e-tipi bağlantı kısıkaçları için kısıkaçların "tabanına ve ucuna binen yükün kısıkaçın deformasyonu ve yorulma direnci üzerine etkileri incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodu, statik yük deneyleri ve yorulma deneyleri ile kısıkaçın deformasyonu ve yorulma direnci değerlendirilmiştir. Referans [5]'te e-tipi ve fast-tipi kısıkaçlar için Fatemi-Socie yorulma kriteriyle birlikte Abaqus programı kullanılarak sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Ayrıca, yorulma davranışını daha derinlemesine anlamak için kısıkaç malzemelerinden ASTM E466 standardına göre tek eksenli yorulma testleri de yapılmıştır. Makale [6]'da ray ondülasyonunun metro ray bağlantı elemanlarının yorulma ve kırılma davranışları üzerindeki etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi yapılmıştır. Hatta kısa ve uzun aralıklı iki farklı ondülasyon gözlemlenmiştir. Ayrıca, hasara uğramış kısıkaçların birçoğunun kısa aralıklı ondülasyonun olduğu bölgelerde görüldüğü ifade edilmiştir. Bahsi geçen çalışmada da e-tipi kısıkaçlar değerlendirilmiştir. Çalışma [7]'de 300-350 km/s yüksek hıza sahip demiryolu hatlarında W1-tipi kısıkaçların hasar analizi yapılmıştır. Araştırmada, kısıkaçların dinamik frekans tepkisi, dinamik gerilimi, yüksek frekansla uyarım (580-680 Hz) gibi konuların hasar mekanizmasına etkisi incelenmiştir. Kaynak [8]'de Güney Kore'de yurtiçi hatlarda kullanılan KR-tipi gergi kısıkaçlarının yapısal davranış ve yorulma performans analizleri yapılmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan testlerde sıkma işleminden sonra kısıkaçlarda, özellikle gerilim yoğunlaşması olan bölgelerde tekrar eden tren yükleri sebebiyle akma

mukavemetinin aşıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalar sonlu eleman modelleriyle de desteklenmiştir.

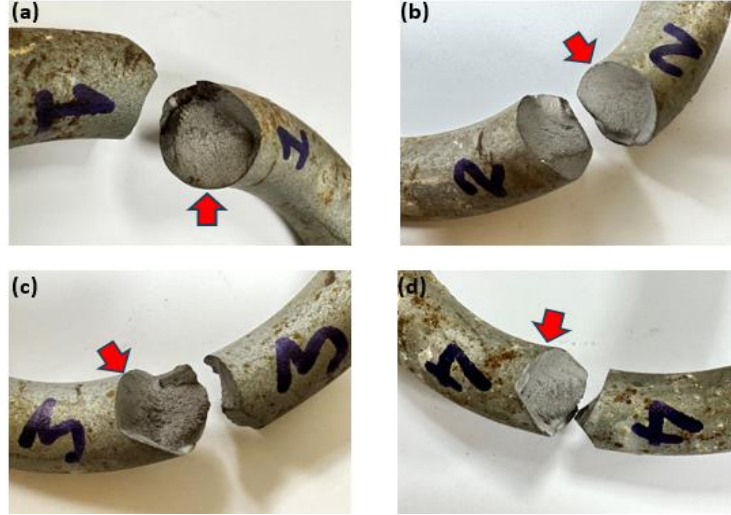
Şu noktaya kadar literatürde bulunan SKL tipi dışındaki farklı geometriye sahip gergi kısıkaçlarına değinilmiştir. Bu kısımda ise SKL tipi gergi kısıkaçlarına odaklanılacaktır. Makale [9]'da SKL-1 tipi kısıkaçlar için hem deneysel hem de sonlu eleman metodu ile yapısal bütünlük analizi yapılmıştır. Bu çalışmada çoğu raporlanan araştırmanın aksine, kısıkaçlardaki hasarın yorulma sebebiyle olmasının oldukça zor bir olasılık olduğu belirtilmiştir. Çalışma [10]'da, Güney Kore'de şehir içi raylı taşımacılık sistemlerinde kullanılan SKL-15 tipi gergi kısıkaçlarında oluşan hasar analizi yapılmıştır. Bu kısıkaçlarda su verilmiş ve temperlenmiş yay çeliğinin üzerindeki dekarbürize tabakanın derinliğinin kırılmaya olan etkisi incelenmiştir. Araştırmada, imalatçı tarafından izin verilen 0.2 mm'lik dekarbürize katman derinliğinin kısıkaçlarda yorulma çatlaklarına sebep olabileceği saptanmıştır. Bir diğer Güney Kore şehir içi raylı hatlar araştırmasında [11], SKL-15 tipi gergi kısıkaçları için yorulma üzerine güvenilirlik tabanlı analiz yapılmıştır. Analizde, sahada kısıkaçlarda gerinim ölçer vasıtasıyla veriler toplanmıştır ve istatistiksel bir model hazırlanmıştır. Yine SKL-15 tipi gergi kısıkaçlarının konu olduğu bir çalışmada [12], 6, 11 ve 16 yıldır hat üzerinde kullanılan kısıkaçlar incelenmiştir. Kısıkaçların hizmet süresine göre malzeme mukavemetindeki bozunma ve kısıkaçların performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma [13]'te deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar metodu vasıtasıyla, SKL-15 gergi kısıkaçları için yorulma parametrelerinde iyileştirme ile kısıkaçlarda dayanım artışı incelenmiştir. Benzer bir biçimde, yine sonlu elemanlar metodu ve deneysel analizle SKL-15 tipi kısıkaçlarda hasar ve yorulma analizleri kaynak [14]'te ele alınmıştır. Burada, Goodman ve Gerber eğrileri kullanılarak yorulma mekanizması hakkında analitik incelemeler yapılmıştır. Yakın tarihli başka bir çalışmada [15] ise SKL-14 gergi kısıkaçları incelenmiştir. Bu çalışmada bahsi geçen kısıkaçlar için çatlak ilerlemesi bakımından güvenilirlik analizi yapılmıştır. Literatür taramasından da görüldüğü üzere, SKL tipi kısıkaçlar için muhtelif çalışmalar mevcuttur. Çalışmalar özellikle SKL-15 tipi geometriye sahip kısıkaçlar üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada ise şehir içi metro hatlarında kullanılan SKL-21 tipi gergi kısıkaçlarında hasar analizi yapılacaktır. Hattın TS EN 13481-5+A1 [16] standardına göre bağlantı sınıfı kriteri B tipi olup, azami tasarım dingil yükü 180 kN ve hattın asgari kurp yarıçapı 80 metredir.

2. Hasar Analizi

Deneysel analiz kapsamında makro gözlemler, mikroyapı gözlemleri, sertlik testi ve kimyasal analiz yapılmıştır. Kısıkaçlar öncelikle gözle muayene edilmiş, ardından SEM ile incelemeye alınmıştır. Mikroyapı incelemeleri ve EDS analizleri yapılmıştır. Bununla birlikte kısıkaçların Vickers sertlik ölçümleri alınmıştır. Bu analizler aşağıdaki alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

2.1. Makro gözlemler

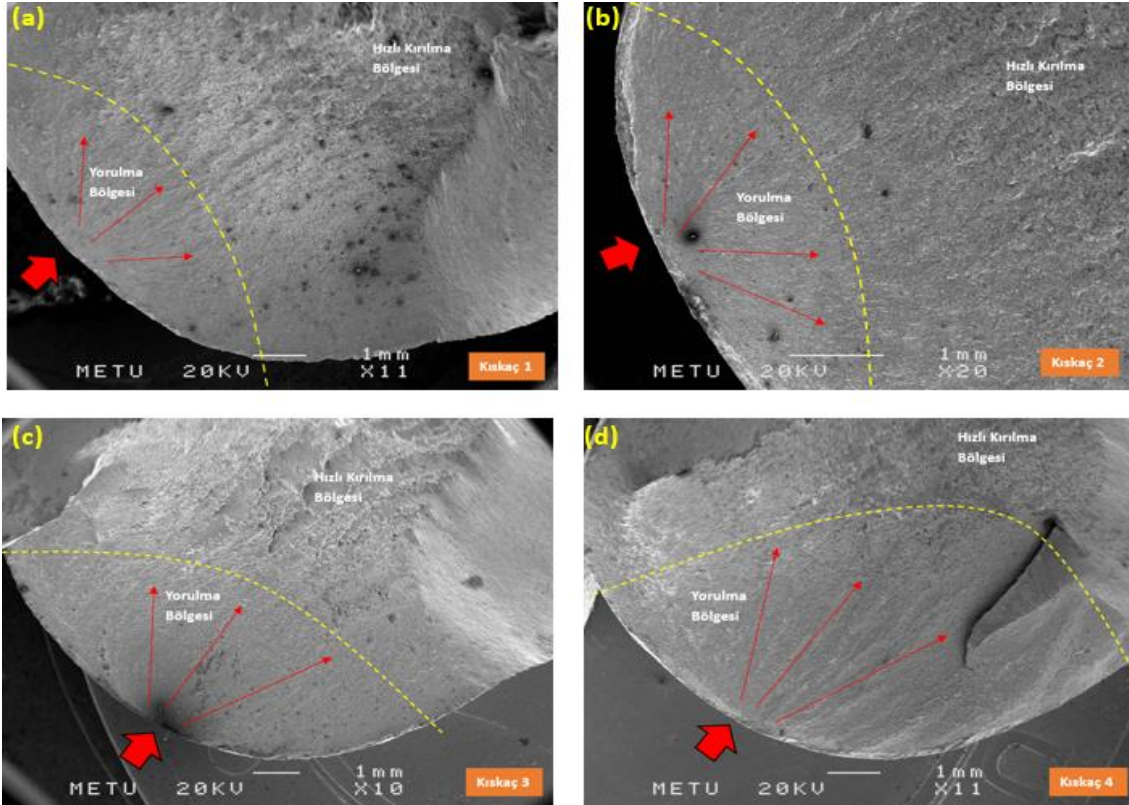
Kırılan kısıkaçların fotoğrafları Şekil 1'de verilmiştir. Bu fotoğraflardaki ortak nokta kısıkaçların aynı noktalarından benzer şekilde kırılmasıdır. Kırılmalar kısıkaçların raya basan uç kısımlarında oluşmuştur. Kısıkaç 1 ise iki ucundan da kırılmış durumdadır. Dört kısıkaçında kırılma yüzeyleri benzer karakterdedir, bakınız Şekil 3. Kırık yüzeyde iki farklı doku dikkat çekmektedir. Nispeten daha düz ve pürüzsüz olan bölge kırılmanın ilk başladığı ve ilerlediği bölgedir. Yorulma yüklemesi (çevrimsel yüklenme) sonucunda oluştuğu görülen bu bölgeler Şekil 3'te oklarla işaretlenmiştir. İkinci bölge ise daha engebeli ve pürüzlü bir dokudadır. Bu bölgenin, kırılmanın son evresinde, eğilme ve burkulma nedeniyle oluştuğu anlaşılmaktadır.



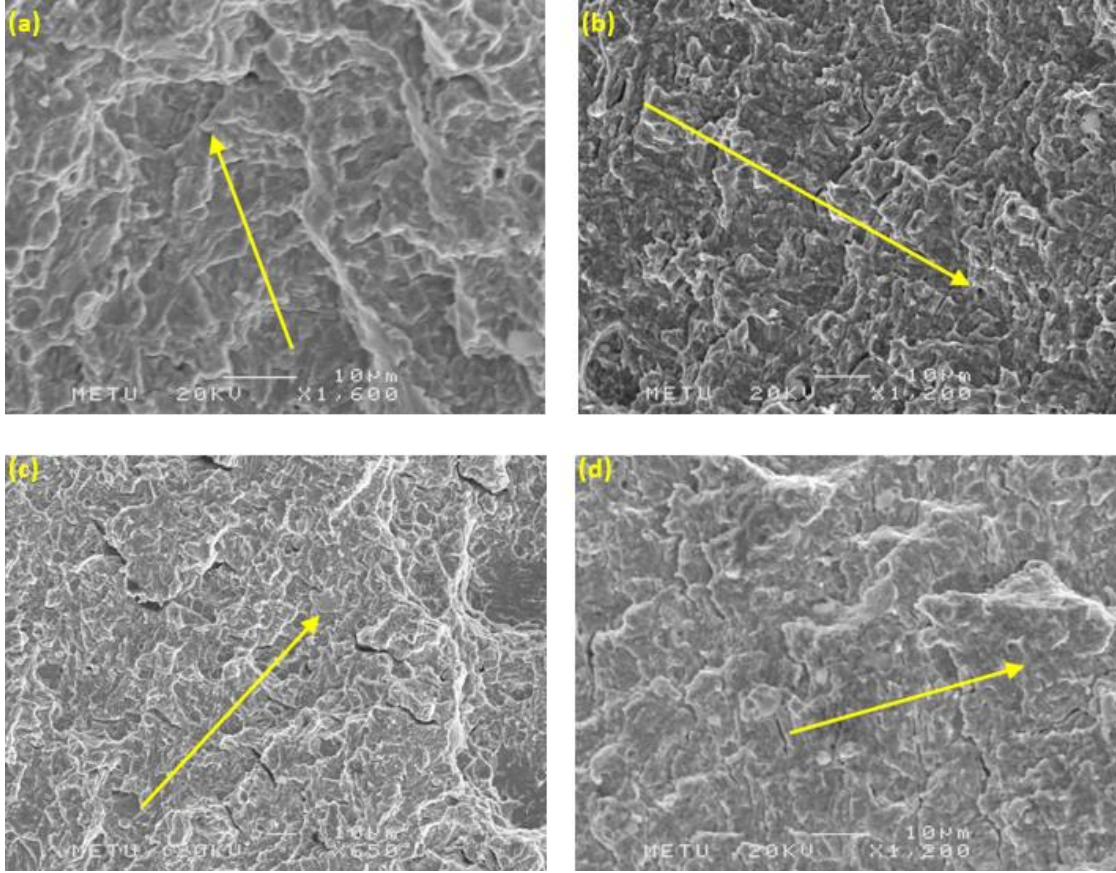
Şekil 3. Numaralandırılmış numunelerin kırık yüzeylerinin makro görünüşleri. Oklar kırılmanın başladığı noktaları göstermektedir

2.2. Elektron mikroskobu ile incelemeler

Kırık yüzeyler elektron mikroskobunda detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 4'te her bir numunenin kırık yüzeyi tek tek verilmiştir. Yorulma çatlaklarının başladığı noktalar radyal şevron çizgileri aracılığıyla kolaylıkla belirlenmiş ve bu noktalar fotoğraflar üzerinde kalın kırmızı oklarla işaretlenmiştir. Yorulma çatlaklarının ilerleme yönleri ise ince kırmızı oklarla gösterilmiştir. Sarı kesikli hatlar ise yorulma çatlaklarının ani kırılma öncesinde gözlemlenebilen son konturlarını göstermektedir. Tüm numunelerde ani kırılma bölgeleri daha engebeli ve sünek dokudadır.



Şekil 4. Kırık yüzeylerin elektron mikroskobundaki genel görünüşleri a) Kıskaç No:1, b) Kıskaç No:2, c) Kıskaç No:3, d) Kıskaç No:4



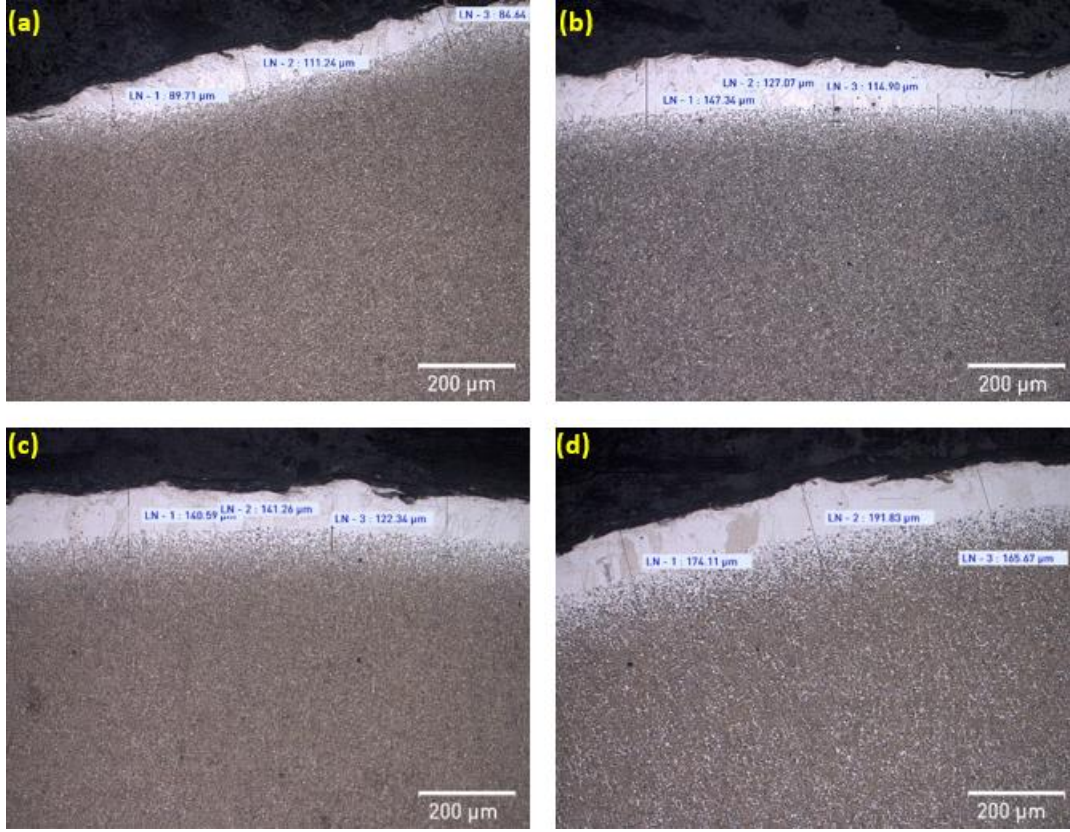
Şekil 5. Yorulma yüzeyi üzerindeki çatlak ilerleme izleri: Yorulma çizgileri ve ikincil çatlaklar. Oklar yorulma çatlaklarının ilerleme yönlerini göstermektedir. a) Kısaç No:1, b) Kısaç No:2, c) Kısaç No:3, d) Kısaç No:4

Yorulma çatlak yüzeyleri üzerinde, çatlak ilerlemesine ait birbirine paralel ikincil çatlaklar ve yorulma çizgileri belirgin olarak gözlemlenmiştir, bakınız Şekil 5. Yorulma çatlaklarının ilerleme yönleri Şekil 5 üzerinde oklarla gösterilmiştir.

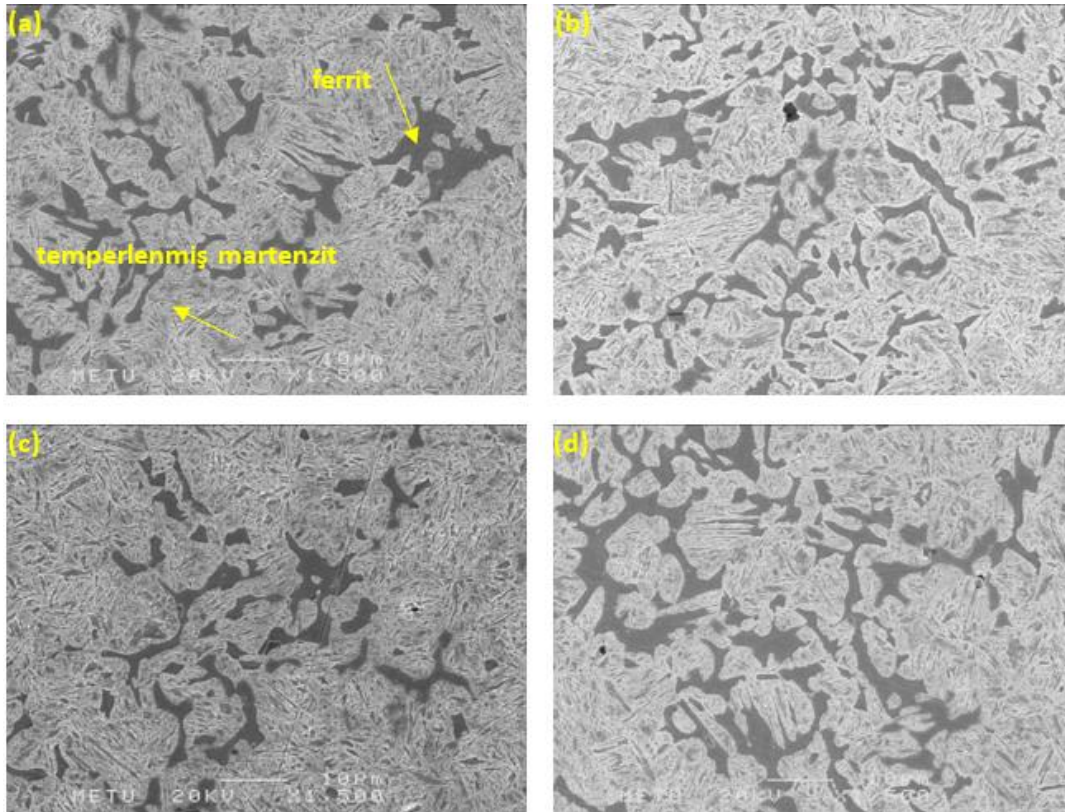
2.3. Mikroyapı incelemeleri

Kısaçların kesitleri metalografik olarak hazırlanmış ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Tüm numunelerin dış yüzeyinde karbonsuzlaşmış (dekarb) bir tabaka mevcuttur. Dekarb tabakasının en kalın olduğu yerlerden çekilen mikroyapı fotoğrafları her bir kısaç için Şekil 6'da verilmiştir. Optik yöntemle ölçülen dekarb derinlikleri mikroyapı fotoğrafları üzerinde gösterilmiştir. Kısaç No 1'den 4'e kadar ortalama dekarb tabakası derinlikleri sırasıyla 95, 129, 135 ve 177 mikron değerindedir. Dekarb tabakaları iri taneli ferrit fazından oluşmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) Teknik Şartnamelerine göre dekarb tabakasının kalınlığı maksimum 0.2 mm derinlikte olması gerekmektedir. Kısaçlar bu koşulu sağlamaktadır.

Dekarb tabakasının dışında yay çeliğinden imal edilmiş kısaçların genel iç yapıları Şekil 7'de verilmiştir. Yapı ferrit ve menevişlenmiş (temperlenmiş) martensitten oluşmaktadır. Martensitik yapının hâkim olduğu matriste yer yer widmanstatten ferrit ve beynit bölgeleri de mevcuttur. Şekil 7(a)'da ferrit ve temperlenmiş martensitik yapılar oklarla gösterilmiştir.

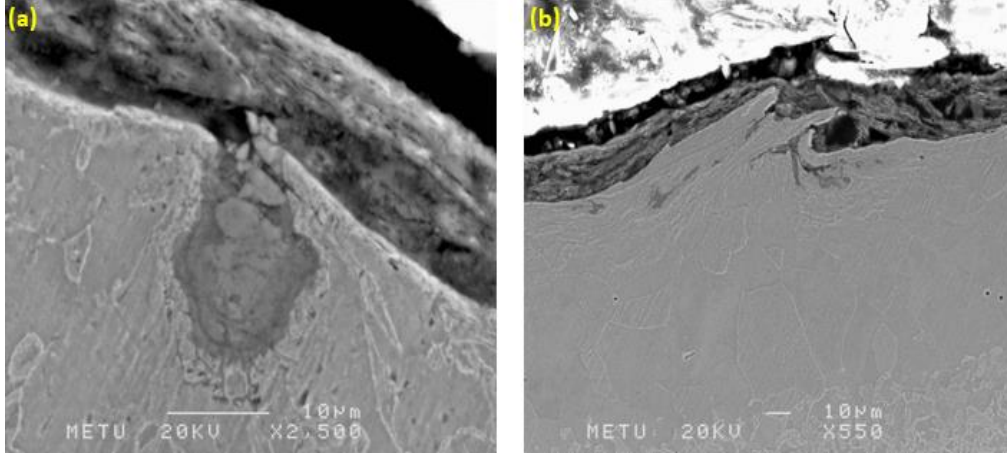


Şekil 6. Kıskaçların dış yüzeyindeki dekarb tabakası ve derinlikleri a) Kıskaç No:1, b) Kıskaç No:2, c) Kıskaç No:3, d) Kıskaç No:4

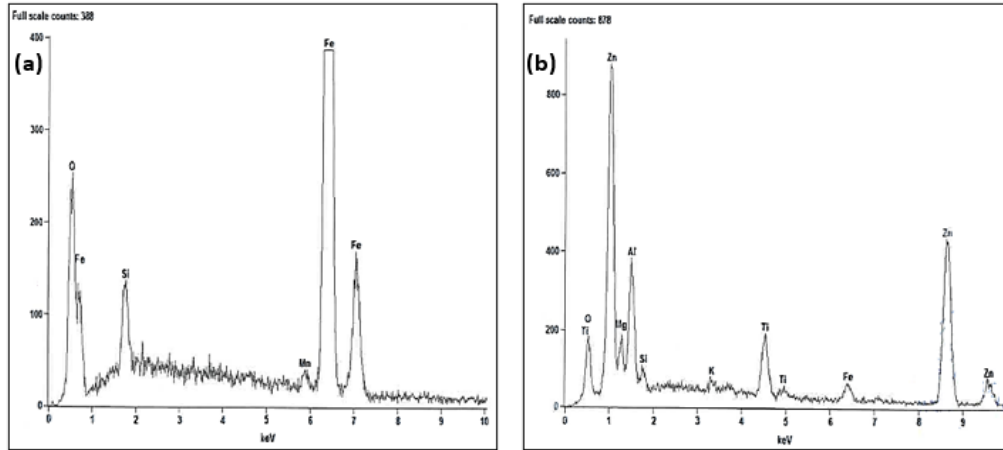


Şekil 7. Kıskaçların genel mikroyapısı a) Kıskaç No:1, b) Kıskaç No:2, c) Kıskaç No:3, d) Kıskaç No:4

Kıskaçların dış yüzeylerinde rastlanan korozyon çukurcuğu, katlanma hatası benzeri düzensizliklerden örnekler Şekil 8’de sunulmuştur. Bu hataların boyu 0.2 mm’den küçüktür. Yüzeydeki korozyon çukurcuklarından birinin içinden yapılan EDS ölçümünün sonucu (Şekil 9 (a)) korozyon ürününün demir oksit olduğunu göstermiştir. EDS analizleri ile numuneyi kaplayan korozyondan koruma tabakasının çinko ve titanyumdan oluştuğu (galvaniz) saptanmıştır, bakınız Şekil 9(b).



Şekil 8. Kıskaç yüzeyinde yorulma çatlakları oluşturabilecek hatalar, a) Korozyon çukurcuğu, b) Katlanma hatası



Şekil 9. EDS analiz sonuçları a) Şekil 8(a)’daki korozyon çukurcuğunun içi, b) Dıştaki galvaniz tabakasının kompozisyonu

2.4. Kimyasal analiz

Optik emisyon spektrometresi kullanılarak kıskaç çeliklerinin kimyasal birleşimi saptanmıştır. Tüm kıskaçlar benzer bileşime sahiptir. Belirlenen kimyasal bileşim Tablo 1’de verilmiştir. Kıskaç çeliğinin kimyasal kompozisyonu yay çelikleri için öngörülen bileşimle uyumludur.

Tablo 1. Kimyasal analiz sonuçları (Ağırlık yüzdesi olarak)

| | C | Si | Mn | P | S |
|--|-----------|---------|---------|------------|------------|
| Kıskaç Çeliği | 0.41 | 1.8 | 0.7 | 0.013 | 0.009 |
| Yay çeliği için öngörülen kimyasal kompozisyon aralığı | 0.35-0.42 | 1.4-1.8 | 0.5-0.8 | Maks 0.025 | Maks 0.025 |

2.5. Sertlik testleri

Kısaçların kesitlerinden hazırlanan mikroyapı numunelerinin sertlikleri Vickers yöntemiyle ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinin sonuçları Tablo 2’de verilmektedir. Tabloda verilen her değer 5 adet ölçümün ortalamasıdır. Kısaçların sertlikleri yay çelikleri için öngörülen sertlik aralığı değerleri içindedir.

| | Kısaç No:1 | Kısaç No:2 | Kısaç No:3 | Kısaç No:4 |
|---|------------|------------|------------|------------|
| Vickers sertlik değeri, HV2 | 412 | 402 | 430 | 418 |
| Yay çeliği için öngörülen Vickers sertlik aralığı | 400-460 HV | | | |

3. Değerlendirme ve Sonuçlar

Kısaçlar yorulma çatlama ve çatlama ilerlemesi nedeniyle zaman içinde kırılmışlardır. Kırılma lokasyonu genellikle kurp bölgeleridir. Tüm kırılmaların kısaçların aynı bölgesinden olması dikkat çekicidir.

Kısaçalarda yorulma çatlaklarının başlama nedeni olarak iki vaka mevcuttur. İlk vakaya göre kısaçlar hatalı montajdan dolayı ray tabanına göre normalden daha düşük seviyede kalmıştır. Bu da kısaçların raya basan uçlarında daha fazla deplasman yapar ve kısaçalarda meydana gelen gerilme malzemenin yorulma dayanım limitinin üzerine çıkar. Bu durumda kısaçların ömrü sonlu olacak ya da tasarım ömürleri kısılacaktır.

İkinci vakada ise kısaçlar normalden fazla yüke maruz kalmışlardır. Bazı bağlantı noktalarında; kırılan kısaçların karşısındaki veya öncesindeki veya sonrasındaki kısaçalarda torklarının yeterli şekilde verilmediği görülmektedir. Çevredeki kısaçların yeterince torklanmamış veya gevşek olmaları, kırılan kısaçlara binen yükü (veya deplasmanı) arttıracaktır. Bu da normalde oluşması beklenmeyen yorulma çatlaklarının oluşması ve ilerlemesini mümkün kılar. Bu durumun özellikle kurplarda daha etkin olması ve kısaçların çevrimsel aşırı yüklere maruz kalmaları beklenen bir olgudur.

Kısaçların kırılma hasarıyla ilgili varılan sonuçlar şunlardır:

- Kırılan kısaçlar kimyasal kompozisyon ve sertlik olarak TCDD teknik şartnamelerine uygundur.
- Kırılmaların nedeni yorulmadır. Yorulma çatlakları kesitin yaklaşık üçte birini geçtikten sonra kısaçlar aniden kırılmıştır.
- Yorulma çatlama kısaçların dış yüzeyinden başlamıştır. Çatlak başlangıç noktalarında galvaniz işleminden veya yetersiz menevişlenmeden kaynaklanan herhangi bir taneler arası kırılma olgusu gözlemlenmemiştir.
- Bu tür yay çeliklerinde yapının tamamen martensitik olması amaçlanır. Kısaçların mikroyapısında bulunan ferrit fazı numunelere doğru ısı işlem yapılmadığını (su verme ve menevişleme) göstermektedir. Temperlenmiş martenzite göre daha yumuşak olan ferrit, yorulma çatlama ve çatlak ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Dış yüzeydeki ferritik dekarb bölgesi de çatlak oluşumu için uygun bir zemin hazırlamıştır.
- Kısaçların dış yüzeyindeki yüzey bozuklukları ve korozyon çukurcuklarının boyutları (0.2 mm’den küçük) her ne kadar öngörülen değerlerin içinde kalsa da yorulma

yüklemesi durumunda bu hataların çatlak başlangıcına neden olabilecekleri teorik bir gerçektir.

Çalışmanın başında yapılan literatür taramasından da görüleceği üzere SKL tipi veya diğer geometrilere sahip kısıkaçlarda hasar oluşması arzulanmasa da karşılaşılan bir durumdur. Hasarın oluşması malzeme kaynaklı, mekanik yük kaynaklı veya imalat hatası gibi muhtelif sebeplerle olabilmektedir. Bunun görece önüne geçmek için kısıkaçların geometrileri üzerine bir optimizasyon çalışması yürütülebilir, imalat yöntemleri güncellenebilir veya saha uygulamalarında daha ehemmiyetli olunması teşvik edilebilir.

Kaynakça

- [1] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, *Raylı Sistemler Teknolojisi, Raylar ve Bağlantılar*. Ankara, Türkiye: MEB, 2013
- [2] H. Xiao, J. B. Wang and Y. R. Zhang, “The fractures of e-type fastening clips used in the subway: theory and experiment,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 81, pp. 57-68, 2017.
- [3] X. Hong, G. Xiao, W. Haoyu, L. Xing and W. Sixing, “Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on abaqus and fe-safe,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 1687814018767249, 2018.
- [4] A. Hasap, P. Paitekul, N. Noraphaiphaksa and C. Kanchanomai, “Influence of toe load on the fatigue resistance of elastic rail clips,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit*, vol. 232, no. 4, pp. 1078-1087, 2018.
- [5] Z. Liu, K. S. Tsang, Y. Liu and J. H. L. Pang, “Finite element and experimental study on multiaxial fatigue analysis of rail clip failures,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 43, no. 10, pp. 2390-2401, 2020.
- [6] L. Ling, W. Li, H. Shang, X. Xiao, Z. Wen and X. Jin, “Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behaviour of rail fastenings,” *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 52, no. 9, pp. 1211-1231, 2014.
- [7] X. Gao, A. Wang, L. Liu, Y. He and L. Ju, “Analysis of failure mechanism of w1-type fastening clip in high speed railway and structure study of damping composite,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 118, pp. 104848, 2020.
- [8] S. H. Kim, X. J. Fang, Y. C. Park and H. B. Sim, “Evaluation of structural behavior and fatigue performance of a kr-type rail clip,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 24, pp. 12074, 2021.
- [9] D. Ferreño, J.A. Casado, I. A. Carrascal, S. Diego, E. Ruiz, M. Saiz, J. A. Sainz-Aja, A. I. Cimentada, “Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the skl-1 railway fastening system,” *Eng. Struct.*, vol. 188, pp. 553-563, 2019.
- [10] Y. C. Park, C. B. An, M. Kim and H. B. Sim, “Effect of the depth of decarburized layer in skl-15 tension clamp on fatigue strength,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 9, pp. 3841-3950, 2021.
- [11] J. H. Kim, Y. C. Park, M. Kim and H. B. Sim, “A fatigue reliability assessment for rail tension clamps based on field measurement data,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no.2, pp. 624-634, 2022.
- [12] J. Y. Choi, S. H. Kim, S. J. Kim and J. S. Chung, “Failure analysis of tension clamps (skl-15) used in serviced urban railway tracks: numerical analyses and experiments,” *Mater.*, vol. 15, no. 18, 6354-6369, 2022.
- [13] J. G. Cho, J. W. Kim and J. S. Koo, “A study on fatigue strength improvement for tension clamp of railway using work hardening,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Bangkok, Thailand, 2019, pp. 012028.
- [14] Y. C. Park, C. An, H. B. Sim, M. Kim and J. K. Hong, “Failure analysis of fatigue cracking in the tension clamp of a rail fastening system,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 19, pp. 1570-1577, 2019.
- [15] S. Mohammadzadeh, S. Ahadi and H. Keshavarzian, “Assessment of fracture reliability analysis of crack growth in spring clip type vossloh skl-14,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O: J. Risk Reliab. Proc. Inst. Mech. Eng. O: J. Risk Reliab.* vol. 228, no.5, pp. 460-468, 2014.
- [16] *Demiryolu uygulamaları yol-bağlantı sistemleri için performans özellikleri bölüm 5*, TS EN 13481-5+A1, 2017

Özgeçmiş**Ali MOTAMENİ**

Ali Motameni Lisans ve Yüksek Lisans eğitimin Orta Doğu Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden almıştır. Doktora eğitimini ise aynı üniversitenin Mühendislik Bilimleri bölümünde tamamlamıştır. Çankaya Üniversitesi Makine Mühendisliğinde ders vermekte olup, Raymak Test firmasının genel müdürlüğü görevini yürütmektedir. İlgi alanları hasar analizi, yorulma, katı mekaniği ve raylı sistemlerdir.

E-posta: ali.motameni@raymaklab.com

**Ömer Can FARUKOĞLU**

Ömer Can Farukoğlu Lisans eğitimini TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği'nde tamamlamıştır. Yüksek Lisansını Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Bilimleri bölümünden almıştır. Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine devam etmekte ve Çankaya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde ders vermektedir. Profesyonel ilgi alanları katı mekaniği, kompozit malzemeler ve hasar analizidir.

E-Posta: omercan.farukoglu@gazi.edu.tr

**Rıza GÜRBÜZ**

Rıza Gürbüz Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Faal olarak Orta Doğu Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde dersler vermekte olup, bölüm başkan yardımcılığı görevini yürütmektedir. Akademik ilgi alanları arasında yorulma, hasar analizi ve mekanik testler bulunmaktadır.

E-Posta: rgurbuz@metu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.

**Demiryolu Taban Zemini Su İçeriğinin TDR Yöntemi ile Ölçümü için Dielektrik Karışım Modeli Yardımıyla Kalibrasyon Geliştirilmesi**

Mehmet ÖZGÜR

*ÇOMÜ, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye**mehmetozgur@comu.edu.tr**(Alınış/Received: 26.09.2023, Kabul/Accepted: 15.11.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2024)*

Öz: Demiryollarında hat performansını değerlendirmek için en sık başvuru parametrelerden birisi hat modülüdür. Altyapı ve üst yapı elemanlarından etkilenmekle birlikte hat modülü büyük oranda taban zemini esneklik modülüne bağlıdır. Esneklik modülü ise tüm zeminlerde su içeriğinin bir fonksiyonudur. Bu sebeple hat modülü yağış rejimine bağlı olarak mevsimsel farklılıklar gösterebilir. Bu durumun hat performansı değerlendirilirken göz önünde bulundurulabilmesi için taban zemini su içeriğinin periyodik ölçümleri yapılmalıdır. Zemin su içeriğinin ölçülmesi için kullanılan yöntemlerin başında etüvde kurutma gelmektedir. Taban zemininden örnek almanın zor olmasının yanı sıra deney prosedürünün 24 saat kurutmaya dayalı olması nedeniyle etüvde kurutma yavaş bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Alternatif olarak Zaman Tanım Alanında Yansıma Yöntemi (Time Domain Reflectometry, TDR), gerçek zamanlı ve uzaktan ölçüm alabilmeyi sağlayan bir elektromanyetik ölçüm yöntemidir. TDR ile ölçülen zeminin dielektrik iletkenliği ile kurulan kalibrasyon denklemi yardımıyla su içeriği belirlenir. Bu çalışmada taban zemini malzemesi olabilecek ve ince dane içeriği en fazla %15 olan 7 farklı zemin sınıfında yapılmış olan TDR ölçümleri literatürden elde edilmiştir. Kalibrasyon denklemi için diğer çalışmalardan farklı olarak regresyon yöntemleri yerine dielektrik karışım modeli kullanılmıştır. Önerilen kalibrasyon, sına setinde seçilen performans göstergeleri ile değerlendirilmiştir. Yine diğer çalışmalardan farklı olarak bir zemin sınıfı yerine zemin grubuna özgü olan kalibrasyon, geniş bir su içeriği aralığında %2,0 hata bandında kalmak koşuluyla %93 tahmin başarısı sağlamıştır. Ayrıca tahmin hatası dağılımının yeterince dar ve sınırlı yakın merkezlenmiş olduğu görülmüştür. Bu bağlamda demiryolu hatlarında taban zemini su içeriğinin periyodik ölçümleri için Türkiye’de kullanımı son derece sınırlı olan TDR, yüksek doğruluk sağlayan hızlı bir ölçüm yöntemi olarak önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Hat modülü, Taban zemini, Su içeriği, TDR, Kalibrasyon

Calibration Development Based on Dielectric Mixture Model for Measurement of Subgrade Water Content with TDR Method

Abstract: One of the most frequently used parameters to evaluate track performance in railways is the track modulus. Although it is affected by substructure and superstructure elements, the track modulus mainly depends on the subgrade resilient modulus. The resilient modulus is a function of water content in all soils. Consequently, the track modulus may show seasonal variations depending on the rainfall regime. Periodic measurements of the subgrade water content should be made in order to consider this situation when evaluating track performance. Oven drying is one of the primary methods used to measure soil water content. In addition to the difficulty of taking samples from the subgrade, oven drying can be considered as time consuming since the procedure is based on 24-hour drying. Alternatively, Time Domain Reflectometry (TDR) is an electromagnetic measurement method that enables real-time and remote measurement. Water content is determined with the help of the calibration equation established with the dielectric permittivity of the soil measured by TDR. In this study, TDR measurements made on 7 different soil classes, which can be considered as subgrade material and whose fine content is maximum 15%, were obtained from the literature. For the calibration equation, unlike other studies, dielectric mixture model was used instead of regression methods. The proposed calibration was evaluated with the performance metrics selected in the test set. Again, unlike other studies, the calibration, which is specific to a soil group rather than a soil class, provided 93% prediction success within a wide water content range, provided that it remains within the 2.0% error band. Additionally, it was observed that the prediction error distribution was

Atıf için/Cite as: M. Özgür, “Demiryolu taban zemini su içeriğinin TDR yöntemi ile ölçümü için dielektrik karışım modeli yardımıyla kalibrasyon geliştirilmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 67-82, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1366737

adequately narrow and centered close to zero. In this context, TDR, whose use is extremely limited in Türkiye is recommended as a rapid method for periodic measurements of subgrade water content on railway tracks that provides high accuracy.

Keywords: Track modulus, Subgrade, Water content, TDR, Calibration

1. Giriş

Yeşil büyüme ve sürdürülebilir kalkınma iklim değişikliğinin sınırlandırılması amacıyla küresel ortak rota haline gelmiştir. Her iki kavram da ekonomik büyüme sağlanırken sera gazı salımının sınırlandırılması esasına dayanmaktadır. Sera gazı salımının sınırlandırılmaması halinde küresel ortalama yüzey sıcaklığında gözlemlenmesi beklenen artışın kuraklık, aşırı yağış, taşkın ve biyoçeşitliliğin kaybı gibi felaketlerin sıklığında bir artışı beraberinde getireceği konusunda görüş birliği söz konusudur. Küresel sera gazı salımının %15'i ulaştırma sektöründe gerçekleşmektedir. Bu oran içinde demiryolu taşımacılığının payı %0,4'tür [1]. Avrupa Birliği (AB) üye ülkelerinde 2014-2018 yılları arasında yolcu taşımacılığında demiryollarında ortalama salım 33,0 gCO₂/km olurken aynı değer karayolu ve havayolu için sırasıyla 143,0 ve 160,1 gCO₂/km olmuştur. Yine AB üye ülkelerinde 2019 yılında yolcu taşımacılığının %8'i ve yük taşımacılığının %17'si demiryolu ile gerçekleştirilirken, ulaştırma için kullanılan toplam enerjinin sadece %1,7'si demiryollarında tüketilmiştir [2].

Söz konusu istatistikler demiryolu taşımacılığının yeşil büyüme ve sürdürülebilir kalkınma açısından vazgeçilmez bir unsur haline geldiğini göstermektedir. Demiryolu taşımacılığı, iklim değişikliği üzerindeki daha az etkisine (diğer ulaşım biçimleriyle karşılaştırıldığında) ilaveten maliyet etkinliği, kısa seyahat süresi ve güvenlik gibi avantajları nedeniyle en etkileyici ulaşım araçlarından biridir [3]. Bu sebeple dünya genelinde demiryolu taşımacılığına yönelik sürekli artan bir talep söz konusudur. Bu durum yük taşımacılığında daha büyük teker yükü ve yolcu taşımacılığında daha yüksek hızları beraberinde getirmiştir [4]. Teker yükü ve hızın artması ile özellikle eski olup yeterli mühendislik hizmeti almamış hatlarda yıpranma ve stabilite sorunları nedeniyle yüksek bakım maliyetleri ile karşılaşmaktadır [5]. Avrupa genelinde yaklaşık 300.000 km'lik demiryolu hattının yenilenmesi ve bakımı için yıllık harcama 15 ile 25 milyar Avro arasında gerçekleşmektedir [6].

Yenileme ve bakım çalışmalarının uygun planlanması için demiryolu hatlarında mevcut performansın en doğru şekilde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple demiryolu hatlarında üstyapı ve altyapı elemanlarının durumunun belirlenmesine yönelik gözleme dayalı inceleme dışında çok sayıda tahribatlı ve tahribatsız inceleme yöntemi kullanılmaktadır. Altyapı elemanları için kullanılan tahribatlı yöntemler çeşitli penetrometre testleri ve inceleme sondajlarıdır. Bu yöntemlerde altyapının incelenen katmanında gerçekleştirilen penetrasyon ve delgi işlemleri katman yapısında hasara yol açarlar. Sismik yansıma ve kırılma, gravite yöntemi, manyetik yöntem, öz direnç yöntemi, sürekli yüzey dalgası yöntemi, elektromanyetik yöntem, yer radarı ve benzeri tahribatsız yöntemlerin ise en büyük avantajı ölçüm noktasında bir hasar oluşturmayacağı olmalarıdır [7].

Hat performansını değerlendirmek üzere en sık başvurulan parametrelerden birisi hat modülüdür. Hat modülü teker yükü etkisinde hat temelinde gelişen reaksiyon kuvvetinin bir göstergesidir. Başka bir deyişle hat modülünün optimum düzeyin altında kalması rayda tekrarlı yükler altında daha fazla sehim olacağı anlamına gelir. Hat modülü farklı üstyapı ve altyapı elemanlarından etkileniyor olsa da taban zemini esneklik modülü en etkin faktördür. Zeminin elastik deformasyon yapabilme yeteneğinin bir ölçüsü olan esneklik modülü, zemin su içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde azalır. Yağış rejimine bağlı olarak hat boyunca taban zemini esneklik modülünde ve beraberinde hat modülünde mevsimsel farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Hat performansının değerlendirilmesinde bu durumu göz önünde bulundurabilmek için taban zemin malzemesinin

esneklik modülünün su içeriği ile ilişkisi ortaya çıkarılıp, hat boyunca taban zemini su içeriğinin periyodik olarak ölçülmesi uygun bir yaklaşım olacaktır.

Zeminlerin su içeriğinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerin içinde en yaygın bilinen ve en doğru sonucu veren etüvde kurutma (oven drying) yöntemidir. Sahadan alınan zemin örneği içinden hazırlanan numunelerin 24 saat boyunca bir etüvde kurutulması, ardından ıslak ve kuru numune kütlelerinin karşılaştırılması esasına dayanan yöntem yavaş ve emek yoğun bir prosedür olarak değerlendirilebilir [8]. Nötron saçılımı (neutron scattering) ve gama ışını azalımı (gamma ray attenuation) gibi radyoaktif yöntemler ise ancak uzman personelin gerçekleştirebileceği ve potansiyel sağlık problemleri barındıran yöntemlerdir [9]. Ayrıca söz konusu tahribatlı yöntemlerin mevcut demiryolu hatlarında erişimi pek mümkün olmayan taban zemininde kullanılması son derece güçtür. Bu yöntemlere alternatif olarak Zaman Tanım Alanında Yansıma Yöntemi (Time Domain Reflectometry, TDR) çok kanaldan gerçek zamanlı ve uzaktan ölçüm yapabilmeye olanaklarıyla demiryolu hatlarında taban zemininde su içeriğinin tahribatsız periyodik ölçümleri için büyük potansiyel barındırmaktadır [10]. Curioni vd. [11] TDR yöntemi ile tüm zemin tiplerinde su içeriği ve kuru yoğunluk gibi mühendislik parametrelerinin uygun bir kalibrasyonla elde edilebildiğini, böylelikle TDR yönteminin gerek tek başına gerekse diğer sığ jeofizik yöntemlerle birlikte kullanılması ile kritik jeoteknik yapıların çevresinde zemin koşullarının uzun dönemli izlenebilir olduğunu ifade etmiştir. TDR yönteminin demiryolu hatlarında kullanımı, yapısal katmanlarda su içeriğinin ölçülmesi ve balast kirlenmesinin belirlenmesi gibi son derece güncel konuları kapsamaktadır.

Pies ve Mocova [12] demiryolu hat yatağının farklı yapısal katmanlarında kullanılabilen iri daneli zeminlerde su içeriğinin belirlenmesi için TDR yöntemini kullanmıştır. Çalışmada kullanılan TDR cihazının ince daneli zeminler için önceden tanımlanmış kalibrasyonlar içermesi nedeniyle iri daneli zeminler için kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Farklı zeminler için sadece 2 su içeriği değerinde yapılan ölçümler yardımıyla kalibrasyon kurulmuş ve sınıma çok az sayıda numune ile gerçekleştirilmiş olsa da TDR, demiryolu hatlarında su içeriğinin ölçülmesi için uygun bir yöntem olarak değerlendirilmiştir. Izvolt vd. [13] benzer bir çalışma ile TDR yönteminin demiryolu hatlarında su içeriği ölçümü için kullanılabilirliğini irdelemiştir. Kalibrasyon 3 farklı zeminle ve her zemin için 5 farklı su içeriğinde yapılan ölçümler ile kurulmuş fakat sınıma her zeminde sadece 1 su içeriğinde gerçekleştirilmiştir. Yöntemin ince ve iri daneli zeminlerde kullanılabilir olduğu vurgulanmıştır. Izvolt vd. [14], TDR yöntemi ile demiryolu hattında istenilen katmanda su içeriğinin ölçülebileceğini ve böylelikle hattın termal rejiminin modellenmesine katkı sağlanabileceğini göstermiştir. Alsabhan vd. [15], demiryolu altyapısının taşıma kapasitesini düşüren, drenaj yeteneğini azaltan ve hat deformasyonunu artıran balast kirlenmesinin belirlenmesi için kullanılan yer radarı yönteminde, kirlenme derinliği ve tipi konularında ortaya çıkan belirsizliğin eş zamanlı TDR ölçümleri ile giderilmesini önermiştir.

Bu çalışmada ilk olarak taban zemini olarak kullanılabilen ve ince dane içeriği en fazla %15 olan 7 farklı zemin sınıfında yapılmış olan TDR ölçümleri literatürden elde edilmiştir. Sonrasında, kalibrasyon mevcut çalışmalardan farklı olarak dielektrik karışım modeli yardımıyla oluşturulmuştur. Son aşamada ise önerilen kalibrasyon, bağımsız ve yeterli büyüklükte bir veri seti üzerinde yine mevcut çalışmalara göre çok daha geniş bir su içeriği aralığında sınınmış ve belirlenen performans göstergeleri ile değerlendirilmiştir.

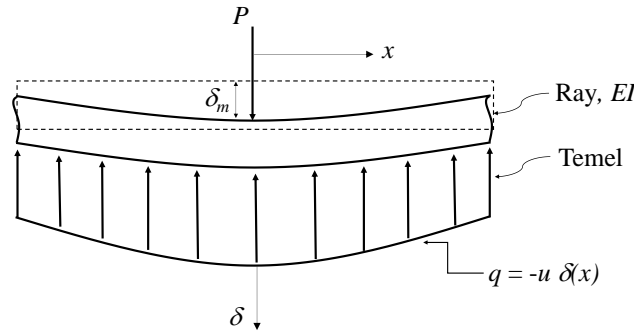
2. Metot

Bu bölümde hat modülü ve taban zemini esneme modülü kavramları açıklandıktan sonra, TDR yönteminin çalışma prensibine ve kalibrasyon aşamasında kullanılan dielektrik karışım modeline yer verilmiştir.

2.1. Hat modülü

Demiryolu hattı üstyapı ve altyapı olmak üzere iki bölümden oluşur. Üstyapı ray, travers, bağlantı elemanları ve balasttan oluşurken altyapı subbalast ve taban zeminini içerir. Tekrarlı trafik yükleri altında hattın mekanik davranışı üstyapı-altyapı etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu davranışı belirleyen en önemli parametreler hat esneme direnci (track stiffness) ve hat modülüdür (track modulus). Bu sebeple esneme direnci ve hat modülü yenileme ve bakım çalışmalarında hat performansını değerlendirmek üzere en sık başvurulan parametrelerdir. Hat esneme direnci hattı oluşturan tüm üstyapı ve altyapı elemanlarının katkı verdiği düşey esneme direncini ifade eder. Hat modülü ise ray hariç yine tüm elemanların etkisini kapsar ve hat temelini birim uzunluğunun esneme direncini ifade eder. Her iki parametre de hat performansını belirlediği için optimum bir seviyede olmaları üstyapı ve altyapı elemanlarının korunması açısından önemlidir.

Daha büyük teker yükü ve hız, tren ile demiryolu arasındaki titreşimi ve etkileşimi yoğunlaştırarak hat üzerinde büyüklüğü ve frekansı artan dinamik gerilmelerin gelişmesine yol açmaktadır [16]. Dinamik gerilmelerin artmasıyla hatta elastik sınır aşılarak plastik deformasyonlar gelişmekte ve hat geometrisi bozulmaktadır. Plastik deformasyonların mertebesi hat esneme direnci ve hat modülü ile doğrudan ilişkilidir. Eğer ray Şekil 1.'de görüldüğü gibi elastik temele oturan sürekli bir kiriş gibi modellenirse, tekerlek yükünü temsil eden P noktasal kuvveti altındaki maksimum sehim (δ_m) yardımı ile hat esneme direnci (k), Denklem 1. ile hesaplanabilir.



Şekil 1. Elastik temele oturan kiriş modeli [17]

$$k = \frac{P}{\delta_m} \quad (1)$$

Hat modülü (u) ise birim hat uzunluğunun birim sehimine karşı hattın gösterdiği reaksiyon kuvveti olarak tanımlanabilir ve Denklem 2. ile hesaplanabilir.

$$u = -\frac{q}{\delta} \quad (2)$$

Denklem 2.'de q , birim hat uzunluğunda teker yüküne karşı gelişen reaksiyon kuvvetidir. Şekil 1.'de görülen modelin diferansiyel denklemi Denklem 3. ile verilmiştir.

$$EI \frac{d^4 \delta}{dx^4} = q = -u\delta \quad (3)$$

Denklem 3.'te E ray malzemesinin elastisite modülünü, I rayın geometrisine bağlı olan atalet momentini, x ise yük uygulama noktasına olan yatay uzaklığı ifade etmektedir. Sınır şartları yardımıyla Denklem 3. çözüldüğünde δ_m Denklem 4. yardımıyla elde edilir.

$$\delta_m = \frac{P\beta}{2u} \quad (4)$$

Denklem 4.'te yer alan β ifadesi ise hat modülü ve rayın eğilme rijitliği (EI) kullanılarak Denklem 5. yardımıyla hesaplanır.

$$\beta = \left(\frac{u}{4EI} \right)^{1/4} \quad (5)$$

Denklem 1. ve Denklem 5. birlikte Denklem 4.'te değerlendirilir ve yeniden düzenlenirse hat esneme direnci ve hat modülü arasındaki ilişki Denklem 6.'da verildiği şekilde elde edilir.

$$u = \frac{(k)^{4/3}}{(64EI)^{1/3}} \quad (6)$$

Denklem 2. göz önüne alındığında daha düşük bir hat modülünün daha büyük bir sehim oluşumu anlamına geleceği görülebilir. Balcı ve Bezgin [18] düşük hat modülünün daha büyük sehim oluşturmanın yanı sıra sehim çukurunun daha geniş bir hat segmentine yayılmasına neden olduğunu göstermişlerdir. Aynı çalışmada aralarında doğrusal bir ilişki olmamakla beraber hat modülünün 10 MPa'dan 100 MPa'ya çıkmasıyla birlikte maksimum sehimin 10 mm'den 1 mm'ye düştüğü de görülmektedir.

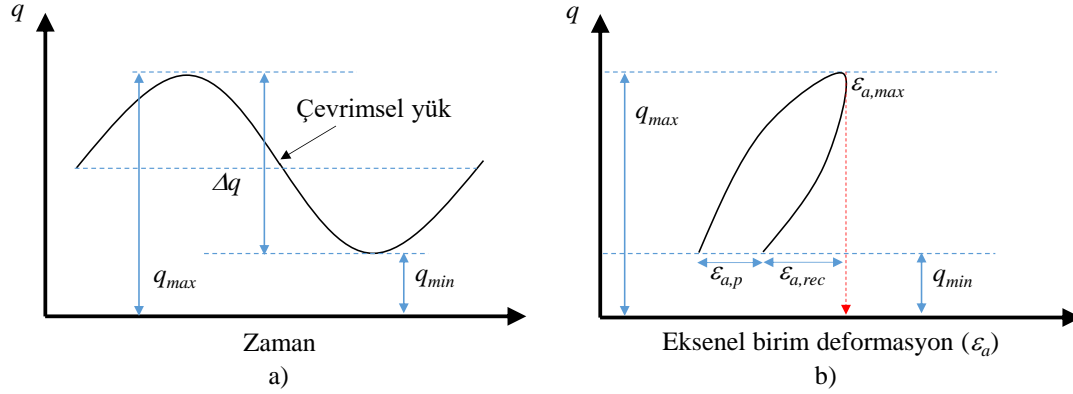
Denklem 6. hat modülünü artırmak için hat esneme direncinin artırılması gerekliliğine işaret etmektedir. Fakat optimum düzeyin üzerinde bir esneme direnci tekerlek-ray ara yüzeyine ilaveten travers ve balast tabakasında daha büyük dinamik kuvvetlerin gelişmesine neden olarak hat üstyapısında ve altyapısında yıpranma ve yorulma davranışlarına yol açar. Ayrıca eşit olmayan sehimler nedeni ile hat geometrisinde bozulma görülebilir [19]. Hat geometrisinin bozulması dinamik kuvvetlerin daha da artmasına neden olarak hat performansını, tren stabilitesini ve yolcu konforunu olumsuz yönde etkiler. Düşük esneme direnci ise daha büyük eğilme momenti ve sehim oluşması nedeniyle rayda yorulma hasarı oluşumunu hızlandırır. Sehim çukurunun daha geniş olması, dinamik yüklerin daha fazla traverse yayılması ve neticesinde balast ile taban zemini tabakalarında daha düşük dinamik gerilmeler meydana getirmekle birlikte balast tabakasında oluşan kayma birim deformasyonları ciddi hat oturmalarına yol açmaktadır [20].

Hat modülü, ray hariç üstyapı ve altyapı bileşenlerinin tamamının katkıda bulunduğu bir parametredir. Fakat bağlantı elemanlarının rijitliği, travers malzemesi ve aralığı gibi faktörlerin hat modülü üzerindeki etkisi son derece sınırlıdır. Balast ve subbalast tabakaları, kalınlıkları görece düşük olduğundan ve elastisite modülleri düşük bir aralıkta değiştiğinden hat modülünü fazla değiştirmemektedir. Hat modülünü en çok etkileyen faktör taban zemini esneklik modülü (M_R) olarak kabul edilmektedir [21].

2.2. Taban zemini esneklik modülü

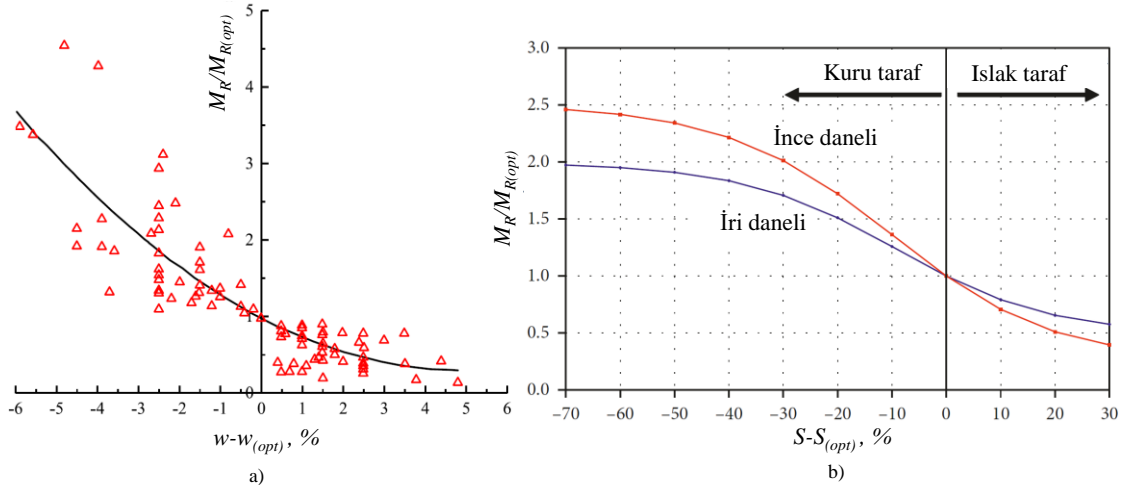
M_R zeminin çevrimsel bir yük altında davranışını şekillendiren en önemli parametredir. Bir çevrim içinde maksimum ve minimum deviatorik gerilmelerin (sırasıyla q_{max} ve q_{min}) farkı uygulanan gerilmenin büyüklüğünü (Δq) gösterir. Gerilme büyüklüğünün, maksimum birim deformasyonun ($\varepsilon_{a,max}$) elastik kısmına ($\varepsilon_{a,rec}$) oranı M_R olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.) ve Denklem 7. ile hesaplanır. Şekil 2.'de $\varepsilon_{a,p}$ plastik (kalıcı) birim deformasyondur.

$$M_R = \frac{\Delta q}{\varepsilon_{a,rec}} = \frac{q_{max} - q_{min}}{\varepsilon_{a,rec}} \quad (7)$$



Şekil 2. Zemin esneme modülünün tanımı a) Çevrimsel yük b) Eksenel birim deformasyon [22]

Hat altyapısının bir bölümü olarak taban zeminini maksimum kuru yoğunluğa ulaşabilmek için optimum su içeriğinde sıkıştırılmış durumdadır. Sıkıştırma işlemi sonucunda bir miktar havanın zemin içinde mutlaka hapsediği bilindiğinden taban zemininin doymun olmadığı sonucuna varılabilir. Taban zeminini olarak %5'in altında ince dane (silt ve kil) içeren iri daneli (kum ve çakıl) zeminler en az problem oluşturan grup olarak kabul edilir. Drenajı sağlanmış ve uygun sıkıştırılmış iri daneli zeminlerin taban zeminini olarak performansı çoğu zaman yeterlidir. Fakat drenaj sisteminde problem bulunan hatlarda taban zeminini özellikle aşırı yağışlarla doymun hale gelebilir. Ayrıca aşırı yağışla birlikte yeraltı su seviyesinin yükselmesi de taban zeminini doymun hale getirebilir. Yüzeğe yakın ve doymun iri daneli zeminlerin çevrimsel yükler altında sıvılaşması ve stabilitesini kaybetmesi olasılığı hat performansı açısından ciddi bir risktir [23]. Şekil 3a.'da ve Şekil 3b.'de sırasıyla, optimum su içeriği (w_{opt}) ve bu su içeriğine karşılık gelen optimum suya doymunluk derecesi (S_{opt}) değerlerinden uzaklaşıldıkça esneklik modülünün büyük bir aralıkta değiştiği görülmektedir. M_R , w_{opt} değerinde ölçülen optimum esneklik modülü $M_{r,opt}$ ile karşılaştırıldığında ($M_R/M_{R,opt}$) su içeriğinin (w) ve beraberinde suya doymunluk derecesinin (S) artmasıyla önemli ölçüde azalmaktadır. w_{opt} ile sıkıştırılan taban zemininde su içeriğinin %3 kadar artması ile esneklik modülünün yarıya düştüğü Şekil 3a.'dan görülebilir. Esneme modülünde bu oranda bir azalış ile hat modülünün de yaklaşık olarak yarı değerine geleceği ve beraberinde ray, travers ve taban zeminini yüzeyinde sehimin 2,5 katına çıkabileceği gösterilmiştir [17].



Şekil 3. Zemin esneme modülünün değişimi a) Su içeriğine göre [24] b) Doymunluğa göre [25]

2.3. TDR yöntemi ve dielektrik karışım modeli

Kapalı devre çalışan bir radar devresine benzetilebilecek olan TDR, ilk olarak elektronik sistemlerde empedans süreksizliklerini belirlemek ve konumlandırmak için kullanılmıştır [26].

Tipik bir TDR cihazı yüksek frekanslı sinyal üretici, sinyalin örneklenmesi ve izlenmesi için osiloskop ve sinyalin iletiildiği iletim hattından oluşur [27]. Bazı ticari modellerde çok kanaldan ölçüm alımını, kablosuz iletişimi ve veri depolamayı mümkün kılan bileşenler de mevcuttur. Sinyal üreticiden iletim hattına ve sonrasında kılavuz (waveguide) üzerinden ölçüm alınan ortama aktarılan test sinyali ilerlerken empedans süreksizliği ile karşılaşırsa sinyalin bir bölümü o noktadan cihaza geri yansır. Yansıyan sinyaller ve yansıma süreleri sürekli olarak kaydedilir. Ölçüm tamamlandığında sinyalin ortamda ilerleme süresi (Δt) belirlenmiş olur. Bu süre yardımıyla ortamın dielektrik iletkenliği (ϵ_c) Denklem 8. ile elde edilir.

$$\epsilon_c = \left(\frac{c\Delta t}{2L} \right)^2 \quad (8)$$

Denklem 8.'de c ışık hızı ($2,998 \times 10^8$ m/s), L ise kılavuz uzunluğudur. Zemin ortamı dane, su ve hava bileşenlerini içeren kompozit bir yapıdır. Danelerin dielektrik iletkenliği mineralojik kökene göre 2 ile 6 arasında değişirken, hava için bu değer 1'dir. Suyun dielektrik iletkenliğinin 80 olması zeminin dielektrik iletkenliğinin büyük ölçüde su içeriğine bağlı olduğu anlamına gelir. Bu sebeple zeminin dielektrik iletkenliği ile hacimsel su içeriği (θ) arasında çok sayıda kalibrasyon denklemi elde edilmiştir. TDR ile zemin su içeriğinin belirlenmesi için kullanılan sistemin şematik gösterimi Şekil 4.'te verilmiştir.

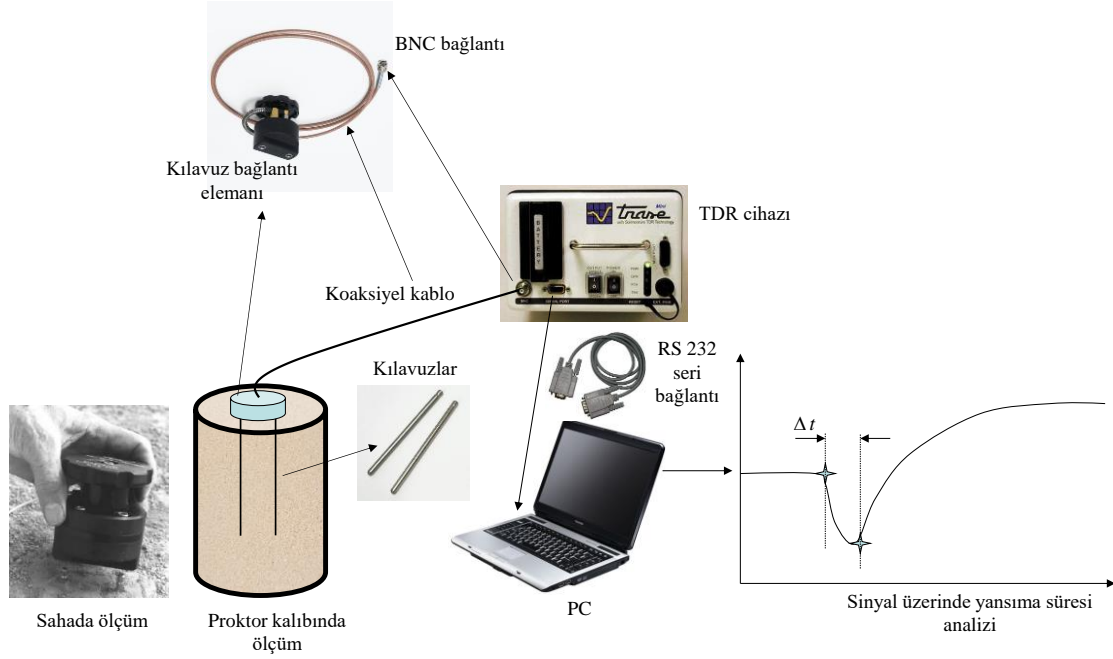
Kalibrasyon denklemleri içinde en yaygın olarak bilineni Topp vd. [28] tarafından geliştirilen ve Denklem 9. ile verilen denklemdir.

$$\theta = -0,053 + 0,0292\epsilon_c - 5,5 \times 10^{-4}\epsilon_c^2 + 4,3 \times 10^{-6}\epsilon_c^3 \quad (9)$$

Bir diğer kalibrasyon eşitliği Ledieu vd. [29] tarafından önerilmiş ve Denklem 10. ile verilmiştir.

$$\theta = 0,114\epsilon_c^{0,5} - 0,176 \quad (10)$$

Zeminin dielektrik iletkenliği su içeriğinin yanı sıra ikincil olarak kuru yoğunluk ve ince dane içeriğinden de etkilenmektedir. Literatürde kalibrasyon denkleminde kuru yoğunluğun ve ince dane içeriğinin (alternatif olarak adsorbe su içeriğinin) de yer aldığı çalışmalar mevcuttur. Fakat bir demiryolu hattında taban zemini su içeriği ölçümleri için her noktada bu parametrelerin belirlenmesi TDR yönteminin geleneksel yöntemlere oranla çok daha hızlı olma potansiyelini ortadan kaldıracaktır. Bu sebeple çalışmada dielektrik karışım modeli yardımıyla elde edilen kalibrasyon denkleminde sadece zeminin dielektrik iletkenliğine yer verilmiştir. Bu amaçla zemin kuru yoğunluğu ve danelerin özgül ağırlığı için veri setine dayandırılan nominal değerler kullanılmıştır.



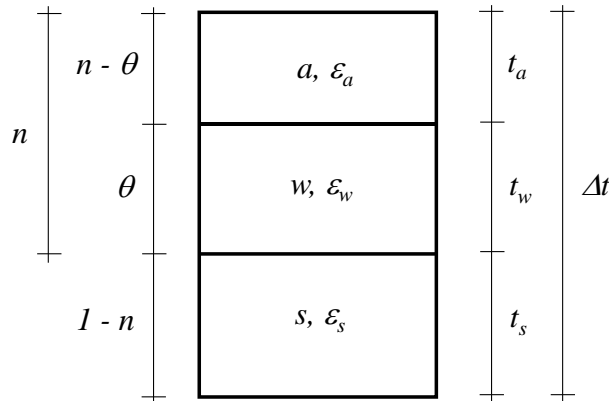
Şekil 4. Sahada ve laboratuvarında TDR ile su içeriği ölçümünün şematik gösterimi [10]

Dielektrik karışım modeli ile çok bileşenli malzemelerin dielektrik iletkenliği, her bir bileşenin hacimsel oranı ve dielektrik iletkenlikleri kullanılarak elde edilir. Üç bileşenli mükemmel tabakalanmış bir malzemenin dielektrik iletkenliği (ϵ_m) Denklem 11. ile hesaplanır.

$$\epsilon_m^\alpha = v_1 \epsilon_1^\alpha + v_2 \epsilon_2^\alpha + v_3 \epsilon_3^\alpha \quad (11)$$

Denklem 11.'de v_i bileşenlerin hacimsel oranını, ϵ_i bileşenlerin dielektrik iletkenliğini ifade eder. α ise uygulanan manyetik alana göre tabaka geometrisini yansıtan bir değişken olup -1 ile 1 arasında değişir [30]. Karışım modelini zemine uygulamadan önce Şekil 5.'te gösterilen ve toplam hacmin 1 birim kabul edildiği zemin faz diyagramını açıklamak faydalı olacaktır. Faz diyagramında porozite (n) ve θ sırasıyla boşluk ve su hacimlerinin toplam hacme oranıdır. Bu durumda hava ve dane hacimleri sırasıyla $(n-\theta)$ ve $(1-n)$ olmaktadır. t_a , t_w ve t_s sinyalin sırasıyla hava, su ve dane hacimlerinde geçirdiği sürelerdir.

Hava, su ve dane bileşenlerinin dielektrik iletkenlikleri (sırasıyla ϵ_a , ϵ_w ve ϵ_s) ve hacimsel oranları yardımıyla t_a , t_w , t_s ve Δt Denklem 12., Denklem 13., Denklem 14. ve Denklem 15. ile hesaplanabilir.



Şekil 5. Zemin faz diyagramı [10]

$$t_a = \frac{2(n - \theta)\sqrt{\varepsilon_a}}{c} \quad (12)$$

$$t_w = \frac{2\theta\sqrt{\varepsilon_w}}{c} \quad (13)$$

$$t_s = \frac{2(1 - n)\sqrt{\varepsilon_s}}{c} \quad (14)$$

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{\varepsilon_c}}{c} \quad (15)$$

Δt süresinin sinyalin tüm bileşenlerde ilerlediği toplam süre olduğu hatırlanacak olursa (Denklem 16.) üç bileşenli karışım modeline dayalı olarak zeminin dielektrik iletkenliği Denklem 17. ile verildiği şekilde elde edilmiş olunur.

$$t = t_a + t_w + t_s \quad (16)$$

$$\varepsilon_c^{0.5} = (n - \theta)\varepsilon_a^{0.5} + \theta\varepsilon_w^{0.5} + (1 - n)\varepsilon_s^{0.5} \quad (17)$$

Denklem 17.'den görülebileceği üzere α katsayısı zemin bileşenlerinin mükemmel tabakalanmış olduğu kabulü ile 0,5 alınabilir. Denklem 17. bilinen hacim ilişkileri yardımıyla yeniden düzenlendiğinde bu çalışmada önerilen kalibrasyon için Denklem 18. elde edilmiş olunur.

$$\varepsilon_c^{0.5} = (\varepsilon_s^{0.5} - \varepsilon_a^{0.5})\frac{\rho_d}{\rho_s} + (\varepsilon_w^{0.5} - \varepsilon_a^{0.5})\theta + \varepsilon_a^{0.5} \quad (18)$$

Denklem 18.'de ρ_s ve ρ_d sırasıyla danelerin yoğunluğu ve zeminin kuru yoğunluğudur. Dielektrik karışım modeli TDR ile zemin su içeriğinin belirlenmesi konusu dışında yer radarı ile demiryollarında balast kirlenmesinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda da kullanılmıştır. Artagan ve Borecky [31] çakıl, kum ve çakıl-kum karışımı ile kirlenmiş granit balastın dielektrik iletkenliğini 3 farklı deneysel yöntemle elde edip karışım modeli ile hesaplanan teorik değerlerle doğrulamışlardır. Çalışmada kirlenme derecesi ile dielektrik iletkenlik arasında anlamlı bir ilişki olduğu gösterilmiştir.

2.4. Veri seti ve performans göstergeleri

Arsoy vd. [32] TDR ile su içeriğinin belirlenmesinde yapay sinir ağlarının kullanılabilirliğini inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada 7 zemin sınıfı, 3 farklı enerji seviyesi ve 5 farklı hedef su içeriği ile toplam 105 numune sıkıştırılarak TDR ölçümleri yapılmıştır. Zeminlerin sınıflandırılması ASTM [33] prosedürü ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin referans su içeriği değerleri etüvde kurutma yöntemi ile belirlenmiştir. Önerilen kalibrasyon denkleminin kurulması ve sınanması için Arsoy vd. [32] tarafından gerçekleştirilen çalışmada elde edilen ve Tablo 1.'de özetlenen veriler kullanılmıştır. Her zemin sınıfında numunelerin yarısı raslantısal olarak kalibrasyon setine, diğer yarısı ise sınama setine ayrılmıştır.

Tablo 1. Kalibrasyon ve sınaama için kullanılan verilerin özeti [32]

| Zemin sınıfı | ρ_s (g/cm ³) | İnce dane (%) | ρ_d (g/cm ³) | θ (%) | ε_c | ε_s [9] |
|--------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|--------------|-----------------|---------------------|
| SW | 2,64 | 0,10 | 1,52-1,69 | 0,35-20,95 | 3,30-13,00 | 5,49 |
| SP | 2,44 | 2,30 | 1,66-1,87 | 0,80-24,42 | 4,10-15,60 | 5,17 |
| SM | 2,60 | 15,00 | 1,56-1,90 | 0,68-24,40 | 3,80-15,30 | 5,28 |
| SC | 2,62 | 15,00 | 1,60-1,75 | 0,81-20,82 | 3,60-12,80 | 5,17 |
| SW-SC | 2,67 | 7,00 | 1,65-1,84 | 0,94-22,94 | 3,80-12,70 | 5,32 |
| SW-SM | 2,62 | 10,00 | 1,61-1,80 | 0,41-21,86 | 3,60-13,90 | 5,41 |
| SP-SC | 2,62 | 7,00 | 1,72-1,95 | 0,86-24,47 | 4,20-15,50 | 5,11 |

Tablo 1.'de yer alan ε_s değerleri Denklem 18. ile geri hesaplama yardımıyla elde edilmiş ortalama değerlerdir. Geri hesaplamada ε_a ve ε_w sırasıyla 1 ve 80 kabul edilmiştir. Tablo 1.'de özetlenen veriler ışığında ortalama ρ_s , ρ_d ve ε_s değerleri sırasıyla 2,61 g/cm³, 1,73 g/cm³ ve 5,28 olarak hesaplanmış ve Denklem 18.'de bu değerler yerlerine konularak Denklem 19. elde edilmiş ve veri setine özel kalibrasyon denklemi olarak kullanılmıştır.

$$\theta = 0,126\varepsilon_c^{0,5} - 0,234 \quad (19)$$

Ayrıca Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] tarafından önerilen, sırasıyla Denklem 9. ve Denklem 10.'da verilen kalibrasyon denklemleri de kullanılan veri setine özgü olarak güncellenerek kullanılmıştır. Güncellenmiş kalibrasyon denklemleri "Topp vd. özel kalibrasyon" ve "Ledieu vd. özel kalibrasyon" olarak adlandırılarak sırasıyla Denklem 20. ve Denklem 21. ile verilmiştir.

$$\theta = -0,1553 + 0,0528\varepsilon_c - 2,6 \times 10^{-3}\varepsilon_c^2 + 5,0 \times 10^{-5}\varepsilon_c^3 \quad (20)$$

$$\theta = 0,112\varepsilon_c^{0,5} - 0,216 \quad (21)$$

Elde edilen kalibrasyon eşitliğinin sınaama setinde başarısını irdelemek için bazı performans göstergeleri kullanılmıştır. Ortalama hata kareleri karekökü (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve $p2$ -indeks seçilen göstergelerdir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (22)$$

$$MAE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|} \quad (23)$$

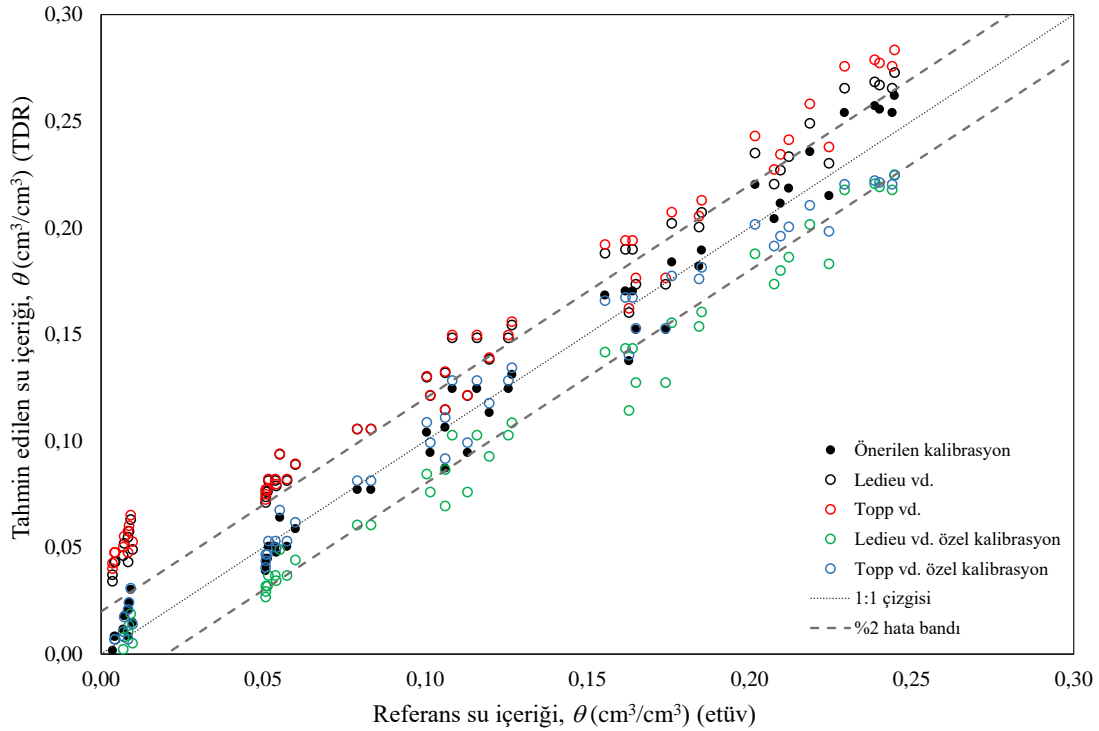
$$p2 - indeks = \frac{n2}{N} \quad (24)$$

N sınaama setindeki numunelerin sayısı, y_i etüvde kurutma ile elde edilen referans değer, \bar{y}_i ortalama y_i ve \hat{y}_i kalibrasyonla tahmin edilen değerdir. $n2$ ise tahmin edilen ile referans değer

arasındaki farkın $-0,02$ ile $+0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ arasında kaldığı numunelerin sayısıdır. 105 numunenin 52'si kalibrasyonda kullanıldığından N sınama seti için 53 olmuştur.

3. Bulgular

Şekil 6.'da farklı kalibrasyonlarla tahmin edilen su içeriği değerleri etüvden elde edilen referans değerlerle karşılaştırılmıştır. 1:1 çizgisi mükemmel eşleşmeyi temsil ederken %2 hata bandı, tahmin hatasının $-0,02$ ile $+0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ aralığında kaldığı alanı göstermektedir. Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] tarafından önerilen kalibrasyonların (sırasıyla Denklem 9. ve Denklem 10.) referans değerlerin oldukça üzerinde tahminler ürettiği görülmektedir. Bu denklemler kalibrasyon verisi ile yeniden düzenlendiğinde elde edilen özel kalibrasyon denklemleri tahminlerin başarısını önemli ölçüde artırmıştır. Dielektrik karışım modeline dayanan ve bu çalışmada önerilen kalibrasyon ise çok büyük oranda %2 hata bandı içinde kalarak RMSE, MAE ve $p2$ -indeks değerleri açısından en başarılı kalibrasyon olmuştur. Karşılaştırılan kalibrasyonların performans göstergeleri Tablo 2.'de özetlenmiştir.



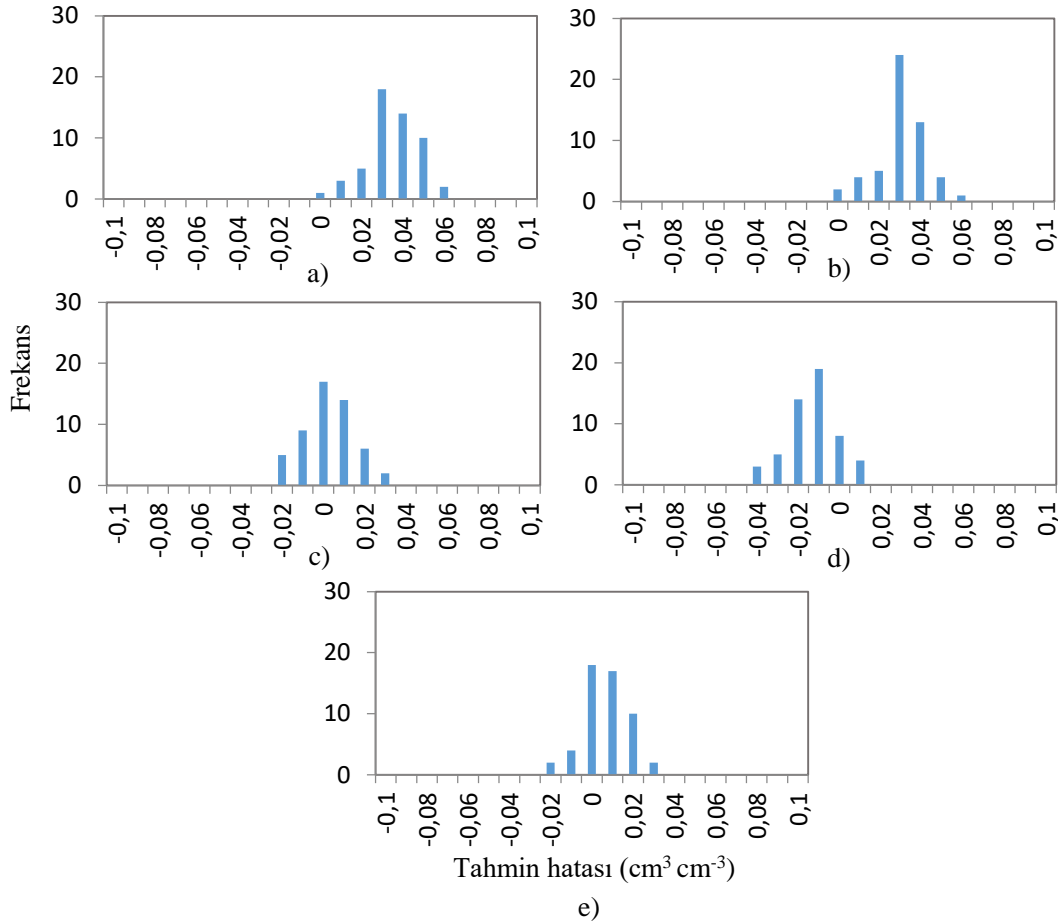
Şekil 6. Farklı kalibrasyonlar ile tahmin edilen değerlerin referans su içeriği ile karşılaştırılması

Tablo 2.'den görülebileceği üzere zemin grubuna özel bir kalibrasyon uygulanmadığı sürece Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] kalibrasyonlarının TDR ile su içeriği tahmininde kullanılması mümkün değildir. Hatta Ledieu vd. özel kalibrasyon modeli de yeterli doğruluğu sağlamamaktadır. $p2$ -indeks yardımıyla bir değerlendirme yapılacak olursa Topp vd. özel kalibrasyonu ve bu çalışmada önerilen kalibrasyon diğer kalibrasyonlara göre çok daha başarılı olmuştur. Önerilen kalibrasyon çok geniş bir su içeriği aralığında %2 hata bandında kalacak şekilde numunelerin %93'ünde başarılı olmuştur.

Tablo 2. Farklı kalibrasyonlar için performans göstergeleri

| Kalibrasyon | RMSE (cm^3/cm^3) | MAE (cm^3/cm^3) | $p2$ -indeks |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| Topp vd. [28] (Denklem 9.) | 0,033 | 0,031 | 0,17 |
| Ledieu vd. [29] (Denklem 10.) | 0,029 | 0,027 | 0,21 |
| Topp vd. özel kalibrasyon (Denklem 20.) | 0,012 | 0,010 | 0,86 |
| Ledieu vd. özel kalibrasyon (Denklem 21.) | 0,022 | 0,019 | 0,58 |
| Önerilen kalibrasyon (Denklem 19.) | 0,011 | 0,009 | 0,93 |

Şekil 7.'de değerlendirilen kalibrasyonların tahmin hatası histogramları yer almaktadır. Frekans değeri bir tahmin hatası aralığında kalan numune sayısını ifade etmektedir. Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] kalibrasyonlarının su içeriğini tüm numunelerde referans değer üzerinde tahmin ettiği sırasıyla Şekil 7a. ve Şekil 7b.'de görülmektedir. Şekil 7c.'de verilen Topp vd. özel kalibrasyonunun hata dağılımı, uygun görünmekle birlikte %2 hata bandının dışında kalan numune sayısı 7 olmuştur. Ledieu vd. özel kalibrasyonu Şekil 7d.'den görülebileceği üzere büyük ölçüde referans değer altında tahmin vermektedir. Son olarak Şekil 7e.'de bu çalışmada önerilen kalibrasyonun hata dağılımının yeterli ölçüde dar ve sifıra oldukça yakın merkezlendiği görülmektedir. %2 hata bandının dışında kalan numune sayısı sadece 4 olmuştur.



Şekil 7. Tahmin hatası histogramları a) Topp vd. [28] b) Ledieu vd. [29] c) Topp vd. özel kalibrasyon d) Ledieu vd. özel kalibrasyon e) Önerilen kalibrasyon

4. Sonuç

Demiryollarında yenileme ve bakım çalışmalarının uygun planlanması için hat performansının en doğru şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirmede en sık başvurulan parametrelerden birisi hat modülüdür. Hat modülü farklı üstyapı ve altyapı elemanlarının etkilediği bir parametre olmakla birlikte taban zemini esneklik modülü en etkin faktör olarak öne çıkmaktadır. Zeminin esneklik modülü ise su içeriğinin bir fonksiyonudur. Bu sebeple hat modülü yağış rejimine bağlı olarak mevsimsel farklılıklar gösterebilir. Hat performansının değerlendirilmesinde bu durumu göz önünde bulundurabilmek için taban zemini malzemesinin esneklik modülünün su içeriği ile ilişkisi ortaya çıkarılıp, hat boyunca taban zemini su içeriğinin periyodik olarak ölçülmesi uygun bir yaklaşım olacaktır.

Zaman Tanım Alanında Yansıma Yöntemi (Time Domain Reflectometry, TDR) çok kanaldan gerçek zamanlı ve uzaktan ölçüm (real-time and remote monitoring) yapabilme olanaklarıyla demiryolu hatlarında taban zemininde periyodik su içeriği ölçümleri için büyük potansiyel barındırmaktadır. Bu çalışmada TDR ile ölçülen zemin dielektrik iletkenliğinin kullanıldığı ve diğer çalışmalardan farklı olarak dielektrik karışım modeline dayandırılan bir kalibrasyon önerilmiştir. Önerilen kalibrasyon yine diğer çalışmalardan farklı olarak bir zemin sınıfını değil, taban zemini olarak kullanılabilir 7 farklı zemin sınıfını kapsamaktadır. Kalibrasyonun tahmin yeteneği etüvden elde edilen referans su içeriği değerleri kullanılarak RMSE, MAE, $p2$ -indeks ve tahmin hatası dağılımı gibi performans göstergeleri yardımıyla farklı kalibrasyonlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yardımıyla elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] kalibrasyonları çalışmada kullanılan zeminlerde referans değer için çok üstünde tahminler vermiştir. Söz konusu kalibrasyonların ortalama RMSE ve MAE değerleri sırasıyla 0,031 ve 0,029 cm^3/cm^3 olurken $p2$ -indeks 0,19 gibi düşük bir değer almıştır. Bu durum TDR ile zemin su içeriğinin ölçülmesi için mutlaka özel kalibrasyona ihtiyaç duyulduğuna işaret etmektedir. Fakat bir demiryolu hattında taban zemini malzemesinin hat boyunca aynı dane çapı dağılımına sahip olması mümkün olmadığından zemine özel kalibrasyon yerine benzer dane çapı dağılımı gösteren zeminleri kapsayan bir kalibrasyon elde etmek daha uygulanabilir bir yaklaşımdır.
- Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] tarafından önerilen kalibrasyonların bu çalışmada kullanılan zemin grubu için sırasıyla polinom ve doğrusal regresyon ile güncellenmesi kalibrasyonların tahmin başarısını artırmıştır. Topp vd. özel kalibrasyonu ile RMSE ve MAE sırasıyla 0,012 ve 0,010 cm^3/cm^3 olurken $p2$ -indeks 0,86'ya yükselmiştir.
- Bu çalışmada önerilen kalibrasyon regresyon modelleri yerine dielektrik karışım modeli ile elde edilmiştir. Önerilen kalibrasyon tüm performans göstergelerinde daha üstün olmuştur. Önerilen kalibrasyonun RMSE ve MAE değerleri sırasıyla 0,011 ve 0,009 cm^3/cm^3 olurken $p2$ -indeks 0,93 gibi oldukça yüksek bir değer almıştır. Ayrıca tahmin hatası dağılımının oldukça dar ve sifıra yakın merkezlenmiş olduğu görülmektedir.
- Geoteknik mühendisliği penceresinden bakıldığında zemin su içeriğinin yaklaşık %1,0 ortalama sapma ile gerçek zamanlı ve uzaktan ölçülebiliyor olması oldukça yeterli bir performanstır. Bu bağlamda Türkiye'de kullanımı son derece sınırlı olan TDR, demiryolu hatlarında taban zemini su içeriğinin periyodik ölçümleri için yüksek doğruluk sağlayan hızlı ve tahribatsız bir ölçüm yöntemi olarak önerilmektedir.
- Bu çalışmada önerilen kalibrasyon literatürden elde edilen ve iri daneli (ince dane oranı en fazla %15) olarak sınıflandırılabilir zeminler üzerinde gerçekleştirilen TDR

ölçümlerine dayanmaktadır. Bu nedenle farklı zeminler için yeni bir kalibrasyon çalışması önerilmektedir.

- Zeminlerin su içeriğinin ölçülmesi için TDR yöntemini kullanan çok sayıda marka ve modelde cihaz mevcuttur. Bu cihazların elektronik altyapısı çözünürlüğü belirlemektedir. Bu sebeple her marka ve modelle aynı tahmin yeteneği beklenmemelidir. Su içeriğinin yanı sıra kuru yoğunluğun da belirlenmek istendiği çalışmalarda yansıyan dalga formunu kaydedebilen cihazlar tercih edilmelidir.
- TDR ile demiryolu taban zemininde su içeriğinin belirlenmesi konusunda karşılaşılabilecek en önemli zorluk, ölçüm kılavuzlarının gerekli derinliğe önceden yerleştirilmiş olması gerekliliğidir. Yerleştirme işlemi demiryolu hattının yapım ya da bakım aşamalarından birinde yapılırsa bu zorluk ortadan kalkmış olur.

Kaynakça

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022
- [2] Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER), “Activity Report 2021,” 2022. [Online]. Available: https://www.cer.be/images/publications/positions/CER_Activity_Report_2021.pdf [Accessed August 12, 2023]
- [3] M. J. Roshan, A. S. A. Rashid, N. A. Wahab, S. Tamassoki, S. N. Jusoh, M. A. Hezmi, N. N. N. Daud, N. M. Apandi, M. Azmi, “Improved methods to prevent railway embankment failure and subgrade degradation: A review,” *Transportation Geotechnics*, vol. 37, no. 100834, 2022, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100834
- [4] J. Campos, G. Rus, “Some stylized facts about high-speed rail: a review of HSR experiences around the World,” *Transport Policy*, vol. 16, no. 1, pp. 19–28, 2009, doi: 10.1016/j.tranpol.2009.02.008
- [5] B. Indraratna, S. Nimbalkar, “Stress-strain degradation response of railway ballast stabilized with geosynthetics,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 684–700, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000758.
- [6] Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER), “Track Maintenance and Renewal,” 2012. [Online]. Available: https://www.cer.be/images/publications/positions/CER_Activity_Report_2021.pdf [Accessed August 14, 2023]
- [7] S. S. Artagan, L. B. Ciampoli, F. D’Amico, A. Calvi, F. Tosti, “Non-destructive assessment and health monitoring of railway infrastructures,” *Surveys in Geophysics*, vol. 41, pp. 447–483, 2020, doi:10.1007/s10712-019-09544-w
- [8] S. Arsoy, M. Ozgur, E. Keskin, C. Yilmaz, “Usability of calcium carbide gas pressure method in hydrological sciences,” *Journal of Hydrology*, vol. 503, pp. 67–76, 2013, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.08.044
- [9] K. Noborio, “Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 31, no. 3, pp. 213–237, 2001, doi: 10.1016/S0168-1699(00)00184-8
- [10] M. Ozgur, “Development and validation of a degree of saturation prediction model using time domain reflectometry for compaction control,” *Transportation Geotechnics*, vol. 42, no. 101062, 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2023.101062
- [11] G. Curioni, D. N. Chapman, A. C. Royal, N. Metje, B. Dashwood, D. A. Gunn, C. M. Inauen, J. E. Chambers, P. I. Meldrum, P. B. Wilkinson, R. T. Swift, H. J. Reeves, “Time domain reflectometry (TDR) potential for soil condition monitoring of geotechnical assets,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 56, no. 7, pp. 942–955, 2019, doi: 10.1139/cgj-2017-0618
- [12] J. Pies, L. Mocova, “Application of TDR test probe for determination of moisture changes of railway substructure materials,” *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 74–81, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.013
- [13] L. Izvolt, P. Dobes, M. Mear, “Calibration of TDR test probes for measuring moisture changes in the construction layers of the railway line,” *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 1057–1063, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.848

- [14] L. Izvolt, P. Dobes, “Monitoring of moisture changes in the construction layers of the railway substructure body and its subgrade,” *Procedia Engineering*, vol.161, pp. 1049–1056, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.847
- [15] A. Alsabhan, D. Fratta, B. J. Warren, J. M. Tinjum, T. B. Edil, “Using Time Domain Reflectometry to determine depth of fouling and fouling type in railway track substructure,” *Geotechnical Testing Journal*, vol. 42, no. 1, pp. 156–179, 2019, doi:10.1520/GTJ20170305
- [16] J. Liu, J. Xiao, “Experimental study on the stability of railroad silt subgrade with increasing train speed,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.136, no. 6, pp. 833–841, 2009, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.00002
- [17] E. T. Selig, D. Li, “Track modulus: Its meaning and factors influencing it,” *Transportation Research Record*, vol. 1470, pp. 47–54, 1994.
- [18] E. Balcı, N. Bezgin, “Hat esneme direncinin hat performansı üzerindeki etkileri,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 11, pp. 75–85, 2020.
- [19] Y. Tong, G. Liu, K. Yousefian, G. Jing, “Track vertical stiffness–value, measurement methods, effective parameters and challenges: A review,” *Transportation Geotechnics*, vol. 37, no. 100833, 2022, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100833
- [20] C. Shi, Y. Zhou, L. Xu, X. Zhang, Y. Guo, “A critical review on the vertical stiffness irregularity of railway ballasted track,” *Construction and Building Materials*, vol. 400, no. 132715, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132715
- [21] E. T. Selig, J. M. Waters. *Track Geotechnology and Substructure Management*. London, UK: Thomas Telford, 1994.
- [22] B. Indraratna, D. J. Armaghani, A. G. Correia, H. Hunt, T. Ngo, “Prediction of resilient modulus of ballast under cyclic loading using machine learning techniques,” *Transportation Geotechnics*, vol. 38, no. 100895, 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100895
- [23] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann, S. Chrismer. *Substructure from: Railway Geotechnics*. Florida, USA: CRC Press, 2016.
- [24] L. Zhang, X. Jiang, Z. Li, Z. Yang, G. Liu, Z. Dong, Y. Qiu, “Influence of the attenuation of subgrade elastic modulus caused by precipitation on ballasted track structure,” *Construction and Building Materials*, vol. 352, no. 128971, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128971
- [25] K. Gaspard, Z. Zhang, G. Gautreau, K. Hanifa, C. E. Zapata, M. Abufarsakh, “Modeling the resilient modulus variation of in situ soils due to seasonal moisture content variations,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, no. 1793601, 2019, doi: 10.1155/2019/1793601
- [26] M. Ozgur, S. Arsoy, “A practical modification to coaxial cables as damage sensor with TDR in obscured structural members and RC piles,” *Structural Monitoring and Maintenance*, vol. 10, no. 2, pp. 133–154, 2023, doi: 10.12989/smm.2023.10.2.133
- [27] M. W. Lin, J. Thaduri, “Structural deflection monitoring using an embedded ETDR distributed strain sensor,” *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, vol. 17, no. 5, pp. 423–430, 2006, doi: 10.1177/1045389X06058631
- [28] G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan, “Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines,” *Water Resources Research*, vol. 16, no. 3, pp. 574–582, 1980, doi: 10.1029/WR016i003p00574
- [29] J. Ledieu, P. D. Ridder, P. D. Clerck, S. Dautrebande, “A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry,” *Journal of Hydrology*, vol. 88, no. 3–4, pp.319–328, 1986, doi: 10.1016/0022-1694(86)90097-1
- [30] M. Ansoult, L. W. D. Backer, M. Declercq, “Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 49, no. 1, pp. 47–50, 1985, doi: 10.2136/SSSAJ1985.03615995004900010009X
- [31] S. S. Artagan, V. Borecky, “Advances in the nondestructive condition assessment of railway ballast: A focus on GPR,” *NDT & E International*, vol. 115, no. 102290, 2020, doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102290
- [32] S. Arsoy, M. Ozgur, E. Keskin, C. Yilmaz, “Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils,” *Geoderma*, vol. 195–196, pp. 133–144, 2013, doi: 10.1016/j.geoderma.2012.11.019
- [33] *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM D2487, 2017

Özgeçmiş**Mehmet ÖZGÜR**

1978 yılında Antakya'da doğdu. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 2001, 2003 ve 2013 yıllarında tamamladı. Halen Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında, zemin dinamiği, zemin-yapı etkileşimi, kazık hasarları ile zemin su içeriğinin TDR yöntemiyle belirlenmesi ve yapay sınırları bulunmaktadır.

E-Posta: mehmetozgur@comu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.



Demiryolu Üstyapı Tasarımlarında Geogrid Kullanımının Sonlu Elemanlar Modellemesi ile Araştırılması

Hüseyin AKBULUT¹, Buğra CANPOLAT*²

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

² TCDD Genel Müdürlüğü, Yapım Dairesi Başk., 3. Grup Müd., Afyonkarahisar, Türkiye

*bugracanpolat@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 13.10.2023, Kabul/Accepted: 15.11.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Demiryollarının, hızla artan trafiğe bağlı olarak, ortaya çıkan ulaşım sorununun çözümünde ulaştırma altyapılarının en önemli parametresi haline geldiği görülmektedir. Artan bu yoğun yük ve yolcu taşıma talebini karşılamak için, demiryollarında yolun hizmet ömrünü uzatmak, taşıma kapasitesini arttırmak, bakım döngülerini uzatmak, kullanılacak dolgu malzemesi ve altbalast tabakası için tabaka kalınlıklarını azaltmak, inşaat süresini kısaltmak ve maliyetlerin minimize edilmesi amacıyla alternatif çözümler aranmaktadır. Bu tür mühendislik problemlerin çözümünde genellikle deneysel, analitik ve sayısal yöntemlere başvurulmaktadır. Yapılan bu çalışmada sayısal bir yöntem olan ANSYS sonlu elemanlar metodu kullanılarak altbalast tabakası ile taban zemini arasına yerleştirilen tek sıra geogrid malzemenin analizler sonucu yapıya olan muhtemel etkileri değerlendirilmiştir. Ülkemiz standartlarına uygun olarak tasarımı yapılan bu demiryolu üstyapısı; geogrid malzeme kullanılmadan ve geogrid malzeme kullanılarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Ayrıca tasarımda farklı dingil yükü (120 kN, 225 kN, 350 kN), farklı altbalast tabaka kalınlığı (150 mm, 200 mm) ve farklı özelliklere sahip taban zemini türleri kullanılmış; toplamda 96 adet analiz kombinasyonu oluşturulmuştur. Yapılan analiz sonuçları; düşey yönlü yer değiştirme ve gerilme değeri grafikleri yardımıyla değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmada, demiryolu üstyapı tasarımında geogrid malzeme kullanımı ile altbalast tabaka kalınlığının azaltılabileceği, buna bağlı olarak daha ekonomik ve yük taşıma kabiliyeti daha yüksek bir üstyapının oluşturulmasına imkân vereceği anlaşılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Geogrid, Sonlu elemanlar metodu, ANSYS, Altbalast, Taban zemini

Investigation of the Use of Geogrid in Railway Pavement Designs with Finite Element Modeling

Abstract: It is accepted that railway is the most important parameter of transportation infrastructures in solving the transportation obstacles that arises due to rapidly increasing traffic in almost every country. In order to meet the increasing intense freight and passenger transportation demand, alternative solutions have been sought in railways not only extending the service life and bearing capacity of the pavement, but also, reducing the layer thickness of sub-ballast layer of the filling material used and minimize the construction costs. In order to meet all these demand, experimental, analytical and numerical methods have been generally used by engineers and academic. In this study, the possible effects of a single row geogrid material placed between the sub-ballast layer and the subgrade on the structure were analyzed using the ANSYS finite element method, which is a numerical method. This railway pavement, designed in accordance with our country's standard procedures; It was analyzed separately with and without using geogrid material within the layers. In addition, different axle loads, different sub-ballast layer thicknesses and subgrade types with different properties were used in the design set up procedure; A total of 96 analysis combinations were created. Analysis results; It was evaluated with the help of vertical displacement and stress value graphs. The study shows that, the use of geogrid material in railway pavement design will enable the reduction of sub-ballast layer and, the leading of a more economical and higher load-bearing pavement layers.

Keywords: Railway, Geogrid, Finite element method, ANSYS, Sub-ballast, Subgrade

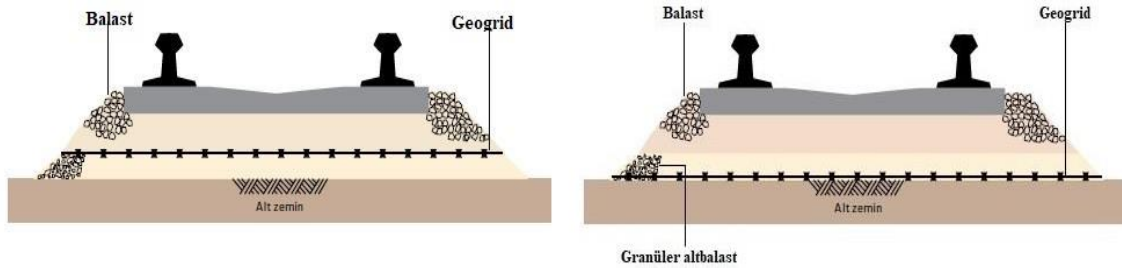
Atıf için/Cite as: H. Akbulut, B. Canpolat "Demiryolu üstyapı tasarımlarında geogrid kullanımının sonlu elemanlar modellemesi ile araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 83-95, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1375402

1. Giriş

Demiryolu ulaştırma sistemi, karayollarının ardından bir ülkenin altyapı gelişiminin önemli bir parçasıdır. Bu nedenle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler tarafından demiryolu üzerinde yük ve yolcu taşımacılığına ayrıca önem verilmiş; nüfus artışı, hızlı kentleşme, artan yakıt fiyatları ve trafik sıkışıklığı gibi problemler neticesinde oluşan talebin karşılanabilmesi amacıyla da mevcut yolların geliştirilmesi ve yeni yolların yapımına hız verilmiştir. Özellikle yeni yolların yapım aşamasında; yüksek maliyetlerin yanı sıra, çok fazla miktarda granüler malzeme kullanımı gerekmektedir. Bunun sonucu olarak; ülkemiz ve dünyada doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. Bu nedenle, alternatif üstyapı inşaat malzemeleri ile granüler malzemenin daha az miktarlarını içeren tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve benimsenmesi önem arz etmektedir [1, 2].

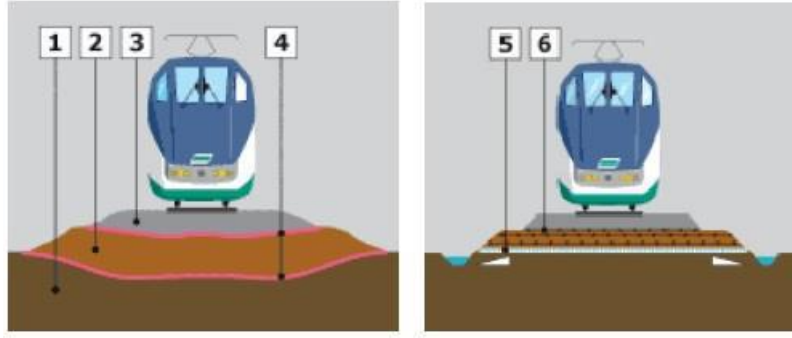
Demiryolu üstyapısını güçlendirmek için geosentetik malzemelerin kullanımı, doğal kaynakları verimli kullanmak, zayıf zeminleri güçlendirmek, üstyapının hizmet ömrünü iyileştirmek ve uzatmak, belirli bir hizmet ömrü için tabaka kalınlıklarını azaltmak ve yapının dayanımını arttırmak adına alternatif ve umut vaat eden bir yöntemdir [3, 4]. 1970'li yıllarda 5-6 farklı geosentetik malzeme seçeneği mevcut iken; günümüzde 600'den fazla geosentetik malzeme türü piyasada varlık göstermektedir [5].

Geogrid malzemelerin demiryolu üstyapı sistemlerinde kullanımı ile özellikle geosentetik malzemelerin iki temel işlevi olan ayırma ve güçlendirme fonksiyonları yerine getirilmektedir. Geogrid kullanımı ile üstyapı mühendislik özelliklerinin mekanik olarak iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi birinci öncelik olurken; geogrid malzemelerin boşluklu yapısı gereği ayırma fonksiyonu ikincil işlev olarak karşımıza çıkmaktadır [4].



Şekil 1. Demiryolu balast ve altbalast tabakalarında geogrid kullanımı [7]

Demiryolu üstyapı tasarımlarında geogrid malzemelerin Şekil 1.'de görüldüğü gibi balast ve/veya altbalast tabakalarında olmak üzere iki farklı kullanım yeri mevcuttur [6]. Balast tabakasında kullanıldığında balast oturma oranlarının azaltılması, oluşturulan balast tabakasının birbirleriyle kenetlenmesi sonucu balast malzemesinde oluşabilecek deformasyonların azaltılması, hattın geometrisinin korunması ve bakım döngülerinin uzatılması ile bakım maliyetlerinin azaltılması hedeflenmektedir [7-9]. Altbalast tabakasında kullanılması durumunda Şekil 2.'de olduğu gibi; dinamik ve statik yüklerin daha geniş alana yayılması sağlanarak düşey gerilmenin azaltılması ve taşıma kapasitesinin artırılması, altbalast tabaka kalınlığının azaltılması ve zayıf taban zeminine sahip tasarımlarda deformasyonların azaltılması istenmektedir [10-13].



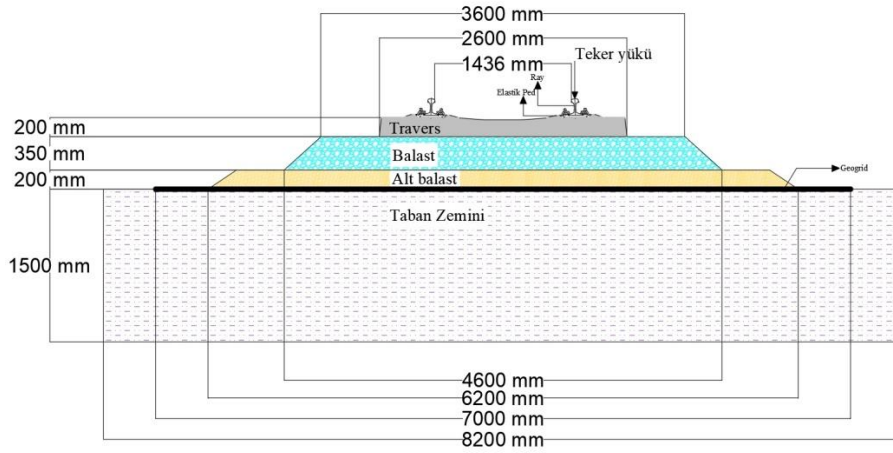
Şekil 2. Demiryolu inşaatlarında geogrid kullanımı 1) Zayıf zemin 2) Yol dolgusu 3) Balast tabakası 4) Deformasyon profili 5) Geokompozit 6) Geogrid malzemesi [14]

Yapılan literatür araştırması ve irdelenen saha uygulamaları neticesinde; geogrid malzeme kullanımına özellikle Avrupa ülkelerinde sıkça yer verildiği görülmektedir. Geogrid malzemesinin kolay kurulabilir olması ve maliyetlerinin düşük olması geniş kabul görmesinde öne çıkan faktörlerdir. 1988 yılında İngiltere'nin Shirlend bölgesindeki demiryolu güzergahına uygulanan geogrid malzemesinden 1997 ve 2006 yıllarında numuneler alınmıştır. Yapılan testler sonucunda geogrid malzemenin hala çekme dayanımı özelliklerini koruduğu ve kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir. Bu saha uygulaması neticesinde geogrid malzemelerin 20 yıldan fazla hizmet ömrünün olduğu görülmektedir [7, 14]. Hussaini vd. [15] yapmış olduğu çalışmada ise yol oturmaları açısından sorun teşkil eden bir demiryolu güzergahında geogrid malzeme kullanımı ile hız sınırlarının arttırılabileceğinin yanı sıra, zaman içerisinde yanal ve düşey yer değiştirme değerlerinin de önemli oranlarda azaldığını belirtmiştir. Son olarak Sadeghi vd. [16] geogrid ile güçlendirilen bir demiryolu güzergahında balast tabakasının kum ile kirletilmesi sonucundaki etkileri gözlemlemiş ve balast kirliliğinin %24'ü aşması durumunda geogrid takviyesinin etkisini kaybettiğini belirtmiştir.

Yapılan bu çalışmada, ülkemiz demiryollarında kullanılmakta olan UIC60 tipi ray, elastik ped, B70 tipi travers ve analiz kuvvetlerinin uygulanacağı 500 mm yarıçaplı bir demiryolu taşına ait tekerin üç boyutlu modelleri ANSYS Spaceclaim uygulaması yardımıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan nihai demiryolu üstyapısında; altbalast tabakası ile taban zemini arasında yerleştirilen tek sıra geogrid malzemenin etkileri ANSYS sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Analizlerde, farklı dingil yükü (120 kN, 225 kN, 350 kN), farklı altbalast tabaka kalınlığı (150 mm, 200 mm) ve farklı özelliklere sahip taban zemini kullanılarak 96 adet analiz yapılmış, geogrid malzemesinin farklı kesitler üzerindeki etkileri düşey yönlü gerilme ve yer değiştirme grafikleri yardımıyla değerlendirilmiştir. Geogrid malzemenin altbalast tabakası ile taban zemini arasında kullanılması ile taban zeminindeki deformasyonları ve gerilmeleri azaltacağı, yol güvenliğinin artmasında etkili olacağı, altbalast tabaka kalınlığının azaltılmasına yardımcı olarak granüler malzemeye olan ihtiyacı da azaltacağı sonuçlarına ulaşılmıştır.

2. Metot

Sonlu elemanlar metodu esnek üstyapıların analizi için uygun yapısal yöntemlerden biridir. Karmaşık geometrilerin sanal ortamda test edilmesi sebebiyle ekonomik olmasına da olanak sağlayan bu yöntem statik ve dinamik problemlerin analizinde sıklıkla tercih edilmektedir. Yapılan çalışmada ANSYS sonlu elemanlar metodu tercih edilmiştir. ANSYS programı yardımıyla oluşturulan modelin üç boyutlu geometrisinde; üstyapı elemanlarını oluşturan 500 mm yarıçaplı tren tekeri, UIC60 E1 tipi ray, B70 tipi travers ve elastik ped (plastik selet) TCDD ve UIC standartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Tasarım ölçülerine ait autocad çizimine Şekil 3.'te yer verilmiştir.



Şekil 3. Analiz için modellenen demiryolu kesitine ait autocad çizimi

Yapılan çalışmada farklı dingil yükleri belirlenmiş olması sebebiyle analiz sürelerinin daha uzun olduğu dinamik analiz yerine, statik analiz tercih edilmiştir. Kullanılan malzemelere ait ve analiz için gerekli olan elastisite modülü ve poisson oranı değerleri öncelikli olarak yapılan literatür araştırmasına göre belirlenmiş, Tablo 1.'de buna yer verilmiştir. Elastisite modülü, uygulanan kuvvete maruz kalan malzemelerin meydana gelen şekil değiştirmelere karşı koyması olarak tanımlanmakta olup; her malzeme için karakteristik olarak farklılık göstermektedir. Demiryolu üstyapı tasarımında geogrid malzemenin performansa etkisini araştırmak amacıyla analizlerde birbirinden farklı elastisite modülüne sahip üç geogrid malzeme kullanılmıştır. Kullanılan geogrid malzemeye ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 2.'de belirtilmiştir. Tasarımda tercih edilen geogrid malzemenin fiziksel özellikleri Polatlı – Afyon Yüksek Hızlı Tren projesinin 400 metrelik kesiminde kullanılan geogrid malzemeye benzer özellikte seçilmiştir. Mekanik özellikleri ise yapılan literatür ve piyasa araştırması neticesinde belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulan modelin farklı dingil yükleri altında ne tür tepki vereceği de değerlendirilmek amacıyla yolcu vagonu, YHT-yük vagonu ve ağır yük vagonunu temsil edecek şekilde üç farklı dingil yükü altında analizler tekrarlanmıştır. Dingil yüklerine ait veriler ise Tablo 3.'te belirtilmiştir.

Tablo 1. Modellemede kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler

| Malzeme | Elastisite Modülü (MPa) | Poisson Oranı (ν) | Kaynak |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|--------|
| Tren teker | 205000 | 0,30 | [17] |
| Ray (UIC 60) | 210000 | 0,30 | [18] |
| Elastik ped | 1000 | 0,45 | [19] |
| Travers | 25500 | 0,20 | [19] |
| Balast | 200 | 0,25 | [19] |
| Altbalast | 115 | 0,35 | [19] |
| Zemin 1 (Kötü) | 35 | 0,40 | [19] |
| Zemin 2 (Orta) | 80 | 0,40 | [19] |
| Zemin 3 (İyi) | 140 | 0,40 | [19] |
| Zemin 4 (Çok iyi) | 200 | 0,40 | [19] |

Tablo 2. Modellemede kullanılan geogride ait mekanik özellikler

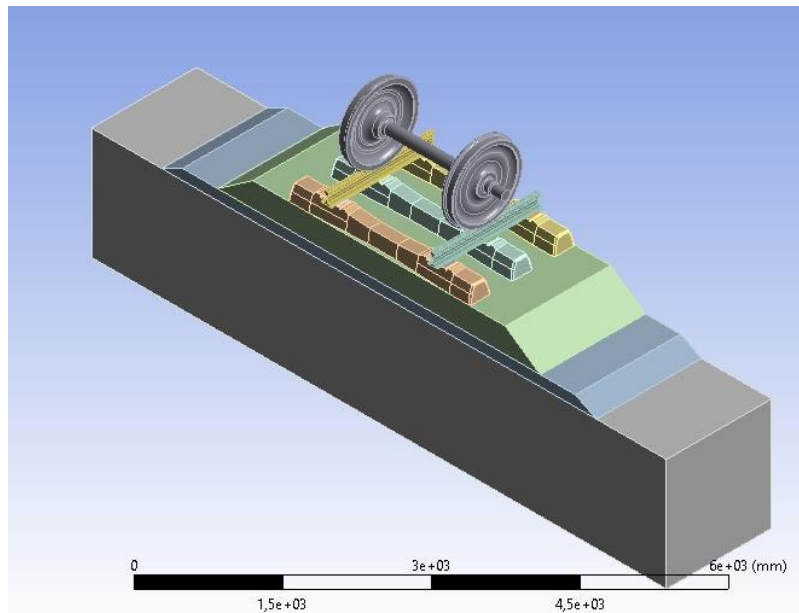
| Geogrid Malzeme | Göz Açıklığı (mm) | Genişliği (mm) | Kalınlığı (mm) | Elastisite Modülü (MPa) | Poisson Oranı (v) | Kaynak |
|-----------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------|--------|
| Geogrid 1 | 40x910 | 100/90 | 4 | 760 | 0,30 | [20] |
| Geogrid 2 | 40x910 | 100/90 | 4 | 4230 | 0,30 | [21] |
| Geogrid 3 | 40x910 | 100/90 | 4 | 5700 | 0,30 | [22] |

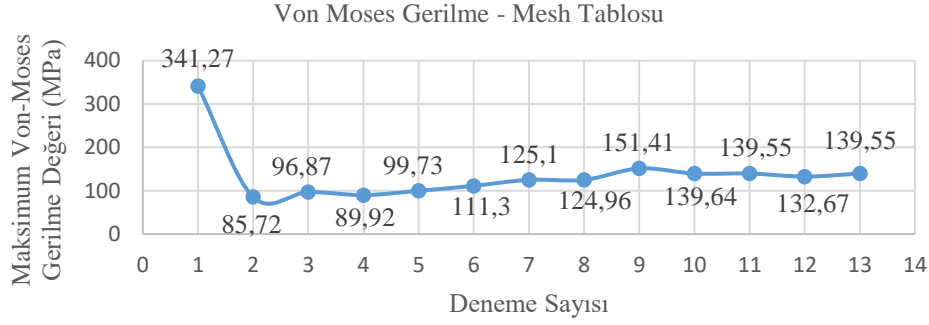
Tablo 3. Modellemede kullanılan dingil yükleri

| Dingil yükü (kN) | Demiryolu taşıtı |
|------------------|-------------------|
| 120 | Yolcu vagonu |
| 225 | YHT ve yük vagonu |
| 350 | Ağır yük vagonu |

Analiz için oluşturulan tasarıma ait verilerin toparlanması ile analiz kombinasyonu oluşturulmuş ve toplamda 96 adet analiz yapılması gerektiği belirlenmiştir. ANSYS Spaceclaim uygulaması kullanılarak tasarımın modeli 3 boyutlu olarak oluşturulmuş ve analiz edilmek üzere ANSYS Workbench programına aktarılmıştır. Analiz edilen modelin görseli Şekil 4.'te görüldüğü gibidir.

ANSYS Workbench programında analizlere başlamadan; değerlendirmeye alınan 13 farklı mesh kombinasyonu arasından optimum mesh aralığı tespit edilmiştir. Belirlenen sonlu elemanlar ağı tüm analizlerde aynı şekilde uygulanmıştır. Sonlu elemanlar ağının belirlenmesi amacıyla Von-mises gerilme değerlerinden faydalanılarak oluşturulan mesh optimizasyon grafiği Şekil 5.'te verilmiştir. Sonlu elemanlar ağı için optimum değer belirlenmesi; oluşturulan ağın analiz sonuçlarını direkt olarak etkilemesi sebebiyle önem arz etmektedir. Elemanlar için küçük boyutlu sonlu elemanlar ağının atanması doğru sonuca yaklaşmamızı sağlarken, analiz sürelerinin de uzamasına neden olmaktadır. Bu çalışmaya ait tasarım için oluşturulan optimum sonlu elemanlar ağı değerleri; taban zemini için 60 mm, balast ve altbalast tabakası için 50 mm, traversler için 40 mm, teker-ray-geogrid için ise 25 mm'dir. Oluşturulan mesh kombinasyonu ile 1.098.258 adet düğüm noktası ve 361.527 adet eleman oluşturulmuştur.

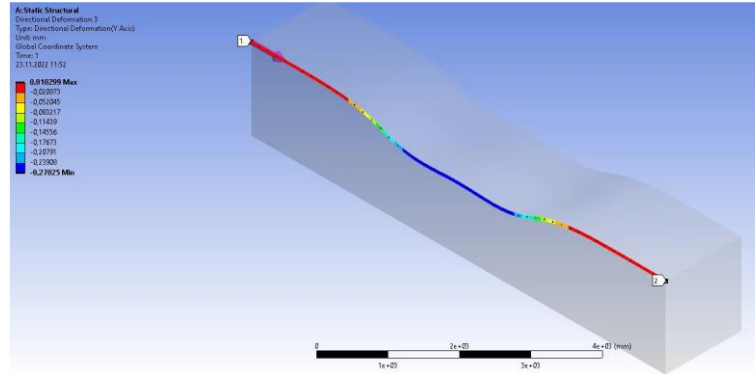
**Şekil 4.** ANSYS Workbench 2020 R2 uygulamasına aktarılmış model



Şekil 5. ANSYS Workbench analiz için mesh optimizasyon grafiği

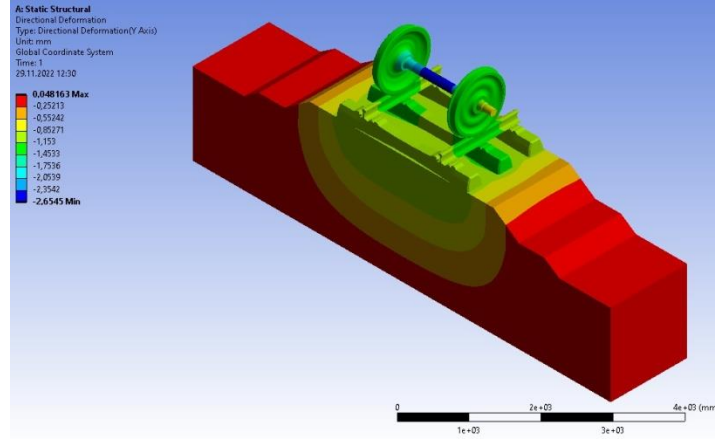
3. Bulgular

Oluşturulan modellerin tamamı ANSYS sonlu elemanlar metodu yardımıyla analiz edilmiştir. Geogrid takviyeli ve geogrid takviyesiz tasarımlar düşey yönlü yer değiştirme ve gerilme değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerin okuması altbalast tabaka kalınlığı, taban zemini ve geogrid malzeme mekanik özellikleri değişken olduğundan “Construction Geometry” komutu yardımıyla eksenin koordinat sistemindeki başlangıç ve bitiş noktaları belirlenerek yatay hat (path) oluşturulmuştur. Oluşturulan yatay hat taban zemini ile altbalast tabakası temas noktasının 5 mm altına denk gelmektedir. Şekil 6.’da oluşturulan yatay hat görseli mevcuttur.

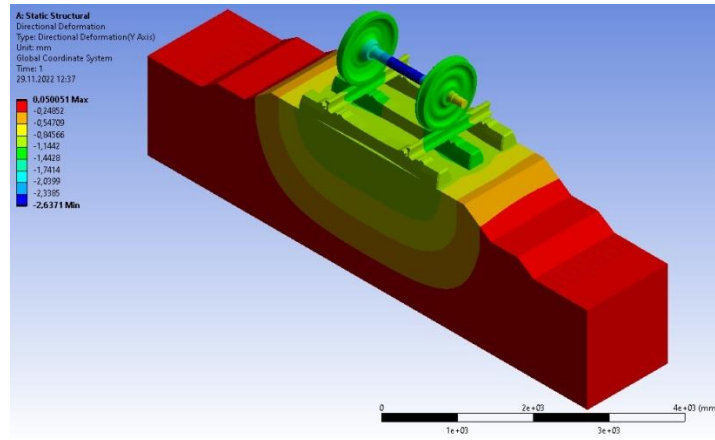


Şekil 6. Analiz sonuçlarının okunduğu yatay hat (path)

Şekil 7.’de geogridsiz demiryolu üstyapı tasarımı 225 kN dingil yükü altında meydana gelen yer değişimleri ve Şekil 8.’de 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogridli bir demiryolu üstyapı tasarımı için 225 kN dingil yükü altında meydana gelen yer değişimleri verilmiştir.



Şekil 7. 225 kN dingil yükü altında geogridsiz üstyapı tasarımı için düşey yönlü yer değiştirme

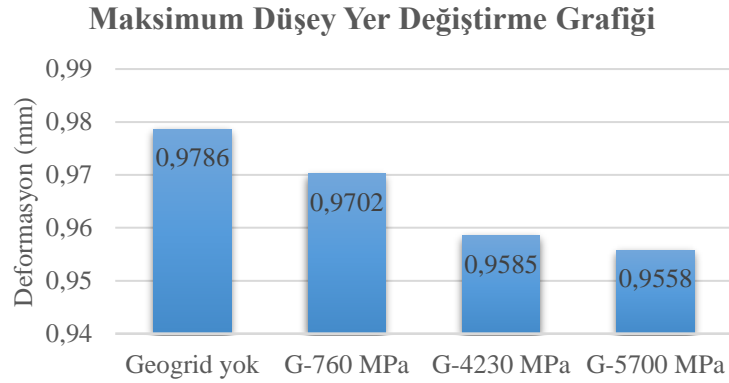


Şekil 8. 225 kN dingil yükü altında 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogridli üstyapı tasarımı için düşey yönlü yer değiştirme

20 cm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 olan tasarıma 225 kN dingil yükü uygulanmış; yatay hat boyunca oluşan maksimum düşey yer değiştirme değerlerine Tablo 4. ve Şekil 9.'da yer verilmiştir. Geogrid kullanılmamış olan tasarıma kıyasla, en az düşey deformasyonun oluşmasını sağlayan 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid malzeme kullanılan tasarımda; deformasyonların %2,3 oranında azaldığı görülmektedir. 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid malzemenin kullanıldığı tasarımda bu oran %0,86 iken; 4230 MPa elastisite modülüne sahip tasarımda oran %2,05 olarak tespit edilmiştir. Geogrid malzemenin mekanik özelliklerinin iyileşmesi, zayıf zeminlerde deformasyonların azalmasında etkili olmaktadır.

Tablo 4. Maksimum düşey yönlü yer değiştirme değerleri

| Geogrid olmayan tasarım | Geogrid (760 MPa) | Geogrid (4230 MPa) | Geogrid (5700 MPa) |
|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 0,9786 mm | 0,9702 mm | 0,9585 mm | 0,9558 mm |

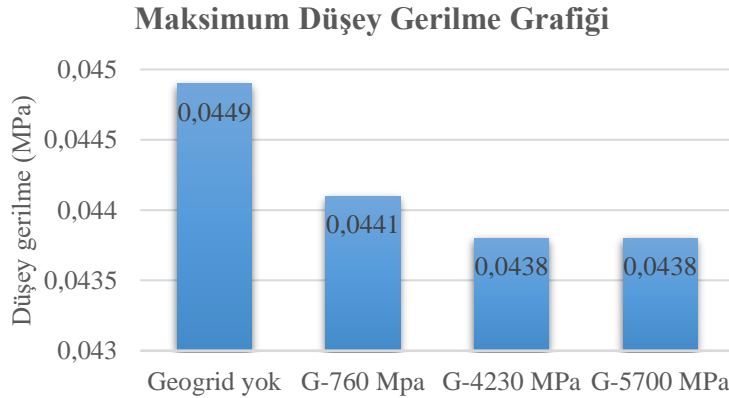


Şekil 9. 225 kN dingil yükü için maksimum düşey yönlü yer değiştirme değerleri

20 cm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 olan tasarıma 225 kN dingil yükü uygulanmış; yatay hat boyunca oluşan maksimum düşey yönlü gerilme değerlerine Tablo 5. ve Şekil 10.'da yer verilmiştir. Geogrid kullanılmamış olan tasarıma kıyasla, 5700 MPa geogrid kullanılan tasarımın düşey yönde gerilme değerlerinin %2,45 oranında azalmasına yardımcı olduğu görülmektedir. 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid malzemenin kullanıldığı tasarımda bu oran %1,78 iken; 4230 MPa elastisite modülüne sahip tasarımda oran %2,45 olarak tespit edilmiştir. Geogrid malzemenin mekanik özelliklerinin iyileşmesi, zayıf zeminlerde düşey gerilmelerin azalmasında etkili olmaktadır.

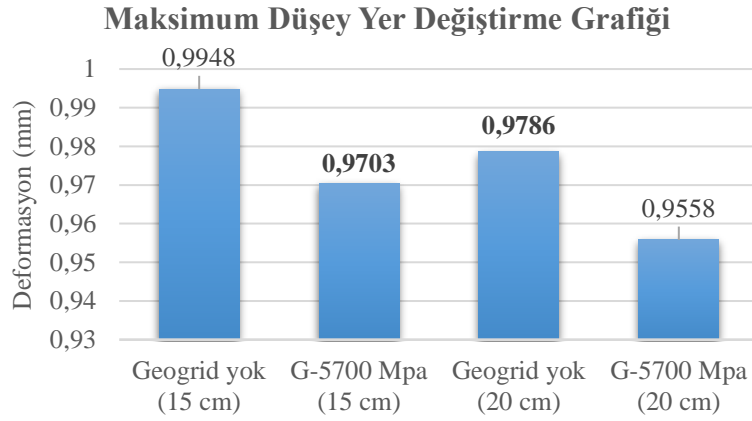
Tablo 5. Maksimum düşey gerilme değerleri

| Geogrid olmayan tasarım | Geogrid (760 MPa) | Geogrid (4230 MPa) | Geogrid (5700 MPa) |
|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 0,0449 kN | 0,0441 kN | 0,0438 kN | 0,0438 kN |

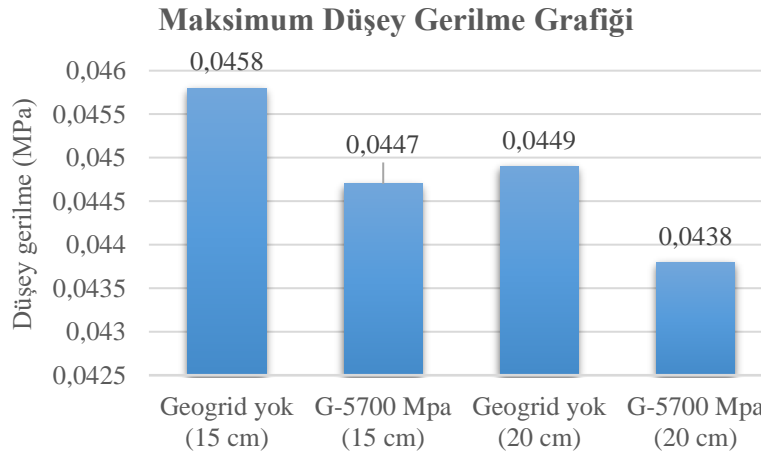


Şekil 10. 225 kN dingil yükü için maksimum maksimum düşey gerilme değerleri

225 kN dingil yükü ve zemin türü 1 (zayıf zemin) için farklı altbalast tabaka kalınlıkları; geogrid kullanılmayan tasarım ve 5700 MPa geogrid kullanılarak oluşturulan tasarım için birlikte incelenmiştir. Düşey deformasyon değerlerine ait sonuçlar Şekil 11.'de ve düşey gerilme değerlerine ait sonuçlar Şekil 12.'de paylaşılmıştır. Geogrid kullanılmamış 200 mm altbalast tabaka kalınlığına sahip tasarım ile 150 mm altbalast tabaka kalınlığı ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılan tasarımda oluşan deformasyon ve gerilmelerin yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Buna göre zayıf zeminlerde geogrid malzeme kullanımı ile altbalast tabaka kalınlığının azaltılabileceği sonucu çıkmaktadır.

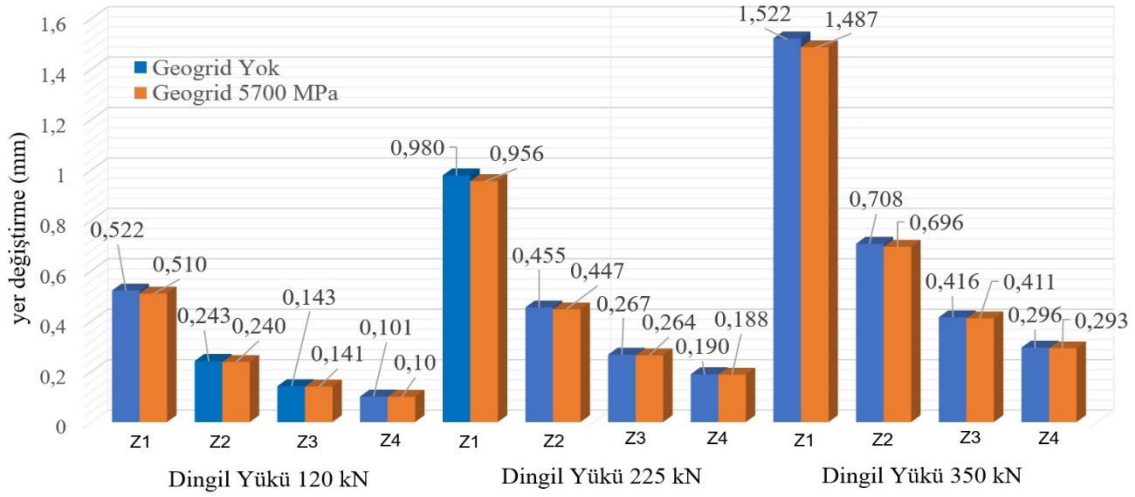


Şekil 11. Farklı altbalast tabaka kalınlıklarında maksimum düşey yönlü yer değiştirme değerleri

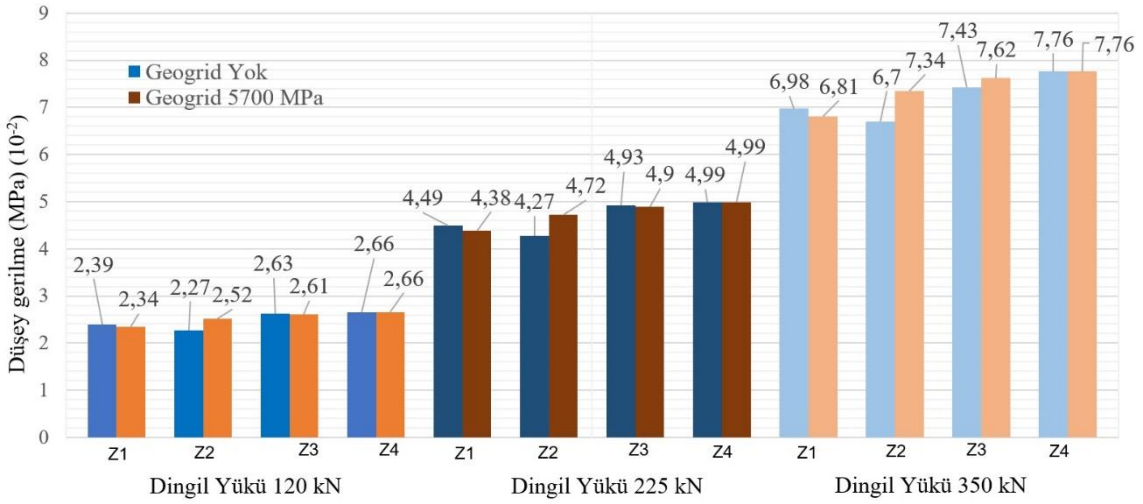


Şekil 12. Farklı altbalast tabaka kalınlıklarında maksimum düşey gerilme değerleri

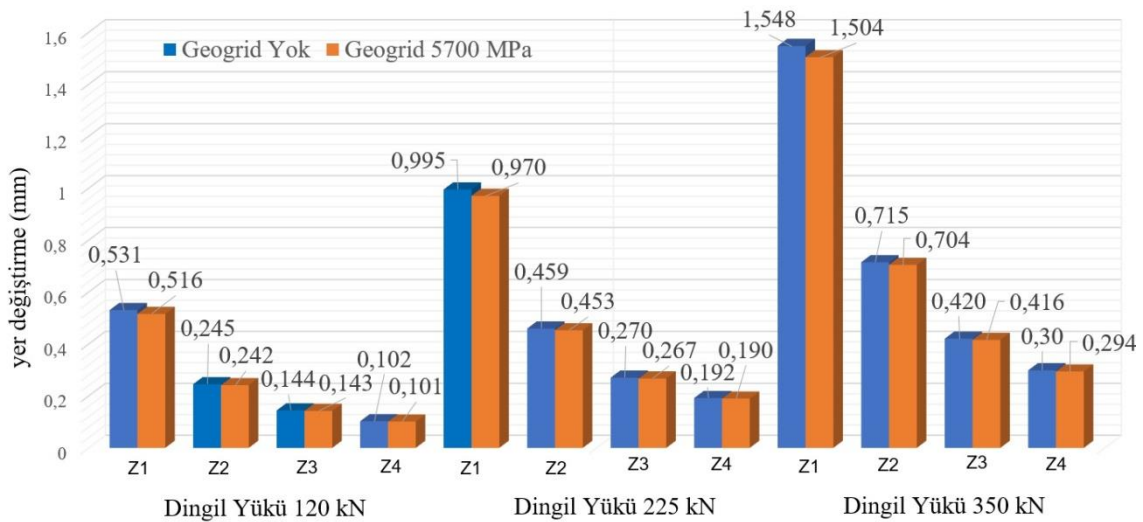
Tasarım aşamasında oluşturulan analiz kombinasyonlarından geogrid malzeme kullanılmayan tasarım ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılan tasarım, analizlerde maksimum ve minimum değerlerin çıkması ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle Şekil 13., Şekil 14., Şekil 15. ve Şekil 16.'da bu iki farklı tasarım için çalışmada belirlenen analiz kombinasyonları ile çıkan sonuçlarına ayrıca yer verilmiştir. Şekil 13.'te 200 mm altbalast tabakası tasarımda oluşturulan bütün dingil yükleri ve bütün taban zemini değerleri açısından birlikte incelendiğinde; geogrid malzeme kullanılan ve zayıf zemine sahip tasarımda oransal olarak en iyi sonucu verdiği söylenebilir. Taban zemininin kalitesi arttıkça geogrid malzemenin etkisi de azalmaktadır. Dingil yükünün farklı olması ise geogrid malzeme kullanımının etkilerini oransal olarak etkilememiştir. Şekil 14.'te 200 mm altbalast tabakasına sahip tasarım gerilme değerleri açısından incelenmiş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 15'te bu kez 150 mm altbalast tabakasına sahip tasarımın düşey deformasyon sonuçları incelenmiş ve 200 mm altbalast tabakasına sahip tasarım ile birbirine paralel sonuçlar elde edilmiştir.



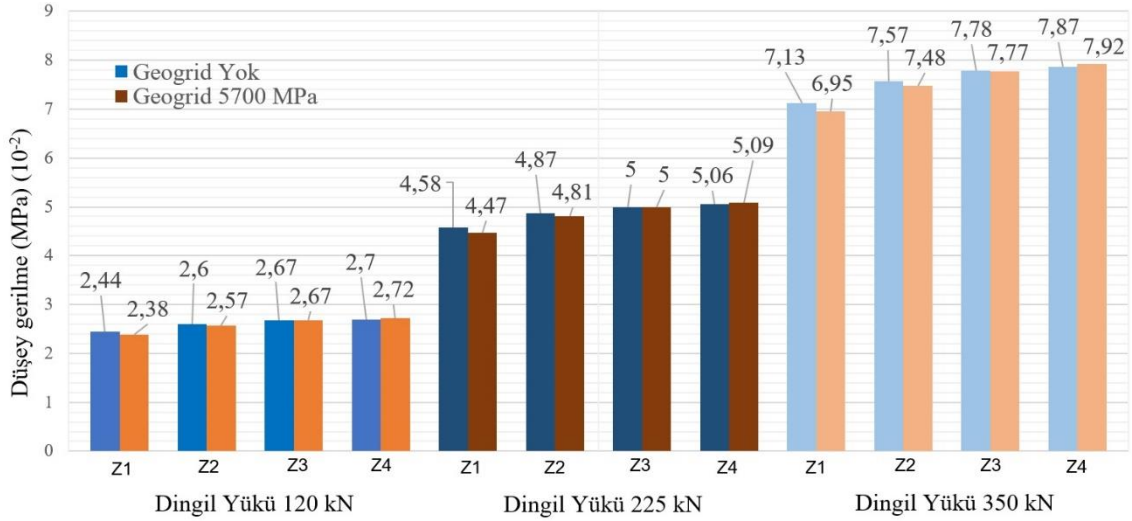
Şekil 13. 200 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve zemin türleri için yer değıştirme grafiği



Şekil 14. 200 mm altbalast tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için düşey gerilme grafiği



Şekil 15. 150 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve zemin türleri için yer değıştirme grafiği



Şekil 16. 150 mm altbalast tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için düşey gerilme grafiği

Bu çalışmada tasarımı yapılan demiryolu üstyapısında, analiz raporlarının bir araya getirilmesi ile oluşturulan grafikler incelendiğinde; taban zemin türü değişiminin meydana gelen düşey yönlü gerilme ve yer değiştirmeye etkisinin çok önemli olduğu karşımıza çıkmaktadır. Taban zemini elastisite modülü arttıkça yani taban zemininin kalitesi arttıkça geogrid malzemenin etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Farklı dingil yükü ve farklı altbalast tabaka kalınlığına sahip tasarımlar ile yapılan analizlerde ise birbirine paralel benzer sonuçlarla karşılaşmıştır.

4. Sonuç

Yapılan çalışmanın sonucunda elde edilen verilere göre; altbalast tabakası ile taban zemini arasında geogrid malzeme kullanımının taban zemini üzerindeki düşey yönlü yer değiştirme ve gerilmelerin azalmasına katkı sağlamaktadır. Kullanılan geogrid malzemesinin mekanik özellikleri iyileştikçe sonuçlarının da buna paralel olarak iyi yönde arttığı görülmüştür. Farklı altbalast tabaka kalınlığı kullanılarak yapılan analizler neticesinde; geogrid malzeme kullanılmasının altbalast tabaka kalınlığının azaltılmasına yardımcı olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle altbalast tabakasında kullanılan granüler malzemenin ülkemiz ve dünyada sınırlı miktarda olduğu göz önüne alınırsa, tabaka kalınlıklarının azaltılarak daha az miktarda granüler malzeme kullanımı için alternatif bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca taban zemini malzeme türünün, analizlerde tercih edilen diğer parametrelere (dingil yükü, altbalast tabaka kalınlığı) göre daha etkili olduğu görülmüştür. Zemin iyileştirme ve güçlendirme çalışmalarının yüksek maliyetleri göz önüne alındığında, taban zemini üzerine uygun içerik ve özelliklerde geogrid kullanımının güçlü bir alternatif olarak değerlendirilebileceği görülmektedir.

Yapılan çalışmada geogrid malzemesinin taban zeminine olan etkisini değerlendirmek ve oluşan gerilmeleri daha iyi gözlemlenmek amacıyla alt temel tabakasına tasarım aşamasında yer verilmemiştir. Farklı bir çalışmada alt temel tabakası dizayna dahil edilerek, farklı alt temel tabaka kalınlıkları için de geogrid malzemesinin etkisi gözlemlenebilir. Yine farklı bir çalışmada benzer demiryolu tasarımı farklı sonlu elemanlar programı yardımıyla analizler tekrarlanarak çıkan sonuçlar mukayese edilebilir. Saha uygulamalarında sıkça rastlanılan birden fazla sıra geogrid kullanımının dizayna etkilerinin gözlemlenmesi amacıyla farklı sonlu elemanlar programı yardımıyla analizler tekrarlanabilir. Sonuçlar göstermektedir ki; sonlu elemanlar metodu kullanılarak çok kısa sürede, maliyetli ve uzun zaman alacak laboratuvar çalışmalarına gerek kalmadan üstyapı tasarımının hazırlanması ve malzeme özellikleri ile kriterlerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Kaynakça

- [1] G. N. Goud, B. Ramu, B. Umashankar, S. Sireesh & M. R. Madhav, "Evaluation of layer coefficient ratios for geogrid-reinforced bases of flexible pavements," *Road Materials and Pavement Design*, doi: 10.1080/14680629.2020.1812424
- [2] K. Sweta, S. K. K. Hussaini, "Effect of geogrid on deformation response and resilient modulus of railroad ballast under cyclic loading," *Construction and Building Materials*, vol. 264, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120690>
- [3] G. Sridevi, G. Sudarshan, A. Shivaraj, "Performance of geocell and geogrid reinforced weak subgrade soils," *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019*, vol. 5, pp. 273-283, doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6466-0>
- [4] S. B. Dhule, S. S. Valunekar, S. D. Sarkate, S. S. Korrane, "Improvement of flexible pavement with use of geogrid," *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 14, pp. 269-279, 2011
- [5] R. D. Holtz, "Geosynthetics for soil reinforcement," *Frontier Technologies for Infrastructures Engineering*, 2009. doi: <https://doi.org/10.1201/9780203875599.ch6>.
- [6] B. Canpolat, "Demiryolu üstyapı tasarımlarında geogrid kullanımı ve etkisi," Yüksek Lisans Tezi, FBE, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, AKÜ, Afyonkarahisar, 2023
- [7] Tensar International Limited, *Hat balastı ve alt-balastın mekanik olarak stabilizasyonu*, 2014, United Kingdom.
- [8] N. T. Ngo, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, "Modelling geogrid-reinforced railway ballast using the discrete element method," *Transportation Geotechnics*, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.04.005>
- [9] S. F. Brown, J. Kwan, N. H. Thom, "Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast," *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, vol. 25, pp. 326-335, doi: 10.1016/j.geotexmem.2007.06.003
- [10] S. Aydın, "Karayollarında kullanılan farklı tür geogridler için kullanılacak dolgu miktarının araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, FBE, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Toros Üniversitesi, Mersin, 2019
- [11] T. K. Sert, A. Gurbuz, M. V. Akpınar, "A study on the effects of highway reinforcement on load distribution," *Sciennovation A Journal of Structural Science and Innovation*, vol. 2, pp. 51-58, 2020
- [12] H. Zanzinger, "Laboratory testing of geogrids and geocells used for the function stabilisation," *Sekizinci Ulusal Geosentetikler Konferansı*, pp. 43-66, May. 2019
- [13] S. Archer, "Subgrade improvement for paved and unpaved surfaces using geogrids," *Contech Construction Products Inc*, 2008
- [14] B. Ç. Karagül, "Yol dolgularının geogrid kullanılarak iyileştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, FBE, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İTÜ, İstanbul, 2007
- [15] S. K. K. Hussaini, B. Indraratna, J. S. Vinod, "Performance assessment of geogrid-reinforced railroad ballast during cyclic loading," *Transportation Geotechnics*, vol. 2, pp. 99-107, Nov. 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.11.002>
- [16] J. Sadeghi, A. R. T. Kian, H. Ghiasinejad, M. F. Moqaddam, S. Motevalli, "Effectiveness of geogrid reinforcement in improvement of mechanical behavior of sand-contaminated ballast," *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, vol. 48, pp. 768-779, doi: 10.1016/j.geotexmem.2020.05.007
- [17] B. Ağbaba, "Baalı demiryolu ve balastsız demiryolunun ANSYS programı yardımıyla analizinin yapılması ve karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, FBE, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2019
- [18] Y. Özdemir, P. Voltr, "Analysis of the wheel and rail frictionless normal contact considering material parameters," *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, no. 15, pp. 101-109, 2016, doi: 10.17512/jamcm.2016.2.11
- [19] C. Gürer, T. Akıllı Törer, K. Aslantaş, "Yüksek hızlı hatlarda granüler altbalast yerine asfalt tabaka kullanımının sonlu elemanlarla modellenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 39-48, Temmuz 2021, doi: 10.47072/demiryolu.867120
- [20] G. Leonardi, D. L. Bosco, R. Palamara, F. Suraci, "Finite element analysis of geogrid-stabilized unpaved roads," *Sustainability*, no. 12, pp. March 2020, doi: 10.3390/su12051929

- [21] V. H. Shamami, A. K. Khiavi, "Effect of temperature on geosynthetic rutting performance in asphalt pavement," *Petroleum Science and Technology*, no. 35, pp. 1104-1109, 2017, doi: 10.1080/10916466.2017.1305400
- [22] S. Skuodis, N. Dirgeliene, J. Medzvieckas, "Using triaxial tests to determine the shearing strength of geogrid-reinforced sand," *Studia Geotechnica et Mechanica*, no. 42, pp. 341-354, 2020, doi: 10.2478/sgem-2020-0005

Özgeçmiş



Hüseyin AKBULUT

Afyonkocatepe Üniversitesi, inşaat Mühendisliği Bölümünde Öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Karayolu/demiryolu üstyapı tasarımı ve Ulaştırma planlaması konularında çalışmalarına devam etmektedir.
E-Posta: hakbulut@aku.edu.tr



Buğra CANPOLAT

1988 yılında Ankara'da doğmuştur. İnşaat Mühendisliği alanında lisans eğitimini Selçuk Üniversitesi'nde, yüksek lisans eğitimini Afyon Kocatepe Üniversitesi'nde tamamlamıştır. TCDD Yapım Dairesi Başkanlığı, 3. Demiryolu Yapım Grup Müdürlüğü, Afyonkarahisar ilinde İnşaat Mühendisi olarak çalışmaktadır.
E-Posta: bugracanpolat@tcdd.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Hüseyin AKBULUT: Kontrol, İnceleme, Gözden geçirme ve düzenleme.

Buğra CANPOLAT: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme.



Lokomotif Bakım Atölyelerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden İncelenmesi: Çalışanlar Üzerinde Bir Araştırma

Songül DİREK^{*1}, Fatih YALÇIN²

¹ İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Tezli Yüksek Lisans Programı, İstanbul, Türkiye

² Petrogas PGI Endüstriyel Sistemler İmalat Sanayi A.Ş Kocaeli / Türkiye

*songuldirek1988@gmail.com

(Alınış/Received: 23.11.2023, Kabul/Accepted: 22.07.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Demiryolları ile ulaşımın günden güne gelişmesiyle sektördeki yük ve yolcu taşımacılığı ile birlikte istihdam da buna paralel olarak hızla artmıştır. Demiryolu sektöründeki hızlı gelişme çalışanların sağlığı ve güvenliği ile ilgili çeşitli araştırmalara yol açmıştır. Bu çalışma lokomotif bakım atölyeleri genelinde çalışanların meydana gelebilecek riskler, alınabilecek önlemler ile iş sağlığı ve güvenliğine yönelik algı düzeylerinin araştırılmasına yöneliktir. Bu amaçla tek boyut ve otuz sorudan oluşan bir anket incelemesi yapılmıştır. Araştırma modelini test etmek amacıyla toplanan veriler istatistik analiz programı kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar çizelge haline getirilmiş ve yorumlanarak alınması gereken önlemler ile ilgili öneriler sunulmuştur. Sonuç olarak; Lokomotif bakım atölyelerinde çalışanların iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yararlanabileceği bir rehber oluşturularak literatüre katkı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Demiryolları, TCDD, İş kazaları, İş sağlığı ve güvenliği

Investigation of Locomotive Maintenance Workshops in Terms of Occupational Health and Safety: A Study on Employees

Abstract: With the development of transportation by railways day by day, employment in the sector as well as freight and passenger transportation has increased rapidly. The rapid development in this sector has led to various research on the health and safety of employees. This study aims to investigate the risks that may occur in locomotive maintenance workshops, the precautions that can be taken and the perception levels of employees regarding occupational health and safety. Here; a questionnaire analysis consisting of one dimension and thirty questions was conducted. In order to test the research model, the collected data were analyzed using a statistical analysis program. The results obtained in this study were tabulated and interpreted, and suggestions for the precautions to be taken were presented. In conclusion; a contribution to the literature has been made by creating a guide on occupational health and safety that employees in locomotive maintenance workshops can use.

Keywords: Railways, TCDD, Occupational accidents, Occupational health and safety

1. Giriş

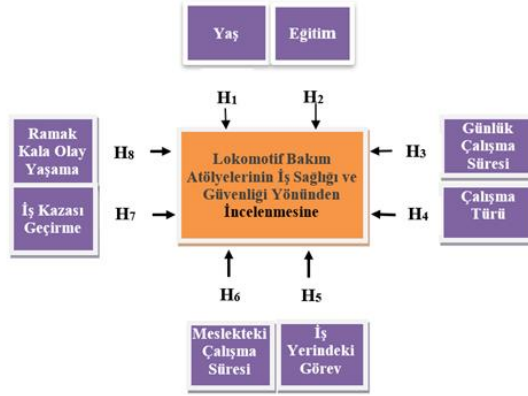
Demiryolu sektöründeki gelişmeler iş güvenliğinin önemini artırırken bu süreçte iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının gelişimi hız kazanmıştır. 1889 yılında İngiltere’de ilk olarak demiryolu sektörünü kapsayacak şekilde fazla süreli çalışmalar düzenlenmiş [1], 1974 yılında ise İş Sağlığı ve Güvenliği Yasası ile demiryolu sektöründe iş sağlığı ve güvenliği kavramı ortaya çıkmış, işverenlere işçilerin sağlığının ve güvenliğinin korunması sorumluluğu getirilmiştir [2]. Bu çalışma alanı ile ilgili literatür incelemesi yapıldığında; demiryolu çalışmaları bakım ve onarım faaliyetlerinde meydana gelen kazalar, insan faktörü, teknik faktörler ve çevresel faktörlerin incelendiği görülmüştür [3]. Diğer açıdan; İngiltere İş Sağlığı ve Güvenliği Kuruluşu (HSE) demiryollarındaki bakım onarım faaliyetleri sırasında ortaya çıkan iş kazaları nedenlerini gerekli bakım onarımının yapılmamasından kaynaklı kritik ekipmanların arızalanması, bakım

Atıf için/Cite as: S. Direk, F. Yalçın, “Lokomotif bakım atölyelerinin iş sağlığı ve güvenliği yönünden incelenmesi: çalışanlar üzerinde bir araştırma,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 96-108, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1331352

faaliyetlerinde çalışan personelin hatası, çalışanların fiziki ve mesleki yetersizliği ve çalışanlar arasındaki iletişim yetersizliği olarak belirtmiştir [4, 5]. 2004 yılında Fransa demiryollarında yürütülen çalışmalar ile mesleki yaralanmalar arasındaki ilişki incelendiğinde demografik özelliklerden yaş, uyku, bozuklukları, kilo, alkol tüketimi, sigara kullanımı, spor, deneyimsizlik ve iş tatminsizliği vb. faktörlerin iş kazalarına neden olduğu sonucuna varılmıştır [6]. Avustralya demiryolu faaliyetlerinde çalışanları inceleyerek vardiyalı çalışmanın yorgunluğa, performans düşüklüğüne ve sürekli uyku haline ve uyku bozukluğunun çalışma sırasında iş kazaları ile ilişkisine vurgu yapılmıştır [7]. “Bulanık Mantık ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci Temelli Demiryolu Risk Bilgilerine Bir Yaklaşım: Demiryolu Risk Yönetimi Sistemi” adlı çalışmada kazaların ortaya çıkmasında neden olan tehlikelerin risk değerlendirmesi yapılmasının gerekliliği ortaya konulurken [8], “Demiryolu İşçileri İçin Demiryolu Kaza Senaryoları Geliştirilmesi Üzerine Bir Araştırma” adlı çalışmada ise demiryolları çalışanları için ortaya çıkabilecek ölümlü kaza durumları geliştirilmiş ve yaşanabilecek ölümlü kaza durumu için risk değerlendirmesi yaparak demiryolu kazalarının azaltılması hedeflenmiş, kaza önleme stratejilerinin geliştirilmesi amaçlanmış, risk değerlendirmesinin önemi vurgulanmıştır [9]. Holmgren’e göre demiryolları faaliyetlerinde iş güvenliğinin sağlanması düzenli bakım çalışmaları ile gerçekleşecektir [10]. Ülkemizde ise bu gelişmelerin yansıması 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu [11, 12] çıkarılmasıyla olmuştur. Tüm çalışanların kapsam içine alındığı bu kanun ile beraber demiryolu sektöründe 19 Kasım 2015 tarihinde Demiryolu Emniyet Yönetmeliği ve emniyet kültürünün yaygınlaşması amacıyla temel emniyet gereklilikleri, emniyetinin sağlanması ve iyileştirilmesine yönelik temel ilkeler ve hedefler belirlenerek Emniyet Yönetim Sistemi politikaları hayata geçirilmiştir [13]. Loko Bakım Onarım Atölye Müdürlüğü’nde çeken/çekilen araçların ve işyerinde bulunan makine ve teçhizatların tesislerin aktif olması için periyodik bakım ve onarımlarını teknik emir ve mevzuatlar kapsamında standartlara uygun olarak zamanında yapmak, gerekli parçaların zamanında temin edilmesini sağlamak, eğitim programları çerçevesinde çalışanların kurum içi ve dışı eğitim programlarına katılmalarını, iş başı eğitimlerini gerçekleştirmek ve personelinin eğitim hizmetlerini yürütmek için iş sağlığı ve güvenliği konularında kanunlar, tüzükler, yönetmelik ve emirler doğrultusunda önlem almak ve gerekli kontrolleri yapılması için çalışmalar yürütülmüştür [14]. Yukarıda özetlenen literatür araştırması sonucu, lokomotif bakım atölyelerinde ortaya çıkabilecek riskleri, alınması gereken önlemleri ve çalışma kuralları ile ilgili bir araştırmanın yapılmadığı görülmüştür. Bu nedenle, sunulan çalışmada bu hususlar incelenmiş ve elde edilen bulgular paylaşılmıştır.

2. Metot

Araştırmanın evreni, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Taşımacılık A.Ş.’ne bağlı atölye müdürlüklerinde istihdam edilen atölye çalışanlarıdır. Örnekleme ise TCDD Taşımacılık A.Ş. İstanbul Bölge Müdürlüğü’ne bağlı bulunan Halkalı Lokomotif Bakım Atölye Şefliği ve Gebze Lokomotif Bakım Atölye Müdürlüğü’ndeki çalışanlar oluşturmaktadır. Araştırma modelini test etmek amacıyla toplanan veriler SPSS 26 (Statistical Package for the Social Sciences) istatistik analiz programı kullanılarak işlenmiştir.



Şekil 1. Araştırma Modeli

Şekil 1.'de gösterildiği gibi yaş, eğitim durumu, günlük çalışma süresi, çalışma türü, iş yerindeki görev, meslekteki çalışma süresi, iş kazası geçirme ve ramak kala olay yaşama ölçümlerde kriter olarak kullanılmıştır. Bu amaçla çalışmada test edilen hipotezler aşağıda verilmiştir:

Hipotezler:

Araştırma modeli kapsamında aşağıdaki hipotezler oluşturulmuştur:

H₀: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları yaşa göre farklılaşmamaktadır.

H₁: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları yaşa göre farklılaşmaktadır.

H₀: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları eğitim durumuna göre farklılaşmamaktadır.

H₂: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları eğitim durumuna göre farklılaşmaktadır.

H₀: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları günlük çalışma süresine göre farklılaşmamaktadır.

H₃: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları günlük çalışma süresine göre farklılaşmaktadır.

H₀: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları çalışma türüne göre farklılaşmamaktadır.

H₄: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları çalışma türüne göre farklılaşmaktadır.

H₀: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları iş yerindeki göreve göre farklılaşmamaktadır.

H₅: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları iş yerindeki göreve göre farklılaşmaktadır.

H₀: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları meslekteki çalışma süresine göre farklılaşmamaktadır.

H₆: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları meslekteki çalışma süresine göre farklılaşmaktadır.

H₀: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları iş kazası geçirme durumuna göre farklılaşmamaktadır.

H₇: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları iş kazası geçirme durumuna göre farklılaşmaktadır.

H₀: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları ramak kala olay yaşama durumuna göre farklılaşmamaktadır.

H₈: Lokomotif bakım atölyesi çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları ramak kala olay yaşama durumuna göre farklılaşmaktadır.

Lokomotif bakım atölyelerinin iş sağlığı ve güvenliği yönünden incelenmesi anketine katılım düzeylerine bakıldığında yapılan çalışmada demografik bilgilerin analizinde medeni durum için istatistiksel test yapılmış olmasına rağmen istatistiksel olarak anlamlı çıkmaması nedeniyle bu ölçeğin hipotezine yer verilmemiştir.

Toplanan veriler 5'li Likert Ölçeğine göre değerlendirilen anket formunda lokomotif bakım atölyesindeki çalışanların demografik özelliklerinin belirlenmesi için 10 sorudan oluşan "kişisel bilgi formu" ile lokomotif bakım atölyelerinde çalışanların algılarını ölçmek için tek boyut ve 30 sorudan oluşan "Lokomotif Bakım Atölyelerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden İncelenmesi" olmak üzere iki bölümden oluşan form kullanılmıştır. T.C. Devlet Demiryolları Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürlüğü'nden gerekli izinlerin alınmasıyla birlikte anket formu 127 kişiye ulaştırılmış ve bu anketlerden 127'si yanıtlanmıştır. Ancak yanıtlanan bu 127 anketten 2'si eksik kodlamadan dolayı çalışmanın dışında bırakılmıştır. Çalışma kapsamında örneklem olarak seçilen lokomotif bakım atölyelerindeki çalışanların tamamının erkek olması, araştırma sonuçlarının genelleştirilebilmesi bakımından bir sınırlılık oluşturmuştur.

Cronbach's Alfa Katsayısı 0,973 olarak elde edilen değere göre çalışmanın yüksek derecede güvenilir olduğu değerlendirilmiştir ($0.80 \leq \alpha < 1.00$ ölçek yüksek derecede güvenilir).

3. Bulgular

Çalışmada katılımcıların yaş, eğitim durumu, günlük çalışma süresi, çalışma türü, görev, aynı mesleğin yapıldığı süre, iş kazası geçirme durumu ve ramak kala olayı yaşama durumu demografik özelliklerine ilişkin veriler Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde yaş gruplarına göre dağılımın; 18-28 yaş grubu araştırmanın %12,8'ini, 29-39 yaş grubu %43,2'sini, 40-50 yaş grubu %24,8'ini ve 51 yaş ve üzeri %19,2'sini oluşturduğu görülmektedir. Medeni duruma göre dağılım incelendiğinde; katılımcıların %74,4'ünün evli, %25,6'sının bekar; günlük çalışma süresine göre dağılım incelendiğinde; 8 saatten az çalışanların oranının %40,8, 8 saatten fazla çalışanların oranının %59,2 olduğu görülmektedir. Eğitim durumuna göre dağılım incelendiğinde; lise ve altı mezun olanların oranının %33,6, ön lisans mezunların oranının %38,4 ve lisans ve üzeri mezun olanların oranının ise %28,0 olduğu görülmektedir. Görevlere göre dağılım incelendiğinde; yönetici olarak çalışanların oranının %10,4, idari personel olarak çalışanların oranının %8,0, tren teşkil personeli olarak çalışanların oranının %14,4, depo personeli olarak çalışanların oranının %4,8, çalışanların oranının %23,2 ve kaynakçı olarak çalışanların oranının %5,6 olduğu görülmektedir. Çalışma türüne göre dağılım incelendiğinde; gündüz çalışanların oranının %20,8, vardiyalı çalışanların oranının %79,2 olduğu görülmektedir. Aynı mesleği yapma süresine göre dağılım incelendiğinde; aynı meslekte 0-5 yıl arası çalışanlar bu araştırmanın %36,0'ını, 6-10 yıl arası çalışanlar %20,8'ini, 11-15 yıl arası çalışanlar %17,6'sını ve 16 yıl ve fazlası çalışanlar %25,5'ini oluşturduğu görülmektedir. İş kazası geçirme ve ramak kala olay yaşama durumları incelendiğinde; iş kazası geçirenlerin oranının %20,0, iş kazası geçirmeyenlerin oranının %80,0, ramak kala olay yaşayanların oranının %43,2, ramak kala olay yaşamayanların oranının %56,8 olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Demografik bilgilerin frekans analizi

| Demografik Özellikler | Grup | n | % |
|-----------------------|-----------------|----|------|
| Yaş | 18-28 yaş | 16 | 12,8 |
| | 29-39 yaş | 54 | 43,2 |
| | 40-50 yaş | 31 | 24,8 |
| | 51 yaş ve üzeri | 24 | 19,2 |
| | Evli | 93 | 74,4 |

| | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----|------|
| Medeni Durum | Bekar | 32 | 25,6 |
| Eğitim Durumu | Lise ve altı | 42 | 33,6 |
| | Ön Lisans | 48 | 38,4 |
| | Lisans ve üzeri | 35 | 28,0 |
| Günlük Çalışma Süresi | 8 saatten az | 51 | 40,8 |
| | 8 saatten fazla | 74 | 59,2 |
| Çalışma Türü | Gündüz | 26 | 20,8 |
| | Vardiyalı | 99 | 79,2 |
| Görev | Yönetici | 13 | 10,4 |
| | İdari Personel | 10 | 8,0 |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 14,4 |
| | Depo | 6 | 4,8 |
| | Elektrik işçisi | 31 | 24,8 |
| | Hava fren işçisi | 11 | 8,8 |
| | Alt bakım işçisi | 29 | 23,2 |
| | Kaynakçı | 7 | 5,6 |
| Aynı Mesleğin Yapıldığı Süre | 0-5 yıl | 45 | 36,0 |
| | 6-10 yıl | 26 | 20,8 |
| | 11-15 yıl | 22 | 17,6 |
| | 16 yıldan fazla | 32 | 25,6 |
| İş Kazası Geçirme Durumu | Evet | 25 | 20,0 |
| | Hayır | 100 | 80,0 |
| Ramak Kala Olay Yaşama Durumu | Evet | 54 | 43,2 |
| | Hayır | 71 | 56,8 |

Çalışanların lokomotif bakım atölyelerinin iş sağlığı ve güvenliği yönünden incelenmesi anketine katılım düzeylerinin ortalamaları ve bu ortalamalar arasındaki farkın anlamlı bulunup bulunmadığını belirlemek için yapılan tek yönlü varyans analizi sonuçlarına göre ifadelerle katılım düzeylerine bakıldığında; yaş gruplarına göre Tablo 2.'de bulunan "Çalışmaya başlamadan önce kullanılan makine ve teçhizatlar operatörler tarafından kontrol edilir" ifadesine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık vardır ($p<0,05$) ve H_1 hipotezi kabul edilmiştir. 18-28 yaş grubunun ifadeye katılım düzeyinin 29-39 yaş grubuna göre algı düzeyinin daha anlamlı olduğu görülmektedir. Eğitim durumlarına göre Tablo 3. incelendiğinde; "Aydınlatma sisteminin devre dışı kalmasının çalışanlar için risk oluşturabileceği yerlerde ayrı bir enerji kaynağına bağlı acil aydınlatma sistemi bulunur" ifadesine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık vardır ($p<0,05$) ve H_2 hipotezi kabul edilmiştir. Lise ve altı eğitim durumunda olan kişilerin ifadeye katılım düzeyinin lisans ve üzeri eğitim durumu olan kişilerden anlamlı derecede daha yüksektir. Tablo 4. incelendiğinde; "Çalışma platformlarındaki merdivenlerin yükseklik ve genişlikleri uygundur." ifadesine katılım düzeyi günlük çalışma süresine göre anlamlı düzeyde farklılık vardır ($p<0,05$) ve bu ifadede H_3 hipotezi kabul edilmiştir. 8 saatten fazla çalışanların ifadelerle katılım düzeyi 8 saatten az çalışanlardan anlamlı derecede daha yüksek olduğunu görülmektedir. Çalışma türlerine göre sonuçlara bakıldığında Tablo 5.'de yer alan "Makine koruyucuları eksiksiz, tam ve faal konumdadır.", "Çatlak, aşınma ve kırılma tespit edilen iş ekipmanları kullanım dışı bırakılır." ifadelerine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık vardır ($p<0,05$) ve bu ifadelerde H_4 hipotezi kabul edilmiştir. Gündüz çalışanların ifadelerle katılım düzeyi vardiyalı çalışanlardan anlamlı derecede daha yüksektir.

Tablo 2. Yaş gruplarına göre ifadelerle katılım düzeyinin dağılımı (* $p<0,05$; ** $p<0,01$)

| | Yaş Grubu | N | Ort. | Standart Sapma | F | p |
|--|-----------|----|------|----------------|-------|--------|
| Çalışmaya başlamadan önce kullanılan makine ve | 18-28 yaş | 16 | 4,06 | 1,06 | 2,820 | 0,042* |
| | 29-39 yaş | 54 | 3,38 | 1,27 | | |

| | | | | |
|--|-----------------|----|------|------|
| teçhizatlar operatörler tarafından kontrol edilir. | 40-50 yaş | 31 | 3,94 | 0,96 |
| | 51 yaş ve üzeri | 24 | 3,96 | 0,95 |

Tablo 3. Eğitim durumlarına göre ifadelere katılım düzeyinin dağılımı (*p<0,05; **p<0,01)

| | Eğitim Durumları | N | Ort. | Standart Sapma | F | p |
|---|------------------|----|------|----------------|-------|--------|
| Aydınlatma sisteminin devre dışı kalmasının çalışanlar için risk oluşturabileceği yerlerde ayrı bir enerji kaynağına bağlı acil aydınlatma sistemi bulunur. | Lise ve altı | 42 | 4,26 | 0,77 | 3,587 | 0,031* |
| | Ön lisans | 48 | 4,13 | 0,98 | | |
| | Lisans ve üzeri | 35 | 3,6 | 1,59 | | |

Tablo 4. Günlük çalışma sürelerine göre ifadelere katılım düzeyinin dağılımı (*p<0,05; **p<0,01)

| | Çalışma Süreleri | N | Ort. | Standart Sapma | t | p |
|---|------------------|----|------|----------------|--------|--------|
| Çalışma platformlarındaki merdivenlerin yükseklik ve genişlikleri uygundur. | 8 saatten az | 51 | 3,63 | 1,11 | -1,944 | 0,049* |
| | 8 saatten fazla | 74 | 4,0 | 0,97 | | |

Tablo 5. Çalışma türlerine göre ifadelere katılım düzeyinin dağılımı (*p<0,05; **p<0,01)

| | Çalışma Türleri | N | Ort. | Standart Sapma | t | p |
|---|-----------------|----|------|----------------|-------|--------|
| Makine koruyucuları eksiksiz, tam ve faal konumdadır. | Gündüz | 26 | 4,15 | 0,73 | 2,242 | 0,027* |
| | Vardiyalı | 99 | 3,63 | 1,13 | | |
| Çatlak, aşınma ve kırılma tespit edilen iş ekipmanları kullanım dışı bırakılır. | Gündüz | 26 | 4,38 | 0,5 | 2,498 | 0,014* |
| | Vardiyalı | 99 | 3,81 | 1,14 | | |

Tablo 6.'ya göre ifadelere katılım düzeyinin göreve göre dağılımı incelendiğinde; “Çalışma alanlarında işin etkin ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlayacak aydınlatma sistemi kullanılır.” ifadesine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık bulunurken (p<0,05); tren teşkil personeli olan çalışanların ifadeye katılım düzeyinin yönetici ve alt bakım işçisi olan çalışanlardan anlamlı derecede daha düşük olduğu tespit edilmiştir. “Aydınlatma sisteminin devre dışı kalmasının çalışanlar için risk oluşturabileceği yerlerde ayrı bir enerji kaynağına bağlı acil aydınlatma sistemi bulunur.” ve “Çalışanlara kimyasalların kullanımı, tehlikeleri ve taşınmaları konularında eğitim verilir.” ifadelerine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık bulunurken (p<0,05); tren teşkil personeli olan çalışanların ifadelerine katılım düzeyinin yönetici ve hava fren işçisi olan çalışanlardan anlamlı derecede daha düşüktür. “Kimyasallarla ilgili acil durumlar için göz ve vücut duşu mevcuttur ve çalışılan alana yakın mesafede bulunur.” ifadesine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık bulunurken (p<0,05); tren teşkil personeli olan çalışanların ifadeye katılım düzeyinin hava fren işçisi olan çalışanlardan anlamlı derecede daha düşüktür. “Kolayca tutuşabilir ve patlayabilir tehlikeli kimyasallar birbirlerinden ayrı depolanır.” ifadesine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık bulunurken (p<0,05); tren teşkil personeli olan çalışanların ifadeye katılım düzeyinin yönetici ve idari personel olan çalışanlardan anlamlı derecede daha düşüktür. “Çalışanlar, elektrikle çalışma riskleri konusunda bilgilendirilir.” ve “Makine koruyucuları eksiksiz, tam ve faal konumdadır.” ifadelerine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık bulunurken (p<0,05); tren teşkil personeli olan çalışanların ifadeye katılım düzeyinin yönetici olan çalışanlardan anlamlı derecede daha düşüktür. “Elektrik panolarında kaçak akım rölesi mevcuttur ve periyodik olarak kontrolleri yapılır.” ifadesine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık bulunurken (p<0,05); tren teşkil personeli olan çalışanların ifadeye katılım düzeyinin yönetici, idari personel ve elektrik işçisi olan çalışanlardan anlamlı derecede daha düşüktür. . “Yüksekte çalışmayı gerektiren durumlarda çalışma yerlerine uygun araç ve ekipman ile çıkılması sağlanır.” ifadesine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık bulunurken

($p < 0,05$); hava fren işçisi olan çalışanların ifadeye katılım düzeyinin yönetici olan çalışanlardan anlamlı derecede daha düşüktür.

Tablo 6. Görevlerine göre ifadelere katılım düzeyinin dağılımı (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

| | Görev | N | Ort. | Standart Sapma | F | p |
|---|-----------------------|------|------|----------------|-------|---------|
| Çalışma alanlarında işin etkin ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlayacak aydınlatma sistemi kullanılır. | Yönetici | 13 | 4,62 | 0,51 | 2,734 | 0,012* |
| | İdari Personel | 10 | 4,3 | 0,48 | | |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 3,39 | 1,24 | | |
| | Depo | 6 | 4,5 | 0,55 | | |
| | Elektrik işçisi | 31 | 3,97 | 1,14 | | |
| | Hava fren işçisi | 11 | 4,18 | 1,17 | | |
| | Alt bakım işçisi | 29 | 4,38 | 0,86 | | |
| Aydınlatma sisteminin devre dışı kalmasının çalışanlar için risk oluşturabileceği yerlerde ayrı bir enerji kaynağına bağlı acil aydınlatma sistemi bulunur. | Kaynakçı | 7 | 4,57 | 0,79 | 3,320 | 0,003** |
| | Yönetici | 13 | 4,62 | 0,51 | | |
| | İdari Personel | 10 | 4,3 | 0,48 | | |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 3,11 | 1,71 | | |
| | Depo | 6 | 4,5 | 0,55 | | |
| | Elektrik işçisi | 31 | 3,81 | 1,19 | | |
| | Hava fren işçisi | 11 | 4,55 | 0,52 | | |
| Çalışanlara kimyasalların kullanımı, tehlikeleri ve taşınmaları konularında eğitim verilir. | Alt bakım işçisi | 29 | 4,07 | 1,07 | 2,727 | 0,012* |
| | Kaynakçı | 7 | 4,43 | 0,79 | | |
| | Yönetici | 13 | 4,62 | 0,51 | | |
| | İdari Personel | 10 | 4,6 | 0,7 | | |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 3,5 | 1,34 | | |
| | Depo | 6 | 4,33 | 0,82 | | |
| | Elektrik işçisi | 31 | 3,94 | 1,0 | | |
| Kimyasallarla ilgili acil durumlar için göz ve vücut duşu mevcuttur ve çalışılan alana yakın mesafede bulunur. | Hava fren işçisi | 11 | 4,64 | 0,5 | 2,156 | 0,043* |
| | Alt bakım işçisi | 29 | 4,07 | 1,22 | | |
| | Kaynakçı | 7 | 4,71 | 0,49 | | |
| | Yönetici | 13 | 4,23 | 1,09 | | |
| | İdari Personel | 10 | 4,2 | 1,23 | | |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 3,17 | 1,2 | | |
| | Depo | 6 | 4,17 | 0,75 | | |
| Kolayca tutuşabilir ve patlayabilir tehlikeli kimyasallar birbirlerinden ayrı depolanır. | Elektrik işçisi | 31 | 3,71 | 1,07 | 2,248 | 0,035* |
| | Hava fren işçisi | 11 | 4,45 | 0,52 | | |
| | Alt bakım işçisi | 29 | 3,75 | 1,29 | | |
| | Kaynakçı | 7 | 4,29 | 0,76 | | |
| | Yönetici | 13 | 4,38 | 0,77 | | |
| | İdari Personel | 10 | 4,5 | 0,71 | | |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 3,39 | 1,29 | | |
| Çalışanlar, elektrikle çalışma riskleri konusunda bilgilendirilir. | Depo | 6 | 4,4 | 0,55 | 2,179 | 0,041* |
| | Elektrik işçisi | 31 | 4,03 | 0,87 | | |
| | Hava fren işçisi | 11 | 4,36 | 0,67 | | |
| | Alt bakım işçisi | 29 | 4,14 | 1,04 | | |
| | Kaynakçı | 7 | 4,43 | 0,79 | | |
| | Yönetici | 13 | 4,46 | 0,52 | | |
| | İdari Personel | 10 | 4,3 | 1,06 | | |
| Tren teşkil personeli | 18 | 3,44 | 1,29 | | | |
| Depo | 6 | 4,5 | 0,55 | | | |
| Elektrik işçisi | 31 | 4,16 | 0,82 | | | |
| Hava fren işçisi | 11 | 4,3 | 0,67 | | | |
| Alt bakım işçisi | 29 | 3,89 | 1,17 | | | |
| Kaynakçı | 7 | 4,57 | 0,53 | | | |

| | | | | | | |
|--|-----------------------|------|------|-------|--------|---------|
| Elektrik panolarında kaçak akım rölesi mevcuttur ve periyodik olarak kontrolleri yapılır. | Yönetici | 13 | 4,38 | 0,65 | 2,857 | 0,009** |
| | İdari Personel | 10 | 4,6 | 0,52 | | |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 3,39 | 1,14 | | |
| | Depo | 6 | 4,5 | 0,55 | | |
| | Elektrik işçisi | 31 | 4,23 | 0,88 | | |
| | Hava fren işçisi | 11 | 4,1 | 0,57 | | |
| | Alt bakım işçisi | 29 | 4,07 | 1,05 | | |
| Makine koruyucuları eksiksiz, tam ve faal konumdadır. | Kaynakçı | 7 | 4,57 | 0,53 | 2,617 | 0,015* |
| | Yönetici | 13 | 4,31 | 0,63 | | |
| | İdari Personel | 10 | 4,2 | 0,92 | | |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 3,11 | 1,23 | | |
| | Depo | 6 | 4,17 | 0,41 | | |
| | Elektrik işçisi | 31 | 3,81 | 0,83 | | |
| | Hava fren işçisi | 11 | 3,7 | 0,82 | | |
| Yüksekte çalışmayı gerektiren durumlarda çalışma yerlerine uygun araç ve ekipman ile çıkılması sağlanır. | Alt bakım işçisi | 29 | 3,43 | 1,4 | 2,366 | 0,027* |
| | Kaynakçı | 7 | 4,29 | 0,76 | | |
| | Yönetici | 13 | 4,54 | 0,52 | | |
| | İdari Personel | 10 | 4,6 | 0,52 | | |
| | Tren teşkil personeli | 18 | 3,78 | 0,88 | | |
| | Depo | 6 | 3,83 | 0,98 | | |
| | Elektrik işçisi | 31 | 3,81 | 1,01 | | |
| Hava fren işçisi | 11 | 3,4 | 1,35 | | | |
| Alt bakım işçisi | 29 | 3,82 | 1,09 | 2,366 | 0,027* | |
| Kaynakçı | 7 | 4,43 | 0,53 | | | |

Aynı mesleği yapma süresine göre dağılım incelendiğinde; Tablo 7.'de bulunan "Elektrik panolarına sadece yetkili kişilerin erişimi bulunur." ifadesine katılım düzeyinde anlamlı düzeyde farklılık bulunmaktadır ($p < 0,05$) ve H_6 hipotezi kabul edilmiştir. 11-15 yıl çalışan kişilerin ifadeye katılım düzeyi 6-10 yıl çalışan kişilerden anlamlı derecede daha yüksektir. Tablo 8.'de gösterilen ifadeler katılım düzeyinde iş kazası geçirme durumuna göre anlamlı düzeyde farklılık bulunmaktadır ve bu ifadede H_7 hipotezi kabul edilmiştir. İş kazası geçirmeyen çalışanların ifadelerine katılım düzeyi iş kazası geçiren çalışanlardan anlamlı derecede daha yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 9. incelendiğinde; ifadeler katılım düzeyi ramak kala olay yaşama durumlarına göre anlamlı düzeyde farklılaşmaktadır ($p < 0,05$) ve bu ifadelerde H_8 hipotezi kabul edilmiştir. Buna göre ramak kala olay yaşamayan çalışanlar ramak kala olay yaşayan çalışanlara göre daha olumlu bir algı düzeyine sahiptir.

Tablo 7. Aynı mesleğin yapıldığı süreye göre ifadeler katılım düzeyinin dağılımı (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

| | Meslek Süresi | N | Ort. | Standart Sapma | F | p |
|---|-----------------|----|------|----------------|-------|--------|
| Elektrik panolarına sadece yetkili kişilerin erişimi bulunur. | 0-5 yıl | 45 | 4,2 | 1,14 | 3,137 | 0,028* |
| | 6-10 yıl | 26 | 3,6 | 1,15 | | |
| | 11-15 yıl | 22 | 4,41 | 0,59 | | |
| | 16 yıldan fazla | 32 | 4,16 | 0,73 | | |

Tablo 8. İş kazası geçirme durumlarına göre ifadelere katılım düzeyinin dağılımı (*p<0,05; **p<0,01)

| | İş Kazası Durumu | N | Ort. | Standart Sapma | t | p |
|---|------------------|-----|------|----------------|--------|---------|
| Gürültülü ortama girmesi gereken çalışanların kulak koruyucusu takmalarına önem verilir. | Evet | 25 | 3,48 | 1,08 | -2,514 | 0,013* |
| | Hayır | 100 | 4,04 | 0,97 | | |
| Çalışma alanlarında işin etkin ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlayacak aydınlatma sistemi kullanılır. | Evet | 25 | 3,32 | 1,28 | -4,999 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,36 | 0,82 | | |
| Aydınlatma sisteminin devre dışı kalmasının çalışanlar için risk oluşturabileceği yerlerde ayrı bir enerji kaynağına bağlı acil aydınlatma sistemi bulunur. | Evet | 25 | 2,96 | 1,49 | -5,796 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,29 | 0,88 | | |
| Kimyasallar etiketli olarak muhafaza edilir. | Evet | 25 | 3,56 | 1,04 | -4,025 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,36 | 0,85 | | |
| Kimyasal atıklar uygun şekilde depolanır ve imha edilir. | Evet | 25 | 3,48 | 0,92 | -4,085 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,32 | 0,92 | | |
| Kimyasalların kullanıldığı alanda genel ve yerel havalandırma sürekli çalışır. | Evet | 25 | 3,36 | 1,08 | -3,939 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,23 | 0,97 | | |
| Çalışanlara kimyasalların kullanımı, tehlikeleri ve taşınmaları konularında eğitim verilir. | Evet | 25 | 3,32 | 1,18 | -4,821 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,36 | 0,9 | | |
| Kimyasallarla ilgili acil durumlar için göz ve vücut duşu mevcuttur ve çalışılan alana yakın mesafede bulunur. | Evet | 25 | 3,12 | 1,2 | -3,805 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,04 | 1,05 | | |
| Kolayca tutuşabilir ve patlayabilir tehlikeli kimyasallar birbirlerinden ayrı depolanır. | Evet | 25 | 3,2 | 1,12 | -5,886 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,34 | 0,79 | | |
| Kimyasalların bulunduğu ortamda aydınlatma ve havalandırma tertibatlarının alev geçirmez özellikleri bulunur. | Evet | 25 | 3,08 | 1 | -5,041 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,13 | 0,92 | | |
| Yangın söndürücülere kolay ulaşılabilir ve önünde ulaşılmasını engelleyecek malzemeler bulunmaz. | Evet | 25 | 3,96 | 0,93 | -2,944 | 0,004** |
| | Hayır | 100 | 4,46 | 0,71 | | |
| Acil çıkış kapıları atölyelerin görülebilir noktalarına konumlandırılmıştır. | Evet | 25 | 4,04 | 0,89 | -2,151 | 0,033* |
| | Hayır | 100 | 4,41 | 0,73 | | |
| Yangın ve patlama konularında çalışanlara eğitimler verilir. | Evet | 25 | 3,6 | 0,96 | -3,324 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,28 | 0,89 | | |
| Çalışanlar, elektrikle çalışma riskleri konusunda bilgilendirilir. | Evet | 25 | 3,28 | 1,14 | -5,001 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,3 | 0,84 | | |
| Elektrik panolarında kaçak akım rölesi mevcuttur ve periyodik olarak kontrolleri yapılır. | Evet | 25 | 3,36 | 1,15 | -5,181 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,34 | 0,75 | | |

| | | | | | | |
|--|-------|-----|------|------|--------|---------|
| Elektrik panolarına sadece yetkili kişilerin erişimi bulunur. | Evet | 25 | 3,48 | 1,16 | -3,687 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,27 | 0,89 | | |
| Makine koruyucuları eksiksiz, tam ve faal konumdadır. | Evet | 25 | 3,08 | 1,04 | -3,593 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 3,91 | 1,03 | | |
| Makine ve iş ekipmanlarının acil durdurma düğmeleri çalışanların ulaşabileceği konumda ve çalışır durumdadır. | Evet | 25 | 3,68 | 0,8 | -3,046 | 0,003** |
| | Hayır | 100 | 4,2 | 0,76 | | |
| Kesici veya delici nitelikteki el aletleri açıkta bulundurmamak şekilde koruyucu içerisinde muhafaza edilir. | Evet | 25 | 3,64 | 0,7 | -2,204 | 0,029* |
| | Hayır | 100 | 4,06 | 0,89 | | |
| Çalışmaya başlamadan önce kullanılan makine ve teçhizatlar operatörler tarafından kontrol edilir. | Evet | 25 | 3,08 | 1,08 | -3,286 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 3,89 | 1,1 | | |
| Çatlak, aşınma ve kırılma tespit edilen iş ekipmanları kullanım dışı bırakılır. | Evet | 25 | 3,12 | 1,3 | -4,673 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 4,14 | 0,88 | | |
| Yüksekte çalışmayı gerektiren durumlarda çalışma yerlerine uygun araç ve ekipman ile çıkılması sağlanır. | Evet | 25 | 3,52 | 0,87 | -2,490 | 0,014* |
| | Hayır | 100 | 4,06 | 0,99 | | |
| Bakım kanalı ve zeminle kot farkı bulunan yerlere güvenlik şeridi çekilerek çalışanlar düşmeye karşı uyarılır. | Evet | 25 | 3,36 | 1,11 | -1,968 | 0,049* |
| | Hayır | 100 | 3,86 | 1,13 | | |
| Çalışma platformlarındaki merdivenlerin yükseklik ve genişlikleri uygundur. | Evet | 25 | 3,48 | 1,05 | -2,043 | 0,043* |
| | Hayır | 100 | 3,95 | 1,02 | | |
| Zeminde düşmeye ve kaymaya neden olabilecek her türlü olumsuz durumun ortadan kaldırılması için gerekli önlemler alınır. | Evet | 25 | 2,76 | 1,27 | -4,079 | 0,001** |
| | Hayır | 100 | 3,84 | 1,15 | | |

Tablo 9. Ramak kala olay yaşama durumlarına göre ifadeler katılım düzeyinin dağılımı (*p<0,05; **p<0,01)

| | Olay Durumu | N | Ort. | Standart Sapma | t | p |
|---|-------------|----|------|----------------|--------|---------|
| Çalışma alanlarında işin etkin ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlayacak aydınlatma sistemi kullanılır. | Evet | 54 | 3,94 | 1,2 | -2,015 | 0,046* |
| | Hayır | 71 | 4,31 | 0,82 | | |
| Aydınlatma sisteminin devre dışı kalmasının çalışanlar için risk oluşturabileceği yerlerde ayrı bir enerji kaynağına bağlı acil aydınlatma sistemi bulunur. | Evet | 54 | 3,72 | 1,37 | -2,611 | 0,010* |
| | Hayır | 71 | 4,25 | 0,91 | | |
| Çalışanlara kimyasalların kullanımı, tehlikeleri ve taşınmaları konularında eğitim verilir. | Evet | 54 | 3,85 | 1,19 | -2,874 | 0,005** |
| | Hayır | 71 | 4,38 | 0,87 | | |

| | | | | | | |
|--|-------|----|------|------|--------|---------|
| Kimyasallarla ilgili acil durumlar için göz ve vücut duşu mevcuttur ve çalışılan alana yakın mesafede bulunur. | Evet | 54 | 3,61 | 1,16 | -2,124 | 0,036* |
| | Hayır | 71 | 4,04 | 1,1 | | |
| Kolayca tutuşabilir ve patlayabilir tehlikeli kimyasallar birbirlerinden ayrı depolanır. | Evet | 54 | 3,85 | 1,14 | -2,619 | 0,010* |
| | Hayır | 71 | 4,3 | 0,77 | | |
| Kimyasalların bulunduğu ortamda aydınlatma ve havalandırma tertibatlarının alev geçirmez özellikleri bulunur. | Evet | 54 | 3,7 | 1,04 | -2,094 | 0,038* |
| | Hayır | 71 | 4,09 | 0,98 | | |
| Yangın ve patlama konularında çalışanlara eğitimler verilir. | Evet | 54 | 3,94 | 0,96 | -2,040 | 0,043* |
| | Hayır | 71 | 4,29 | 0,91 | | |
| Çalışanlar, elektrikle çalışma riskleri konusunda bilgilendirilir. | Evet | 54 | 3,85 | 1,12 | -2,395 | 0,018* |
| | Hayır | 71 | 4,28 | 0,84 | | |
| Makine ve iş ekipmanlarının acil durdurma düğmeleri çalışanların ulaşabileceği konumda ve çalışır durumdadır. | Evet | 54 | 3,93 | 0,84 | -2,153 | 0,033* |
| | Hayır | 71 | 4,23 | 0,73 | | |
| Çatlak, aşınma ve kırılma tespit edilen iş ekipmanları kullanım dışı bırakılır. | Evet | 54 | 3,63 | 1,17 | -2,922 | 0,004** |
| | Hayır | 71 | 4,18 | 0,9 | | |
| Çalışma platformlarındaki merdivenlerin yükseklik ve genişlikleri uygundur. | Evet | 54 | 3,65 | 1,07 | -1,966 | 0,048* |
| | Hayır | 71 | 4,01 | 0,99 | | |
| Zeminde düşmeye ve kaymaya neden olabilecek her türlü olumsuz durumun ortadan kaldırılması için gerekli önlemler alınır. | Evet | 54 | 3,33 | 1,29 | -2,269 | 0,025* |
| | Hayır | 71 | 3,84 | 1,18 | | |

4. Sonuç

Dünyadaki gelişmelere paralel olarak Türkiye’de de demiryolları ile ulaşım günden güne gelişmektedir. Bu gelişme sektördeki istihdamı hızla artırmıştır. Demiryolu ağının büyümesi ve istihdamdaki artışla beraber sektördeki tehlikeler ve riskler de artmıştır. Dolayısıyla çalışanların sağlığı ve güvenliği ile ilgili araştırmalar önem kazanmıştır. Bu sebeple iş sağlığı ve güvenliğine yönelik çıkarılan kanun ve yönetmeliklerle birlikte sektörde iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarına daha fazla yer verilmeye başlanmıştır. Avrupa Birliği demiryolları güvenlik politikaları kapsamında olduğu gibi TCDD’nin iş sağlığı ve güvenliği alanında çıkartılması hedeflenen Demiryolu Emniyeti Yönetmeliği’nde çalışan sağlığı ve güvenliği konusunda kesin hükümlerin bulunması ve yer alacak hükümlerin anlaşılır ve yönlendirici olması gerekmektedir. Lokomotif Bakım Onarım Atölyeleri genelinde meydana gelebilecek tehlikeler ve risklerin kabul edilebilir düzeyde tutulabilmesi için Emniyet Yönetim Sistemi (EYS) ile tüm çalışanlar çalışma ortamındaki riskler ve yönetmeliğin gerektirdiği güvenlik önlemleri hakkında bilgilendirilmeli, görevleri alanında gerekli emniyetten sorumlu tutulmalı ve emniyet yönetmeliklerine uygun çalışmalıdır. İş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin yanı sıra çalışanların yaptıkları her işe özgü risklerle tehlikeleri, alınabilecek önlemleri, çalışanların uyması gereken kuralları içeren geniş kapsamlı eğitimlerle emniyetin sağlanarak sürdürülebilirlik devam etmeli ve emniyetin yükseltilmesi için çalışanların işe elverişliliği ve yeterlilikleri denetlenmeli ve desteklenmelidir. Çalışmada lokomotif bakım atölyelerinin genelinde çalışanların iş sağlığı ve güvenliği algılarının değerlendirilmesi sonucu; atölyelerde meydana gelebilecek riskler, atölyede çalışanların uyması

gereken kurallar ve emniyetin artırılması ile ilgili öneriler sunulmuştur. Bu kapsamda; lokomotif bakım atölyelerinde çalışanların iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yararlanabileceği bir rehber oluşturularak ilgili literatüre katkı sağlanmıştır.

Teşekkür

Çalışmanın uygulanması sırasındaki desteklerinden dolayı TCDD Taşımacılık A.Ş. çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmadaki desteğinden dolayı Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Garip GENÇ'e teşekkürü borç bilirim.

Kaynakça

- [1] B. M. Hutter, "Regulation and risk: Occupational health and safety on the railways". *Journal of Law and Society*, Vol. 28, No. 4, pp. 637-641, 2001
- [2] B. M. Hutter, Regulation and risk: Occupational health and safety on the railways. Oxford University Press on Demand, 2001
- [3] D. San Kim and W. C. Yoon, "An accident causation model for the railway industry: Application of the model to 80 rail accident investigation reports from the UK," *Safety Science*, vol. 60, pp. 57-68, 2013
- [4] A. Aka, B. Awuzie, F. Emuze, and A. A. Shittu, "Evaluating the effectiveness of strategies for implementation of health and safety programs on construction sites in Nigeria: A mixed-method study," *Journal of Safety Research*, vol. 85, pp. 172-181, 2023
- [5] F. Blanc, G. Ottimofiore, and K. Myers, "From OSH regulation to safety results: Using behavioral insights and a "supply chain" approach to improve outcomes—The experience of the health and safety Executive," *Safety Science*, vol. 145, pp. 105491, 2022
- [6] N. Chau, J. M. Mur, C. Touron, L. Benamghar, and D. Dehaene, "Correlates of occupational injuries for various jobs in railway workers: a case-control study," *Journal of occupational health*, vol. 46, no. 4, pp. 272-280, 2004
- [7] J. Dorrian, S. D. Baulk, and D. Dawson, "Work hours, workload, sleep and fatigue in Australian Rail Industry employees," *Applied ergonomics*, vol. 42, no. 2, pp. 202-209, 2011.
- [8] M. An, Y. Chen, and C. J. Baker, "A fuzzy reasoning and fuzzy-analytical hierarchy process based approach to the process of railway risk information: A railway risk management system," *Information Sciences*, vol. 181, no. 18, pp. 3946-3966, 2011
- [9] C. Park, J. Wang, Y. Cho, S. Kwak, and J. Park, "A Study on Development of Railway Accident Scenarios for Railway Workers," International Railway Safety Conference, Gyeonggi, Güney Kore, 2006, pp. 12-31
- [10] M. Holmgren, "Maintenance-related losses at the Swedish Rail," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 5-18, 2005
- [11] E. Akı, "6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve çalışma yaşamına etkileri," *Dokuz Eylül Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, vol. 15, pp. 3-24, 2013
- [12] A. Damat ve Z. Utlü, "İstanbul metro istasyonlarında iş güvenlik uygulamaları," *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, no. 8, pp. 52-69, 2018
- [13] E. Mısırlı, "Serbestleşme sonrası demiryollarında emniyet yönetimi," *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, no. 5, pp. 53-56, 2017
- [14] D. Koçak, "Demiryolu çalışmalarında iş sağlığı ve güvenliği vagon bakım onarım atölyesi risk değerlendirmesi örneği," Çalışma ve sosyal güvenlik eğitim uzmanlığı tezi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Türkiye, 2014

Özgeçmiş**Songül DİREK**

1988 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Adnan Menderes Üniversitesinde tamamlamıştır. İstanbul Gedik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programını tamamlamıştır.

E-Posta: songuldirek1988@gmail.com

**Fatih YALÇIN**

Petrogas Industry-PGI Endüstriyel Sistemler İmalat ve Mühendislik A.Ş.'de çalışmaktadır. 1991-2005 yılları arasında Marmara Üniversitesi, 2010-2022 yılları arasında İstanbul Gedik Üniversitesinde öğretim üyesi ve yönetici olarak görev yaptı. Tamamlanmış 15 adet Yüksek Lisans tezi yürütmüş olup, 3 doktora tez danışmanlığı devam etmektedir. Yayınlanmış ulusal ve uluslararası yayınları, tamamlanmış projeleri bulunmaktadır. 1994 yılında, Marmara Üniversitesi senatosu tarafından, Yılın Üstün Başarılı Öğretim Elemanı seçilmiştir.

E-Posta: fatih.yalcin@pgindustry.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Türkiye’de Tam Otomatik Sürücüsüz Anahat Treni Çalıştırılmasında Olası Fırsatlar ve Tehditler

Üsame EKİCİ¹, Mehmet Emin AKAY²

¹ Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Strateji Geliştirme Başkanlığı, Ankara, Türkiye

² KBÜ Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Programı, Karabük, Türkiye

*usameekici@gmail.com

(Alınış/Received: 18.10.2023, Kabul/Accepted: 23.11.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Çeşitli teknolojik gelişmeler yaşandıkça insan gücüne daha az ihtiyaç duyulacağı aşırıdır. Bu bağlamda, sürücüsüz trenler demiryolu endüstrisindeki son başarı olarak görülmektedir. Sürücüsüz trenler insan hatalarından kaynaklanan kazaların önlenmesinde, seferlerin dakikliği ve sıklığını artırmada, enerji tüketiminin ve insan işgücü maliyetinin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Öte yandan işçi sendikalarının neredeyse tamamı, demiryolu işçilerinin işlerinden uzak tutulmasına ve otomasyona geçilmesine karşı çıkmaktadırlar. Ayrıca demiryolu hattı yakınındaki potansiyel tehlikeler iyi eğitilmiş sürücüler tarafından görülebilmekte fakat bazen engel algılama özelliğine sahip olmasına rağmen bilgisayarlar tarafından tespit edilememektedir. Ayrıca tam otomatik sistemler siber saldırılara karşı savunmasızdır ve çok iyi korunması gerekmektedir. Bununla birlikte psikolojik araştırmalar, yolcuların trende herhangi bir görevli göremedikleri zaman kaygılandıklarını ve bu durumun insanların yolculuklarının konfor seviyesini düşürdüğünü göstermektedir. Bu çalışmada, ana hat trenlerinin sürücüsüz çalıştırılmasının avantaj ve dezavantajları ayrıntılı olarak verilmekte olup mevcut sürücüsüz metro trenlerinin daha derinlemesine izlenip analiz edilerek deneyim kazanılması konusunda önerilerde bulunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Sürücüsüz tren, Tam otomasyon sistem, Şehirlerarası tren yolculuğu, Yüksek hızlı tren, Türkiye

Possible Opportunities and Threats in Operating a Fully Automatic Driverless Mainline Train in Türkiye

Abstract: As there have been various technological improvements, human power is going to be less needed. Driverless trains are seen to be the latest achievement in railway industry. They prevent trains from accidents caused by human errors. Additionally, they increase punctuality, frequency and decrease energy consumption and human labour cost. On the other hand, almost all the worker unions are against keeping railway workers out of their works or switching to automation. Also, the potential dangers near the railway track can be seen by well-trained drivers but sometimes cannot be detected by computers although they have obstacle detection. Also, fully automated systems are vulnerable to cyber-attacks and must be protected very well. Besides, psychological surveys show that passengers get anxious when they cannot see any officer in train, so it makes people travel less comfortable. In this study, advantages, and disadvantages of running mainline trains driverless are given in detail, and suggestions are made on that the existing driverless metro trains should be watched and analyzed more also deeply to gain experiences.

Keywords: Driverless train, Fully automated system, Intercity rail travel, High speed rail, Türkiye

1. Giriş

İlk demiryolunun kullanılmaya başlanmasından bu yana demiryolu teknolojisinde birçok gelişme yaşanmıştır. En son gelişmelerden biri, içinde hiçbir insan tarafından kontrol edilmesine gerek duyulmadan çalışabilen bilgisayar kontrollü trenlerdir. Bu çalışmada ana hat demiryolu trenlerinin gözetimsiz mod tipinde çalıştırılmasının avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmaktadır.

Atıf için/Cite as: Ü. Ekici, M.E. Akay, “Türkiye’de tam otomatik sürücüsüz anahat treni çalıştırılmasında olası fırsatlar ve tehditler,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 109-120, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1377604

Otomasyon son zamanlarda oldukça yaygın şekilde toplu taşıma ve yüksek hızlı raylı sistemlerde kullanılmış ve benimsenmiştir. Sürücü kontrollü trenlere göre tepki sürelerini azaltarak üretkenliği artırdığı için yüksek oranda toplu taşıma kullanımına sahip şehirler otomasyondan en fazla faydayı sağlamaktadırlar. Bu yenilik için geçerli ticari gerekçelerin mevcut olmaması nedeniyle, şehirlerarası demiryolu yük taşımacılığının otomasyonu benimsemesi daha yavaş olmuştur. Şehirlerarası demiryolu yük taşımacılığının otomasyonunun başlıca örnekleri Fransa'daki LGV Est ve Avustralya'daki Rio Tinto AutoHaul™'dir [1].

Tamamen sürücüsüz bir tren işletimi için düzenleyici çerçeveyi oluşturmak zordur. Bununla birlikte, platform ekran kapıları arasında kalan yolcuları tespit etmek, izinsiz girişlere engel olmak ve iklimle ilgili sürüş koşulları gibi işlevler bazen tam anlamıyla sağlanamayabilir. Dolayısıyla güvenlik ve risk analizi çabaları, bu tür temel teknik ve işlevsel değişiklikler ışığında ilgili riski tanımlama ve analiz etme konusunda zorlukla karşı karşıya kalmaktadır [2].

Demiryolu sistemlerinde yeni teknolojilerin sayısının artmasıyla bilgisayar tabanlı sistemlerle çalışan trenlerin sayısında da artış olmaktadır. Birçoğu hala bir personele ihtiyaç duysa da, bazıları tamamen otomatiktir ve herhangi bir insana ihtiyaç duymaz.

1.1. Otomatik tren sistemlerinin türleri

Otomatik Tren İşletimi (ATO-Automatic Train Operation), çeşitli otomasyon seviyelerini içerir ve Yarı Otomatik Tren İşletimi (STO- Semi-automated Train Operation), Sürücüsüz Tren İşletimi (DTO- Driverless Train Operation) ve Gözetimsiz Tren İşletimi (UTO- Unattended Train Operation) olarak çeşitlenebilir [3].

- ~ Sürücü kontrollü modda trenler, herhangi bir yardım sistemi olmaksızın bir insan tarafından sürülmektedir. Trenin istasyonlarda görünen sinyallere göre sürülmesinden makinist sorumludur.
- ~ Yarı otomatik modda, tren makinist tarafından manuel olarak çalıştırılmakla birlikte otomatik sürüş sistemi tarafından kontrol edilmektedir. Bilgisayarlar 2 istasyon arasındaki hareket, frenleme, durdurma ve kapıların açılmasından sorumludur.
- ~ Sürücüsüz modda herhangi bir insan yardımına ihtiyaç duyulmamaktadır. Otomatik sürüş sistemi trenin çalıştırılması için tüm ihtiyaçları karşılarsa da herhangi bir acil duruma karşı bir görevli hazır bulunmaktadır.
- ~ Gözetimsiz modda, sistem aynı zamanda trenin çalıştırılması, durdurulması, kapıların açılması, kapatılması, hatta trenlerin bağlanması ve ayrılmasından da sorumludur. Ancak trende personel bulunmaz [4].



Şekil 1. (a) Paris metro hattındaki, (b) Paris havalimanı servisindeki sürücüsüz tren (Fotoğraflar yazar tarafından çekilmiştir.)

1.2. Sistem nasıl çalışıyor?

Otomatik trenler “Hareket Otoritesi” prensibine göre çalışmakta olup, raylı araç ile yol kenarındaki ekipmanlar arasında kablosuz bağlantı bulunmaktadır.

Tüm otomatik CBTC-Communication Based Train Control (İletişim Tabanlı Tren Kontrolü) sistemleri aynı süreçte çalışır [4]:

- Öncelikle her tren için yol kenarındaki bir bilgisayar tarafından doğru hareket yetkisi hesaplanır.
- Tam otomatik mod’da trenler, hattın kilitlemelerle kontrol edilmesi ve korunmasıyla birlikte ATC-Automatic Train Control (Otomatik Tren Kontrolü) tarafından çalıştırılır.
- Yol kenarındaki bilgisayarlar, kontrol merkezi bilgisayarları ve tren içi bilgisayarlar arasında telsiz yoluyla bilgi alışverişi vardır.
- Trende ATO-Automatic Train Operation (Otomatik Tren İşletimi) sistemi trenin hız kontrolünü yaparak, makinistin hata yapmasını önler.
- ATO bilgisayarı ATP-Automatic Train Protection (Otomatik Tren Koruması) sistemi tarafından izlenir ve ihtiyaç halinde onarılır.

1.3. Tam otomatik sistemlerin tarihçesi

İlk ATO sistemi Barselona Metro Hattı üzerinde 1963 yılında faaliyete geçmiştir. İkincisi ise 1968 yılında işletilen Londra Metrosu'nun Victoria Hattında açılmıştır. Sürücü yalnızca kapıların açılıp kapanmasından sorumlu olup tüm güzergâh bilgisayarlar tarafından işletilmektedir. Ancak tamamen sürücüsüz ilk sistem 1998 yılında Paris Metro Hattı 14'te uygulamaya konulmuştur. Trende personel bulunmamakta ve tren sanki kendi kendine hareket etmektedir [5].

Tam otomatik yüksek hızlı trenin ilk örneği yakın geçmişte Çin'de görülmeye çıkmıştır. 30 Aralık 2019'da yeni demiryolu hattındaki ilk tren Pekin Kuzey Tren İstasyonu ile Taizicheng Tren İstasyonu arasında sefer yapmıştır. Çin'in Fuxing tasarım serisinden olan bu araç, dünyada bir ilk olarak sürücüsüz olarak 350 km/saat (217 mil/saat) hıza ulaşabilmektedir. Aynı zamanda dünyanın ilk akıllı yüksek hızlı demiryolu olarak da bilinmektedir. Güzergahtaki yüksek hızlı trenlerin otonom yapısına rağmen her zaman bir gözlemci makinist bulunmaktadır. Trenler otonom olarak istasyonlar arasındaki çeşitli hız düzenlemelerine göre başlama ve durma gibi hareketlerinde uyum sağlayabilmektedir [6].

2. Literatür Taraması

Tang ve diğerleri., (2022) çalışmalarında demiryolu taşımacılığında yapay zekanın nasıl uygulanabileceğine dair sistematik bir literatür incelemesi yapmışlardır. Bütünsel bir demiryolu perspektifinden yola çıkarak; bakım ve denetim, planlama ve yönetim, emniyet ve güvenlik, otonom sürüş ve kontrol, gelir yönetimi, ulaşım politikası ve yolcu hareketliliği gibi alt alanları kapsayan 2010'dan Aralık 2020'ye kadar olan dönemi içerisine alan yaklaşık 139 bilimsel makale incelenmiştir. Demiryolu bakımı ve denetimi için yapay zekâ alanında büyük araştırma çabası harcanırken, demiryolu taşımacılığı politikası ve geliri için yapay zekâ (AI-Artificial Intelligence) konusunda ise çok sınırlı araştırma bulunduğu görülmüştür. Sonuçta AI alanına eğilmek, demiryolu taşıma otomasyonu için belirsizlikle başa çıkmaya ve yeni yükselen siber güvenlik sorunlarının üstesinden gelmeye yönelik çalışmalar gerektirmektedir [7].

Moreno ve diğerleri., (2015) makalelerinde, kablosuz/telsiz haberleşmesi sayesinde demiryollarında ERTMS-European Rail Traffic Management System (Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi) sisteminin metrolarda da CBTC sistemlerinin uygulanabildiğini, bu sayede taşımacılığın; verimli, güvenli ve kârlı duruma geldiğini vurgulamışlardır. Bu amaçla yapılan uygulamalardan birisi de aynı hat üzerinde birbirini takiben seyir yapan yük trenlerine “sanal küplör - virtual coupling” uygulanmasıdır. Bu radyo haberleşmesi teknolojisi sayesinde trenler “tek bir katar gibi” kabul edilerek, birbirlerini “fren mesafelerinden de kısa” bir takip mesafesiyle izlemekte ve böylece hat kapasitesi (tren/gün) artmaktadır [8].

Xun ve diğerleri., (2022) çalışmalarında “sanal küplörün - virtual coupling (VC)” uygulanabilirliğini incelemişlerdir. VC uygulamasında trenden trene veri aktarımıyla, hattın kapasitesini arttırmak amaçlanmıştır. Makale ilk önce; tren takibi, geri bildirim kontrolü, optimum kontrol ve hesaplamalı akıllı yöntem olarak dört kategoriye ayrılan tren operasyon kontrolü hakkındaki mevcut teorik araştırmayı incelemiş, daha sonra “senaryo analizi yöntemine dayalı olarak” Avrupa ve Çin'deki projeler incelenmiş olup risk sermayesi operasyonunun tüm sürecinde beş genel senaryo ve iki acil durum senaryosu sıralanmıştır. Daha sonra ise farklı senaryolarda VC'nin performansını değerlendirmek için performans göstergelerinin (PI'ler) listesi önerilmiştir [9].

Bešinović ve diğerleri., (2021) makalelerinde Yapay Zekanın (AI), temel kavramlarını ve olası uygulamalarını demiryolu akademisyenlerine ve uygulayıcılara tanıtmayı amaçlamışlardır. Bu yöntemle araştırmacılara ve uygulayıcılara rehber olacak bir taksonomi (sınıflandırma sistemi) sunulmaktadır. Hem genelde hem de demiryolu uygulamalarıyla ilgili yapay zeka teknikleri, araştırma alanları, disiplinleri ve uygulamaları otonom sürüş, bakım ve trafik yönetimi gibi demiryollarında Yapay Zeka'nın açıklanabilen önemli yönleri tanıtılmaktadır [10].

Ning ve diğerleri., (2004), “Computers in Railways IX” adlı makalelerinde, CTCS (Çin Tren Kontrol Sistemi) kavramını teknik olarak değerlendirmişlerdir. Ülkede 71.500 kilometreyi aşan demiryolu şebekesinde, altıdan fazla tür demiryolu sinyal sistemi bulunmakta olup bu durum işletme zorlukları doğurmaktadır. Tıpkı AB (Avrupa Birliği) ülkelerinde olduğu gibi, ETCS sistemine benzer bir ortak sinyal sisteminin temel gereklilikleri, sinyal yönetim sisteminin teknik standardı incelenmiştir. Sonuçta CTCS sisteminin Level 0-4 arası 5 farklı sistemle yapılması gerektiği belirtilmiştir. Level 0 sistemi konvansiyonel hatlarda uygulanmakta, ray devreleri, sinyal lambaları ve kabin içi bilgilendirme elemanlarından oluşmakta ve 120 km/sa hızın altındaki taşımalarda kullanılmaktadır. Level 1 sisteminde, balizler ve ATP elemanları bulunur ve sistem 120 km/sa - 160 km/sa hızlar arasında uygulanır. Sistemde hat yanındaki sinyal ışıkları yoktur, trenin yönetimi ve hızların uygulanması ATP sistemi tarafından yapılır. Level 2 işletimi 160 km/sa hızı aşan demiryollarında uygulanmaktadır. Balizler ve ATP elemanlarıyla birlikte sayısal devre elemanları bulunur. Trenler arası mesafe, hız ve fren komutları ATP tarafında tayin edilir. Level 3 işletiminde, balizler, ATP, sayısal devre elemanları ve GSM-R bulunur. Tren bilgi ve

kontrollerini GSM-R yönetir. Sistemde “sabit blok” uygulaması geçerlidir. Level 4 uygulaması en gelişmiş sistem olup, ardışık trenlerin “kayar blok” şeklinde yönetimine dayanır. Sistemi GSM-R yönetir ve ray devreleri yalnız istasyonlarda kullanılır [11].

Singh ve diğerleri., (2021) çalışmalarında otonom trenlerdeki (OT) eğilimler ve karşılaşılan zorlukları incelemişler, otonom tren uygulamalarında görülen olguların; artan yolcu ve yük taşımacılığı talebi, güvenlik sorunları, insan hataları ve artan sıklığı şeklinde oluştuğunu görmüşlerdir. OT'nin uygulanabilmesi için gerekli teknik donanımın; yüksek hızlı internet (5G) teknolojisi, nesnelerin interneti, özel kısa menzilli iletişim, dijital video algılama kameraları ve yapay zekâ tabanlı yöntemler gibi yapılardan oluşması gerektiğini belirtmişlerdir [12].

Kera ve diğerleri (1999) makalelerinde, 21. Yüzyılın demiryolu taşımacılığı trendleri araştırmalarında; güvenli ve verimli taşımacılık, yüksek ticari etkinlik, artan müşteri memnuniyeti, çevreye uyumluluk, yüksek taşıt teknolojisi, ileri haberleşme ve sinyalizasyon sistemleri, yüksek verimli güç sistemleri konularında yoğunlaşma tespit etmişlerdir. Bu araştırmalarla çerçevelenen demiryolu taşımacılığında, “ATOS - Autonomous Decentralized Transport Operation Control System” adıyla “otonom desentralize operasyon kontrol sistemi” mantığı öne çıkmıştır. Bu yaklaşım, önce Shinkansen trenlerinde Computer-Aided Traffic Control (COMTRAC) adıyla uygulanmış, daha sonra da 21. Asır için COSMOS (Computerized Safety, Maintenance and Operation Systems of Shinkansen) adıyla geliştirilmiştir. Bu sistemler sayesinde hem yüksek taşıma verimi hem de depremsellik tehlikesi karşısında güvenli bir tren seyri sağlanmaktadır [13].

Muniandi (2020) “Blockchain-enabled virtual coupling of automatic train operation fitted mainline trains for railway traffic conflict control” başlıklı makalesinde, blockchain uyumlu sanal kablör uygulamasıyla otomatik tren işletiminin esaslarını incelemiştir. Araştırmada blockchain veri tabanı ve yedi farklı sanal kablör varyansları sayesinde otomatik tren işletimi sanal olarak eşleştirilmiş ve senkronize edilmiştir. Son olarak, simülasyon sonuçları ve teorik önerilen sistem ve yöntemin yeterliliğini doğrulamak için çeşitli vaka çalışmaları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir [14].

Singh ve diğerleri., 2022, makalelerinde nesnelerin internetinin (IoT) yardımıyla 21. Asır tren operasyonlarında, yönetiminde, bakımında, video gözetiminde ve hemzemin geçitlerde güvenlikte kullanılacak çeşitli IoT teknolojilerinin kapsamlı bir bütünsel araştırmasını gerçekleştirmektedir. IoT internet teknolojisi aracılığıyla küresel olarak birbirine bağlanan ve ilgili verileri toplayıp paylaşabilen çok sayıda cihazı belirtmektedir. Bu sayede IoT, uzun vadeli evrim (LTE) teknolojisi, beşinci nesil (5G) teknolojisi, kablosuz sensör ağları (WSN) ve diğerleri gibi sensörler, ağlar ve iletişim teknolojileri alanında önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Teknolojik gelişmelerin yanı sıra, IoT'nin tamamen gömülü çalışabilmesi, gerçek zamanlı veri toplaması, fiziksel parametreleri tahmin etmesi, toplanan verilere dayalı karar vermeyi kolaylaştırması, çeşitli ağların (örn. ağlar (LAN), düşük güçlü geniş alan ağı (LPWAN), hücreli LPWAN), demiryolu endüstrisindeki ve diğer uygulamaları için büyük fırsatlar sağlamıştır [15].

Zhong, ve diğerleri., 2021, “Internet of things for high-speed railways” isimli makalelerinde, nesnelerin internetinin (IoT) yüksek hızlı demiryollarına (HSR) entegre edilmesini incelemişlerdir. HSR işletiminin daha da gelişebilmesi için IoT bağlamında bir sistem mimarisi önermektedirler. IoT'nin HSR üzerinde uygulanabilmesi için sayısallaşmış taşımacılık teknolojisi, iletişimi şebekesinde karşılıklı etkileşim ve akıllı işletim sistemi olmak üzere 3 temel fonksiyona ihtiyacı vardır. Taşımacılık teknolojisinin sayısallaşması, HSR donanımını, işletim fonksiyonlarını, hat özelliklerini ve çevresel durumu gerçek şartlarda canlandırmaktadır. Şebeke elemanlarının karşılıklı etkileşimi ise insan, teknik donanım ve çevresel ortam arasında etkili iletişim kurarak, güvenli tren işletimi ve bakımını sağlar. Akıllı tren işletim sistemi sayesinde;

büyük veri (big data), AI, mikro servis mimarisi ve diğer teknolojilerle uygulamaların yapılması mümkün olur [16].

Wajima ve diğerleri., 2005, “Leading-edge Solutions for Next-generation Railway Systems” isimli makalelerinde, bilişim teknolojisi - BT kullanarak, daha gelişmiş tren uygulamalarını Nanakuma Metro Hattı sistemini ve Tsukuba Ekspres demiryolu sistemi bağlamında araştırmışlardır. Daha gelişmiş bir demiryolu sistemi için A tipi geliştirilmiş tren (The Evolving A-train) ve geliştirilmiş BT sistemine sahip yapı (B-system) gibi iki ana donanım gereklidir. A tipi geliştirilmiş tren konsepti İngilizce 4A olan; Advanced (Gelişmiş), Amenity (Rahatlık), Ability (Kabiliyet) ve Aluminum (Alüminyum) kavramlarının trendeki bileşimidir. Bu bileşim BT ve ileri kontrol sistemleriyle birleşince, daha yüksek kabiliyetli Broadband Era-geniş bant iletişim sistemi tren işletimi gerçekleşecektir. Bu iki konsept sinyal sisteminde D-ATC-Digital Automatic Train Control (Dijital Otomatik Tren Kontrolü) ve elektronik işletim konsolları donanımlarıyla birleşince, tam otomatik tren sistemi uygulanabilecektir [17].

Junting ve diğerleri., 2016, makalelerinde, 5 seviyeli Avrupa Tren Kontrol Sistemleri (ETCS) ile Çin Tren Kontrol Sistemlerini (CTCS) karşılaştırarak, gelecekteki Çin tren kontrol sisteminin gelişme yönüne dikkat çekmektedirler. Bu amaçla önce ETCS sisteminin kapsamındaki; NGTC, SHIFT2RAIL, Pozitif Tren Kontrolü, Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi-Bölgesel ve Urbalis Fluence sistemlerinin yapısı ve özellikleri analiz edilmiştir. Daha sonra, yeni nesil Çin tren kontrol sistemi (NGCTCS) incelenmiştir. Bu sistem hareket eden bloktan oluşan üç temel teknolojiye ve trenden tren bilişsel radyo (CRT2T) iletişimi ve birleşik konumlandırmadan oluşmaktadır. NGCTCS'nin yapısı içinde bir sistem şeması, kombine konum teknolojisine dayalı bir tren merkezli tren kontrol sistemi ve CR-T2T iletişim sistemi önerilmiştir [18].

Fraga-Lamas ve diğerleri., 2017, çalışmalarında, Endüstriyel Nesnelerin İnterneti teknolojisi (IIoT) ve iletişim teknolojilerinin tren otomasyonlarındaki uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Otomasyonlu trenler için LTE, 5G, IEEE 802.11ad gibi geniş bant iletişim sistemleri ile Kablosuz Sensör Ağlarının (WSN'ler) kullanımı gereklidir. Bu teknolojik uygulamalara ilaveten, kestirimci bakım, akıllı altyapı, gelişmiş varlık izleme, video gözetim sistemleri, demiryolu operasyonları, yolcu ve yük bilgi sistemleri (PIS/FIS), sinyalizasyon sistemlerinde siber güvenlik ve enerji verimliliği de gerekli olmaktadır [19].

Küçük (2019), Demiryollarında Arıza Durumunda Otonom Trenler için Yedek Sistem Tasarlanması isimli makalesinde, ATO sisteminin seçilen arızalar için şimdiki ve gelecekteki “Yedek Sistem” yöntemlerini tanımlamıştır. Bu amaçla olası arızaların bir listesi yapılarak, bunların işletmeye olan etkileri analiz edilmiş, mevcut sistem ile otonom trenler için yedek sistemin nasıl tasarlanıp, ne şekilde kullanılacağı UML-Unified Modelling Language (Birleşik Modelleme Dili) diyagramları ile tanımlanmıştır. ATO sistemi için gerekli değişiklikler de bu çalışmada incelenmiştir. Çalışmanın sonucuna göre bugünkü sisteme kıyasla ATO sistemine gelecekte daha teknolojik yeni parçaların eklenmesi gerekmekte olduğu, ayrıca tren sürücüsü tarafından üstlenen bazı görevlerin büyük bir kısmının sensörler yardımıyla ATO sistemine aktarılabilmesi tespit edilmiştir. Ancak çelişkili durum ve insana özgü deneyimlerin sisteme aktarılabilmesi için bir tür “yapay zekâ” algoritmaları kullanılarak yazılım geliştirilmelidir [20].

Arlı (2013), Otomatik metro sistemleri, isimli bildirisinde metro otomasyon sistemlerini, sinyal korumalı (ATP), yarı otomatik (ATO), denetimli tam otomatik (DTO) ve denetimsiz tam otomatik (UTO) olarak 4 kategoride belirtmiştir. Ulaştırma sisteminin bütününe yöneten ATS sistemi (automatic train stopping), mevcut tarifeye göre, sistem çalışmasını iyileştirmek ve dengelemek amacıyla tren hareketlerini izleyen ve yöneten sistemdir. Sistemin işletim ve denetimi, tüm metro ray ağını, onu diğer ağlarla birleştiren tüm bağlantı ve arayüzler ile görüntüler Tren Kontrol Merkezinde (TCC) görünmektedir. ATP sisteminin ana görevi çerçevesinde güvenle ve hatasız bir usulle trenleri kumanda etmek ve sadece uygun bir İlerle Komutu tarafından

yetkilendirildiğinde, trenlerin hareket ettirilebilmesi sağlanmaktadır. ATO istasyona yaklaşan trenin nerede duracağını belirler. Bu sistem ATP, ATO ve ATS sistemlerinin bileşiminden oluşan ve dünyada otomatik olarak işletilen demiryolu mimarisini tanımlamak için kullanılan bir kontrol sistemidir. DTO sisteminde araçlarda veya peronlarda tren görevlisi bulunur. Aracın hızlanma, hızlı seyir, tahriksiz ilerleme, hız kesme, durma, kapı açma ve kapama işlevleri otomatik olarak yapılır. Olumsuz bir durumda işletme ve tren arızalarına müdahale, kontrol merkezinden trafik operatörünce gerçekleştirilir. UTO sistemi tam otomatik sürücüsüz bir metrodur. Aracın hızlanma, hızlı seyir, tahriksiz ilerleme, hız kesme, durma, kapı açma ve kapama işlevleri otomatik olarak yapılmaktadır. Olumsuz durumda işletme ve tren arızalarına müdahaleyi, trafik operatörü yapmaktadır. Otomasyon işlemi metrolarda; treni hareket ettirme, durdurma, kapı komutları ve aksaklık durumunda işletme olarak 4 türde gerçekleşir. Bu durumun tam otomatik metro veya tren işletmesine uygulanabilmesi için Engel algılama, Yangın algılama, Acil durum freni (EB) Başlatma ve Resetleme, Trenin durum ve alarm bilgisinin TCC'ye iletilmesi, Yolcu tahliyesi, Kritik Cihazların Yedekliliği, Otomatik canlandırma ve test, Platform kapılar (PSD), otomatik araç yıkama, Araç üstü CCTV sistemi, Merkezi telsiz kontrol sistemi, Araç üstü çift yönlü telefon haberleşme sistemi gibi donanımlar da gereklidir [21].

Demir (2014) yüksek lisans tezinde, Radyo Frekanslı Kimlik Tanımlama (RFID) Sistemi ile Tren Konum Tespiti üzerine çalışmıştır. Raylı sistemlerde tren işletimi, “güvenli tren ayırımı” yapmaya yarayan, sistemdeki trenlerin pozisyonları, hattaki önceden tanımlanmış ekipmanlar ve tren üzerinde bulunan araç üstü sinyal donanım yardımıyla gerçek zamanlı olarak tespit edilmektedir. Sistem ardışık Tren1 ve Tren2'nin hız ve konum bilgileri ışığında, Tren2'ye bir hedef noktası verir. Tren2, VCC'den aldığı bu komut doğrultusunda ilgili alana geldiğinde yavaşlamaya başlar ve kendisine verilen hedef noktasında, bir güvenlik mesafesinde durur. Güvenlik mesafesi; gerçek işletme hızlarına, frenleme eğrilerine ve trenlerin tahsisli yoldaki yerlerine göre dinamik olarak hesaplanır. Araçlar arasında her zaman bir güvenlik mesafesi bulunur. Bu mesafe, bir trenin komut verilen durma noktası ile öndeki trenin arkasının doğrulanmış konumu arasındaki mesafedir. Bu mesafe, birkaç tane en kötü durumun peş peşe ortaya çıkması hâlinde dahi, güvenli işletmenin yapılabilmesine imkân sağlayacak şekildedir [22].

Yüksel ve Erçoşkun (2023) “Akıllı ulaşım sistemlerinde otonom araçlar ve kente etkileri” isimli çalışmalarında, bu teknolojinin kullanılmasının kentsel yararları etüt edilmiştir. Örnek olarak kentlerde bünyesindeki bilgisayar yazılımı ve donanımı sayesinde “sanal ray” denilen beyaz çizgiler üzerinde tekerlekleriyle hareket eden, sensörler ile yolun boyutlarını algılayan ve otonom bir şekilde kendi rotasını oluşturabilen bir otonom raylı hızlı transit (ART) belirtilmiştir. Bu sistemlerin donanımı ve yazılımı; sabit ve hareketli nesnelere algılayan “LİDAR”, araçları, çevredeki cisimleri ve hızlarını algılayan “kısa ve uzun menzilli radarlar”, geniş görüş açısında hareketli objeleri algılayan “çevre radarı” ve görüntü işleme ile cisimleri sınıflandıran “video kamera” ile donatılmıştır [23].

Rodriguez (2015) makalesinde kentsel raylı sistemlerdeki ATO işletiminde, tren yük değişimi ve gecikmelere bağlı olarak sağlıklı ve enerji verimli hız profiline tasarlanmasını araştırmıştır. Önce tren yükündeki değişiklikler için ATO hız profillerinin optimal Pareto analizi çalışma süresi ve enerji tüketimi için oluşturulur. Sağlam bir optimizasyon tekniği ile de hız profillerinin şeklinin korunmasına (model sağlamlığı) dayanan alternatif bir yöntem karşılaştırılmıştır. Her iki prosedür de MOPSO (Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu) algoritmasını kullanır. Daha sonra ATO ekipmanında programlanacak hız profilleri seti, bir optimizasyon modeli aracılığıyla sağlam Pareto cephesinden seçilir. Bu model, hattaki gecikmelerle ilgili istatistiksel bilgileri dikkate alarak toplam enerji tüketimini en aza indiren bir Parçacık Sürü Optimizasyon algoritmasıdır (PSO). Bu prosedür bir vaka çalışmasına uygulanmıştır. Sonuçlar, yolcular için daha rahat olan şekiller hakkında bilgi sağladığından, desen sağlamlığının sağlam optimizasyon tekniğine göre daha kısıtlayıcı ve anlamlı olduğunu göstermiştir. Önerilen seçim modeli tarafından gecikmelerle ilgili istatistiksel verilerin kullanılması, % 3-14 arasında ek enerji tasarrufu sağlamaktadır [24].

Brenna ve diğerleri (2016.) çalışmalarında elektrikli demiryolu taşımacılığında uygulanan sürücüsüz metrolardaki; ATC, ATP ve ATO otomasyon sistemleri genetik algoritmalar yönünden incelemiştir. Genetik algoritmalar, sezgisel arama ve yinelemeli stokastik yöntemler olup optimizasyon problemlerine kesin veya yaklaşık çözümler bulmakta kullanılan hesaplama yöntemleridir. Burada optimizasyon süreci hesaplanmış ve özel bir Matlab kodunun uygulanması yoluyla Milano'daki gerçek bir metro hattında test edilmiştir. Bu şekilde tanımlanan algoritma sayesinde, tren hareketi optimize edilmiş, böylece enerji tüketimi asgariye indirilerek, trenin saat tarifi düzenlenmiştir [25].

Miyatake ve Ko, (2010) tarafından yapılan çalışmada demiryolu sistemlerinin enerji tüketimini asgariye indirecek optimum bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bazı enerji tasarrufu sağlayan tren hız profillerinin bulunmasına yönelik önlemler özetlenmiştir. Daha sonra optimal kontrol teorisine dayalı tam optimizasyon gözden geçirilmiştir. Bu amaçla, dinamik programlama (DP), gradyan yöntemi ve sıralı ikinci dereceden programlama (SQP) yöntemleri tanıtılmıştır. Son iki yöntem aynı zamanda enerji depolama cihazlarının şarj durumunu (SOC) da kontrol edebilmektedir. Sonuçta simülasyonların sayısal sonuçlarında, sadece optimal hız profillerinin değil, aynı zamanda optimal SOC profillerinin çözülmesinin önemi ortaya konulmuştur [26].

Thomas, (2016), “The feasibility case for converting existing heavy metro systems to driverless operation”, başlıklı makalesinde, bir metro işletmesini sürücüsüz sisteme dönüştürmek için gerekli fizibilite incelemiştir. Bu amaçla asgari gereklilikler; sistemden beklenen operasyonel ve hizmet faydaları, emniyet riski ve müteakip kontrol tedbirleri ve sistemin kamuoyu algısı ve kabulü olarak 3 başlık halinde tanımlanmıştır [27].

Wang ve diğerleri. (2015), makalelerinde, kentsel demiryolu toplu taşıma ağı için tren planlama problemini analiz etmişlerdir. Analizde, kalkış, varış ve yolcu geliş oranları incelenmiştir. Ayrıca yolcuların yürüme süreleri ve transfer süreleri de modelde dikkate alınmaktadır. Bu model, doğrusal olmayan, gerçek değerli, dışbükey olmayan bir modeldir. Bu tren planlama problemini çözmek için genetik algoritmalar örneği gibi yaklaşımların tren tarifeleme amaçlı kullanılabilirliği ortaya konulmuştur [28].

Teknolojinin hızla ilerlemesiyle konvansiyonel ve hızlı tren hatlarında kullanılan sinyalizasyon sistemlerinde de gelişme yaşanmıştır. Daha öncelerde yaygın olarak kullanılan mekanik sistemler yerine artık elektronik ve bilgisayar ağırlıklı sistemler daha fazla kullanılmaktadır [29]. Ancak Türkiye’de halen anahatlarda çalışan sürücüsüz tren sistemi mevcut değildir. Metro sistemlerinde ilk otomatik sürücüsüz trenler İstanbul’da M5 Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Hattında kullanılmaya başlanmıştır. M5 Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy sürücüsüz metro hattında CITYFLO 650 sinyalizasyon sistemi kullanılmaktadır. CITYFLO 650, yeni veya mevcut toplu taşıma uygulamaları için Bombardier Transportation tarafından geliştirilen son teknoloji ürünü bir CBTC hareketli blok çözümdür [30]. İlk etabı Üsküdar-Yamanevler olarak 15 Aralık 2017’de, ikinci etabı ise Çekmeköy’e kadar olan tüm kesimi kapsayacak şekilde 21 Ekim 2018’de hizmete giren Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Hattı Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği UITP tarafından Avrupa’da birinci, Dünya’da ise üçüncü seçilerek ödül almıştır [31]. Bunun dışında Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu (M7) ve Bostancı-Dudullu metrosu (M8) da yine tam otomatik sürücüsüz olarak işletilebilmektedir. Ayrıca Türkiye’de ilk yerli ve milli sürücüsüz metro aracı da çalışmaya başlamıştır. Gebze OSB-Darıca Sahil Metro Hattı için özel tasarlanan yerli ve milli sürücüsüz ilk metro aracı 24 Eylül 2023’te raylara indirilmiştir. TÜBİTAK tarafından desteklenen, ASELSAN ile Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı çalışmasında ise yerli sürücüsüz sinyalizasyon sistemleri geliştirilmektedir. [32].

3. Bulgular

3.1. Sürücüsüz trenlerin avantajları, fırsatlar

Kabul edildiği gibi [33] demiryolu sinyalizasyon sistemlerinin kullanıldığı 150 yıl boyunca insan hataları birçok kazaya neden olmuştur. İnsan ölümlerini azaltmak için bugüne kadar çeşitli sürücü uyarı sistemleri geliştirilmiştir. Pek çok tren koruma sistemi devreye alınmış olup bunlardan biri de artık tüm dünyada yaygın olarak kullanılan ATP sistemidir.

ATP Sistemi, sürücülerden kaynaklanan tehlikeleri azaltmasının yanı sıra tren servislerinin sıklığını da artırmaktadır. Ayrıca yoğun saatlerde ilave olarak daha fazla trene hizmet verilebilmektedir. Sadece bir düğmeye basılarak daha iyi hizmet sıklığı sağlamak için herhangi bir tren normal tarife eklenebilmekte olup depodan otomatik olarak rotaya gönderilebilme imkânına sahip olmaktadır. Ayrıca bilgisayarlı sistemin kullanılması sonucunda insan işgücü maliyetinin düşeceği öngörülmekte, bu da daha fazla fayda sağlanması anlamına gelmektedir.

Ayrıca tam otomasyonlu trenler daha az enerji tüketmektedir. Dakiklik artıp, mesafe süreleri kısalıp güvenlik sorunları iyileşirken, insanlar trenleri daha fazla kullanma eğiliminde bulunmaktadır. Daha az enerji tüketimi, daha fazla yolcu, daha az işçilik maliyeti, tren hizmetlerinden daha fazla gelir sağlanmasının yanı sıra karbon emisyonunun azalmasına da katkıda bulunmaktadır.

3.2. Sürücüsüz trenlerin dezavantajları, tehditler

Sürücüsüz tren çalıştırmanın birçok avantajı olmasına rağmen bazı kısıtlamaları da mevcuttur. Öncelikle bilgisayarlar çoğu zaman bir dâhiden daha akıllı olabilmekte, ancak bazen bir insanın tahmin edebileceği durumun tehlikesini görememektedirler. Örneğin Mart 2012'de bir çocuk, peron kenarı ile tren arasında sıkışıp kaldığında tren makinistinin yardımıyla hayatta kalmıştır. Bu olayda otomatik sistem açık sinyal vermekte olup kabinde bulunan sürücünün çocuğu görmesiyle birlikte trenin gitmesine izin vermeyişi, bir hayatın kurtulmasına yardımcı olmuştur. Böyle bir olayda trenin sürücüsüz olması durumunda bir felaketin yaşanabilmesinin olasılığı yüksek bulunmaktadır.

Ayrıca çoğu hükümetin endişe duyduğu sorunlardan biri de işçi sendikalarının tepkisidir. Tamamen sürücüsüz demiryolu sistemleri uygulanırsa çok sayıda tren makinisti ve kabin içi çalışanın işini kaybetme tehlikesi vardır. Ayrıca yolcular genellikle trenlerde resmi görevlilerin yanında kendilerini daha rahat hissetmektedirler. Sürücü görünmediğinde yolcular tedirgin olabilmektedir. Acil durumlarda yolcuları yönlendirme ve sakinleştirmede eğitimli kaptanların rolü büyüktür [34].

Ana hat demiryollarında ise kazaya neden olabilecek daha tehlikeli faktörler bulunmaktadır. Bunlar hattın dışındaki bir hayvan ya da insan olabilmektedir. Her ne kadar tam otomatik sistemler engel algılama özelliğine sahip olsa da demiryolu hattı etrafındaki potansiyel tehlikeyi tahmin edemeyebilirler. Ancak eğitilmiş ve deneyimli sürücüler bunu tahmin edebilmektedir. Ayrıca, 1970'li yıllarda ABD'de sürücüsüz tren sistemi bir ana hat demiryolunda uygulanmaya çalışıldığında güvenli görülse de kısmen faydasız görülmüştür. Hat üzerindeki "bira kutusu" bile engel algılama sistemi tarafından tehlike olarak algılanmıştır. Yani durmaya gerek olmayan bir durumda bile, hat üzerinde herhangi bir nesne tespit ettiğinde acil fren sistemini çalıştırıp, hemen duruş sistemini aktifleştirmektedir. Bu nedenle bilgisayar sistemlerinin çok akıllıca tasarlanması gerekmektedir.

Demiryolları, devam eden teknolojik gelişmeler nedeniyle giderek daha dijital hale gelmekte ve bu da kaçınılmaz olarak operatörler için yeni güvenlik kaygılarını beraberinde getirmektedir.

Bilgisayar korsanları bir trenin güvenlik açısından kritik sistemleri arasındaki veri alışverişini hedefleyebilirler. "Ortakı adam saldırısı", üçüncü bir tarafın, gönderen ile alıcı arasında gönderilen verilere müdahale etmesi, bilgilerin değiştirilmesi, geciktirilmesi ve hatta hedeflenen alıcıya ulaşmasını engellemesidir. ATO, varlıklarının coğrafi olarak trenlere ve güzergâh altyapısına dağılmış olması ve diğer sistemlerle etkileşimi nedeniyle daha geniş bir tehlike yüzeyine sahiptir ve bu da onu siber saldırılara karşı potansiyel olarak savunmasız hale getirmektedir. Yüksek çözünürlüklü, gerçek zamanlı tren belirleme bilgilerini yol kenarı, tren ve kontrol merkezi arasında taşıdığı için bu hassas verilerin güvenliğini korumak çok önemlidir. Ne yazık ki, tren ağının güvenli çevrimiçi iletişime yönelik hazırlıkları hâlâ optimum gelişme aşamasında olmaktan çok uzaktır.

4. Sonuç ve Öneriler

Yeni teknolojilerin yardımıyla trenler daha az insan destekli hale gelmekte ve bu sayede ölümcül kazaların sayısı azalmaktadır. Sürücüsüz metro tren sistemleri gün geçtikçe yaygınlaşırken, bu sistemlerin yakın zamanda ana hat demiryollarında da hayata geçirilmesi düşünülmektedir. Ancak sürücüsüz ana hat tren sistemlerinin kısıtlamalarına ilişkin hâlâ bazı hususlar bulunmaktadır.

Sürücüsüz tren sistemleri sürücülerden kaynaklanan tehlikeleri azaltmasının yanı sıra servislerin sıklığını da artırmaktadır. Ayrıca yoğun saatlerde ilave olarak daha fazla trene hizmet verilebilmektedir. Sadece bir düğmeye basılarak, daha iyi hizmet sıklığı sağlamak için herhangi bir tren normal tarifeyle eklenebilmektedir. Bunun yanı sıra tam otomasyonlu trenler daha az enerji tüketmektedirler. Daha az enerji tüketimi, daha fazla yolcu, daha az işçilik maliyeti, tren hizmetlerinden daha fazla gelir sağlanmasının yanı sıra karbon emisyonunun azalmasına da katkıda bulunmaktadır.

Bilgisayarlı sistemleri güvenli olarak algılasak da ATO, varlıklarının coğrafi olarak trenlere ve güzergâh altyapısına dağılmış olması ve diğer sistemlerle etkileşimi nedeniyle daha büyük bir tehlike potansiyeline sahiptir ve bu da onu siber saldırılara karşı potansiyel olarak savunmasız hale getirmektedir. Ayrıca çoğu hükümetin endişe duyduğu kısıtlamalardan biri de işçi sendikalarının tepkisidir. Tamamen sürücüsüz demiryolu sistemleri uygulanırsa çok sayıda tren makinisti ve kabin içi çalışan işini kaybetme tehlikesiyle karşı karşıya kalmaktadır. Ayrıca yolcular genellikle trenlerde resmi görevlilerin yanında kendilerini daha rahat hissetmektedirler.

Şu anda tam otomatik ana hat tren sistemlerinin çok az örneği olduğundan, uzmanlar biraz deneyim kazanmak ve gelecekteki iyileştirmeler hakkında doğru karar vermek için metro sistemleri ve yeni teknoloji örneklerini incelemektedirler. Örneğin Türkiye’de Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy metrosu (M5), Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey metrosu (M7) ve Bostancı-Dudullu metrosu (M8) tam otomatik sürücüsüz olarak işletilebilmektedir. Metrolarda gözetimsiz sistemler düzgün bir şekilde çalışmakta ve ana hat boyunca çatılı metal platformların inşa edilmesi durumunda ana hat demiryollarında da uygulamaya geçilebileceği düşünülmektedir. Bu yapılar tünelle benzer bir şekilde sahip olabilmektedirler fakat bu tür tünellerin yapımı çok maliyetli olacağından daha detaylı analizler gerekmektedir. Bu nedenle, öngörüye dayalı bir karar almak için biraz zamana ihtiyaç vardır ve daha fazla deneyime göre ana hat demiryolları daha iyi işletilebilecektir.

Kaynakça

- [1] WSP. “Challenges and opportunities for automation of rail operations.” *Thornhill: Transport Canada*, 2022.
- [2] S. Rangra, W. Schön, M. Sallak, & F. Belmonte, “Risk and safety analysis of main line autonomous train.” *21e Congrès de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement λμ21 Reims 16-18 octobre 2018*.

- [3] Railway Technology “Justifying automation,” 2011 [Online] Available: <https://www.railway-technology.com/features/feature127703/?cf-view> (Erişim tarihi: 29.03.2023)
- [4] Siemens, “Fact sheet”. *Corporate Communications and Government Affairs*, Siemens AG, München, 2012.
- [5] Wikipedia “Automatic Train Operation,” 2023 [Online] Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_Train_Operation - (Erişim tarihi: 29.03.2023)
- [6] CNN “World’s first 350km-per-hour driverless bullet train goes into service in China,” 2020 [Online] Available: <https://edition.cnn.com/travel/article/driverless-bullet-train-china/index.html> (Erişim tarihi: 29.03.2023)
- [7] R. Tang L. De Donato N. Besinović, F. Flammini R. M. Goverde, Z. Lin, R. Liu, T. Tang, V., Vittorini, Z. Wang, “A literature review of artificial intelligence applications in railway systems”, *Transportation Research Part C (Emerging Technologies)*, 140, 2022, Article 103679.
- [8] J. Moreno, J. M. Riera, L. de Haro, and C. Rodríguez, A,”Survey on future railway radio communications services: challenges and opportunities,” *IEEE Communications Magazine*, October 2015.
- [9] J. Xun, Y. Li, R. Liu, Y. Li, & Y. Liu, “A survey on control methods for virtual coupling in railway operation,” *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 3, 838-855, 2022.
- [10] N. Bešinović, L. De Donato, Flammini, F. ve diğerleri. (7 more authors) Artificial intelligence in railway transport: taxonomy, regulations, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23 (9). pp. 14011-14024. ISSN 1524-9050, 2021.
- [11] B. Ning, T. Tang, K. Qiu, C. Gao & Q. Wang, “Computers in Railways”, WIT Press, ISBN 1-85312-715-9, 2004.
- [12] P. Singh, M. A. Dulebenet, J. Pasha, E. D. R. Santibanez Gonzalez, Yui-Yip Lau, and R. Kampmann, “Deployment of autonomous trains in rail transportation: Current trends and existing challenges,” *IEEE Access*, Volume 9, 2021.
- [13] K. Kera, E. Isobe, S. Kawahata, Hitachi’s initiatives in addressing the challenges of 21st century railway systems, *Hitachi Review* Vol. 48, No. 3, 1999.
- [14] G. Muniandi, “Blockchain-enabled virtual coupling of automatic train operation fitted mainline trains for railway traffic conflict control,” *IET Intell. Transp. Syst.*, Vol. 14 Iss. 6, pp. 611-619, 2020.
- [15] P. Singh, Z. Elmi, V. K. Meriga, J. Pasha, M. A. Dulebenets, “Internet of things for sustainable railway transportation: Past, present, and future,” *Cleaner Logistics and Supply Chain* 4, 2022, 100065.
- [16] G. Zhong, K. Xiong, Z. Zhong, and B. Ai, “Internet of things for high-speed railways,” *Intelligent and Converged Networks*, 2(2): 115-132, 2021.
- [17] T. Wajima, K. Bekki, D. Eng., Y. Yokosuka, “Leading-edge solutions for next-generation railway systems,” *Hitachi Review* Vol. 54, No. 4, 2005.
- [18] L. Junting, D. Jianwu, and M. Yongzhi, NGCTCS: “The next generation chinese train control systems,” *Journal of Engineering Science and Technology Review* 9 (6), 122- 130, 2016.
- [19] P. Fraga-Lamas, T. M. Fernández-Caramés, and L. Castedo, “Towards the internet of smart trains: a review on industrial iot-connected railways,” *Sensors*, 17, 2017, 1457; doi:10.3390/s17061457.
- [20] S. Küçük, “Demiryollarında arıza durumunda otonom trenler için yedek sistem sistemin tasarlanması”, *Demiryolu Mühendisliği*, 2019, (10):38-60. 38.
- [21] V. Arlı, “Otomatik Metro Sistemleri,” 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE’13), 9-11 Ekim 2013, Karabük, Türkiye.
- [22] M. Demir, “Radyo frekanslı kimlik tanımlama (rfid) sistemi ile tren konum tespiti,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2014.
- [23] S. Yüksel, Ö. Y. Ercoşkun, “Akıllı ulaşım sistemlerinde otonom araçlar ve kente etkileri,” *Ekonomik Devrim, Blockchain Chapter 7*, 2023.
- [24] A. Fernandez-Rodriguez, A. Fernandez-Cardador, AP. Cucala, AP. Dominguez, M., Gonsalves T., “Design of robust and energy efficient ATO speed profiles of metropolitan lines considering train load variations and delays.” *IEEE Trans Intell Transp Syst* 16(4):2061–2071, 2015
- [25] M. Brenna, M. Foadelli, M. Longo, “Application of genetic algorithms for driverless subway train energy optimization,” *International Journal of Vehicular Technology*, 1-14, 2016.
- [26] M. Miyatake, H. Ko, “Optimization of train speed profile for minimum energy consumption.” *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.* 5 (3), 263–269, 2010.
- [27] P. Thomas, “The feasibility case for converting existing heavy metro systems to driverless operation,” *WIT Transactions on The Built Environment*, 88, 363-372, 2006.
- [28] Y. Wang, M. Zhang, J. Ma, X. Zhou, “Survey on driverless train operation for urban rail transit systems,” *Urban Rail Transit*, 2(3-4):106–113, 2016.

- [29] S. Karayanık, “Marmaray Sinyalizasyon Sistemleri.” *Demiryolu Mühendisliği*, 2016, 4: 71-77.
- [30] E. Çekerek, M. Demir, “İstanbul metrolarında yolcu konforunun artırılması: sinyalizasyon sistemi ile otomatik anons kontrol uygulaması,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp.110-121, July. 2021. doi: 10.47072/demiryolu.932732
- [31] NTV “Türkiye'nin ilk sürücüsüz metro hattı Avrupa birincisi seçildi” 2018 [Online] Available: <https://www.ntv.com.tr/video/ekonomi/turkiyenin-ilk-surucusuz-metro-hatti-avrupa-birincisi-secildi,gXzFT2MZ10yYeAMLx6kX5g> (Erişim tarihi: 09.11.2023)
- [32] NTV “İlk yerli ve milli sürücüsüz metro aracı raylara indirildi” 2023 [Online] Available: <https://www.ntv.com.tr/galeri/ntvpara/ilk-yerli-ve-milli-surucusuz-metro-araci-raylara-indirildi,OD6lEHuEf0OBW8sphM8JPA/PJd9cvtPMUW49THQOL4rWA> (Erişim tarihi: 09.11.2023)
- [33] P. Connor, F. Schmid, & C. Watson, “A review of train protection systems”, *Railway Technical*, 2012
- [34] C. Lo, “Driverless train technology and the london underground: the great debate,” 2012. [Online] Available: <https://www.railway-technology.com/features/featuredriverless-train-technology/>, (Erişim tarihi: 27.10.2023)

Özgeçmiş



Üsâme EKİCİ

1989 yılında Ankara’da doğmuştur. Ankara Atatürk Anadolu Lisesi’nden mezun olduktan sonra lisans eğitimini Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, yüksek lisans eğitimini Birmingham Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği, doktora eğitimini ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği (Ulaştırma) bölümünde tamamlamıştır. 2014 yılında çalışma hayatına TCDD Genel Müdürlüğü Etüt Proje ve Yatırım Dairesinde başlayan Ekici, 2016 yılından beri Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığında görev yapmaktadır. İlgili alanlarına giren araştırma konuları Ulaşım planlaması, Demiryolları yolcu taşımacılığı, Talep tahmini ve Demiryolu işletmeciliğidir.

E-Posta: usameekici@gmail.com



Mehmet Emin AKAY

1952 yılında İzmir’de doğdu. Gazi Üniversitesi Otomotiv Eğitimi Bölümünde 1975’te lisans, 1996’da yüksek lisans ve Kırıkkale Üniversitesi Makine Mühendisliği ABD’de 2005’te doktora eğitimini tamamlamıştır. 1987 -2009 arası Kırıkkale Üniversitesinde öğretim görevlisi, 2009 – 2011 arası Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde, 2011 – 2015 yılları arasında Kırıkkale Üniversitesinde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yaptı. Uzmanlık alanları; İçten Yanmalı Motorlar ve Taşıtlar, Yakıtlar, Yanma ve Emisyon Kontrolü, Raylı Taşıt Tekniği ve Demiryolu İşletmeciliği olarak sıralanabilir. Yazarın ulusal ve uluslararası olmak üzere yayınları vardır. 2015 yılından bu yana KBÜ Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği Program Başkanı olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: eminakay@karabuk.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Üsâme EKİCİ: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Kaynaklar. Mehmet Emin AKAY: Literatür Taraması, Kaynaklar, Doğrulama, Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Demiryolu Taşımacılığının Diğer Taşımacılık Modlarıyla Karşılaştırılması ve Sağladığı Avantajlar

Üsame EKİCİ*^{ORCID}, Talha FERŞADOĞLU^{ORCID}

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Strateji Geliştirme Başkanlığı, Ankara, Türkiye

**usameekici@gmail.com*

(Alınış/Received: 02.11.2023, Kabul/Accepted: 23.11.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Bu çalışmada demiryolu taşımacılığının diğer taşımacılık modları ile karşılaştırılması yapılarak sağladığı avantajlar üzerine bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, öncelikle ulaştırma sistemleri genel olarak anlatılmış, sonrasında ülkemizde gerçekleşen demiryolu taşımacılığının tarihi gelişimi ele alınmıştır ve devamında, diğer taşımacılık modlarının demiryolu taşımacılığı ile kıyaslaması bağlamında 130 kişiyle çevrimiçi olarak gerçekleştirilmiş anketin sonuçlarına yer verilmiştir. Anket sonuçlarına dayanan analizlerin çıktısı olarak demiryolu yatırımlarının artırılması ve altyapı sorunlarının giderilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Demiryolu tahvillerinin ihraç edilerek iç piyasaya borçlanılabilmesinin değerlendirilmesine ve devlet eliyle yapılan teşviklerin artırılmasına ihtiyaç duyulduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu taşımacılığı, Anket çalışması, Taşımacılık modlarının kıyaslanması, Türkiye

Comparison of Railway Transportation with Other Transportation Modes and its Advantages

Abstract: In this study, an evaluation was made on the advantages of railway transportation by comparing it with other transportation modes. In this context, firstly transportation systems are explained in general and then the historical development of railway transportation in our country is discussed. In the following, the results of the online survey conducted with 130 people in the context of comparison of other transportation modes with railway transportation are included. As a result of the analysis based on the survey results, it was concluded that railway investments should be increased, infrastructure problems should be resolved, borrowing in the domestic market by issuing railway bonds should be evaluated and state incentives should be increased.

Keywords: Railway transportation, Survey study, Comparison of transportation modes, Türkiye

1. Giriş

1.1. Türkiye'nin demiryollarındaki mevcut durumu ve istatistikî veriler

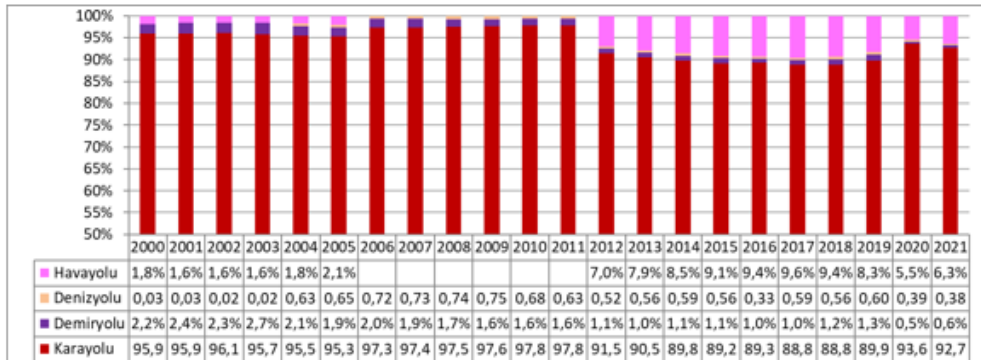
Türkiye sınırları içindeki ilk demiryolu hattı 1856 yılında Aydın-İzmir arasında işletmeye açılmıştır. Cumhuriyetin ilk yıllarında demiryolu ağırlıklı ulaştırma politikaları sonucunda Türkiye Cumhuriyeti'nde 1923 yılında 4.138 km olan demiryolu hatlarının uzunluğu 1938 yılı sonunda 7.153 km'ye çıkmıştır [1]. Bu politika 1950'li yıllara kadar sürdürülmüş ve demiryollarının payı yolcуда %42'ye, yükte ise %68'e çıkmıştır. Ancak 1950'li yıllardan sonra artan karayolu odaklı politikalar nedeniyle demiryollarının mod payı sırasıyla %3 ve %5'e düşmüştür. Neredeyse 50 yıl boyunca ihmal edilen demiryolu ağı, 2000'li yılların başında harap bir duruma gelmiştir [2]. 2003 yılından itibaren demiryolu tekrardan devlet politikası haline gelerek demiryolu için yüksek miktarda ödenek ayrılmıştır. Yatırım gerçekleştirmelerinde demiryolu sektörünün 2013 yılındaki payı %33 iken bu oran 2022 yılı Eylül ayı yıllık kümülatif verilere göre %52'ye ulaşmıştır [3].

Atıf için/Cite as: Ü. Ekici, T. Ferşadoğlu, "Demiryolu taşımacılığının diğer taşımacılık modlarıyla karşılaştırılması ve sağladığı avantajlar" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 121-132, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1385217

Türkiye’de yeni hat yapımları ve modernizasyon çalışmalarının sonucu olarak, 2022 yılı sonu itibarıyla resmi kayıtlara göre 1.460 km’si hızlı tren olmak üzere toplam 13.128 km’lik hatta işletmecilik yapılmaktadır [4]. Böylelikle, yüksek hızlı tren projeleri vasıtasıyla eski ve yavaş tren imajı değişmiştir. Mevcut sistem yenilenmiş, tren hızları modern bir seviyeye getirilmiş ve hizmet kalitesi artırılmıştır. Yük taşımacılığında ise blok tren işletmeciliğine geçilmiştir. Bu bağlamda yük merkezleri ve Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) ana demiryollarına bağlanırken, 13 bölgede lojistik merkez kurulmuş ve bu sayının 25’e ulaşması hedeflenmektedir [5]. Mevcut durumda toplam 1.460 kilometresi YHT (Yüksek Hızlı Tren) hattı olmak üzere ülke tarihinde 13.050 kilometre demiryolu hattı bulunmaktadır [3].

Dünya’da ve Türkiye’de gerçekleştirilen taşıma sayılarına bakıldığı zaman demiryolu ile gerçekleşen taşıma rakamlarında hem yolcu taşımacılığında hem de yük taşımacılığında yıllar bazında devamlı artış meydana geldiği anlaşılmaktadır. Özellikle yük taşımacılığına bakıldığı zaman, küresel ölçekte yapılan dış ticaretin önemli bir kısmının denizyolu vasıtası ile yapıldığı, karayolu ile yapılan yük taşımacılığının ise ikinci sırada ve demiryolu ile gerçekleşen yük taşımacılığının üçüncü sırada bulunduğu anlaşılmaktadır. Kombine taşımacılık birden çok taşımacılık türünün birlikte kullanılması olarak ifade edilmektedir. Demiryolu, denizyolu ve havayolu ile gerçekleşen taşımalarda, taşımanın başlangıç ve varış yerinde karayolunun kullanılması bir zorunluluktur. Bu yüzden kombine taşımacılık bu tür taşımalarda ön plana çıkmaktadır [6].

Şekil 1’deki grafik ve değerler incelendiğinde, yolcu taşıma sayısında nicelik olarak bir büyümeden söz edilse bile demiryolları bazında oransal olarak bir büyümeden söz etmek zordur. 2000’li yılların başlarında %2’nin üstünde olan yolcu taşımacılığındaki demiryollarının payı 2021 yılında %0,6’ya düşmüştür [7].



Şekil 1. Yurt içi yolcu taşıma oranları

1.2. Ulaştırmanın literatürdeki genel tanımları ve Türkiye’nin ulaştırma sektörü hedefleri

Tarihin başlangıç dönemlerinde tekerleğin keşfiyle başlayıp günümüze kadar uzanan sürede ulaşım, insanların en başlıca gereksinimlerinden birisi olmuştur. “Yolcu ve yüklerin bir noktadan başka bir noktaya hareketi” olarak tanımlanan ve sosyo-ekonomik gelişimin esas itici güçlerinden biri olan ulaşım günlük yaşamımızda; demiryolları, karayolları, denizyolları, havayolları ve boru hatları gibi alt sistemlerle gerçekleştirilmektedir.

Ulaştırma en basit olarak “kişilerin, eşyaların, enerjinin, haberleşme ve bilginin, zaman ve/veya yer faydası sağlamak amacıyla ekonomik, güvenli ve hızlı yer değiştirmesi” şeklinde tanımlanabilir [8]. Ulaştırma faaliyetlerinin esas amacı, ülkenin kalkınması ve büyümesi için gerekli olan sosyal ve ekonomik hedeflerinin gerektirdiği hizmeti; kullanacaklara en uygun şekilde sağlamaktır. Bunu sağlarken ülkemizin ulusal güvenliğine zarar gelmeyecek biçimde, çevre dostu ve güvenli olmak şartıyla, en uygun maliyete katlanarak, yeni teknolojileri kullanarak,

uluslararası politikalarla ve uluslararası anlaşmalarla uyumlu şekilde ve kesintisiz bir halde hizmet vermek gereklidir. [9].

Ülkeler için etkili ve verimli bir ulaştırma sistemi, ekonomik gelişimin ön koşuludur. Malların serbestçe dolaşımı ve insanların hareketliliği, toplumlar için zorunlu ve gerekli bir esastır. Dünya serbest ticaretinin büyümesi, ekonominin gelişmesi ve daha üst düzeylerdeki gelirlerin bütünleşmesi ile ulaştırma nitel ve nicel olarak tanımlanan önemli bir ekonomik sektör olmuştur [10].

Ulaştırma sistemleri, her birisi kendine mahsus işletme, taşıt filosu ve ağ öğelerini içeren demiryolu, karayolu, havayolu ve denizyolu gibi alt sistemlerin birleşmesi ile oluşmaktadır. Bu alt sistemlerin her birisi birbirinden bağımsız biçimde ulaştırma işlemini gerçekleştirebildikleri gibi beraber kullanılarak da çok modlu taşımacılık (aktarmalı taşımacılık, kombine) yapılabilmektedir [11]. Bu çalışmanın konusunu oluşturan demiryolu işletmeciliği ise birçok disiplinin bir arada yürütüldüğü bir sistem mühendisliği olarak tanımlanmaktadır [12].

Bu kapsamda, On Birinci Kalkınma Planındaki Lojistik ve Ulaştırma Sektörü Hedefleri Tablo 1.'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, hızlı tren ve demiryolunun geneline bir teşvik yapılmaktadır. Yeni hızlı tren hatları yapılarak, demiryollarının toplam taşımacılık içindeki payının artırılması hedeflenmektedir.

Tablo 1. Lojistik ve ulaştırma sektörü hedefleri [13]

| | 2018 | 2023 |
|---|--------|--------|
| Hızlı Tren Hat Uzunluğu (km, Kümülatif) | 1.213 | 5.595 |
| Demiryolu Yolcu Taşımacılığının Toplam İçerisindeki Payı (Karasal, %) | 1,3 | 3,8 |
| Çift Hatlı Demiryolu Uzunluğunun Toplam Anahat İçerisindeki Payı (%) | 12,4 | 26,3 |
| Kabotaj Hattında Elleçlenen Yükün Toplam Elleçlemeler İçerisindeki Payı (%) | 12,9 | 18 |
| Havalimanı Toplam Yolcu Sayısı (Direkt Transit Dahil) (Milyon) | 211 | 266 |
| Bölünmüş Yol Uzunluğu (Otoyol Dahil) (km, Kümülatif) | 26.642 | 29.514 |
| Otoyol Uzunluğu (km, Kümülatif) | 2.842 | 3.779 |
| BSK (Bitümlü Sıcak Karışım) Kaplamalı Yol Ağı (km, Kümülatif) | 25.215 | 31.478 |
| İyileştirilen Kaza Kara Noktası | 70 | 75 |
| Trafik Kazaları Sonucu Hayatını Kaybeden Kişi Sayısı | 6.675 | 4.900 |

Kalkınma planında demiryollarına özel bir önem verilmiş, taşımacılık içerisindeki payının artırılmasına yönelik politika ve tedbirler oluşturulmuş, demiryolu ulaştırmasında emniyet standartlarının artırılması, hızlı, güvenli, konforlu demiryolu ulaşımının tesis edilmesi, gar ve istasyonlarda engelsiz ulaşım olanaklarının artırılması, daha dengeli bir türel dağılımın oluşturulmasına yönelik maddeler yer almıştır [13].

2. Demiryolu Taşımacılığı ve Diğer Taşımacılık Modlarının Karşılaştırılması Anketi

Bu bölümde, demiryolu taşımacılığının diğer taşımacılık modlarıyla karşılaştırılması ve sağladığı avantajlarının incelenmesi amacı doğrultusunda, sektör temsilcileri ve paydaşlar arasında yapılan ankette elde edilen veriler analiz edilmiş ve demiryolu taşımacılığının avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuş ve sonuç kısmında bu analizlerin sonucu olarak çeşitli öneriler sunulmuştur. Böylece, demiryolu taşımacılığı sektörünün daha iyi anlaşılması ve gelecekteki gelişimine katkı sağlanması hedeflenmektedir. “Demiryolu Taşımacılığı ve Diğer Taşımacılık Modlarının Karşılaştırılması” anketi dijital olarak düzenlenmiş olup toplamda 130 kişi katılım sağlamıştır.

Ankete katılanların;

- %73,8'inin 31-64 yaş aralığında, %24,6'sının 18-30 yaş aralığında olduğu tespit edilmiştir. En az katılım gösteren yaş aralığının ise %1,5 ile 65 ve üzeri olduğu görülmüştür.
- %56,9'unun erkek, %43,1'inin kadın olduğu görülmüştür.
- %67,7'si lisans mezunu, %27,7'si yüksek lisans mezunu ve %4,6'sı doktora mezunudur.

Demiryolu taşımacılığının hangi özelliklerini diğer taşımacılık modlarından üstün buluyorsunuz?



Şekil 2. Anket – Demiryollarının üstün yönleri

Şekil 2’de anketin katılımcılarına “Demiryolu taşımacılığının hangi özelliklerini diğer taşımacılık modlarından üstün buluyorsunuz?” sorusuna verilen cevaplar ile ilgili olarak dağılım grafiği gösterilmektedir.

Ankete katılanlar %70,8 oranında maliyeti ilk sıraya koymuş, %53,8 ile hava koşullarından etkilenmemeyi ikinci sıraya almıştır. Üçüncü sırada ise %43,1 ile çevre dostu olması tercih edilmiştir. Birden fazla seçeneğin seçilebildiği bu soruda kullanıcıların demiryolu taşımacılığını diğer modlardan en üstün gördükleri özellik maliyet olmuştur. Bu şartıcı değildir, çünkü ülkemizde demiryollarına yapılan sübvansiyonlarla tren bileti fiyatları oldukça düşük seviyelerde tutulmaktadır.

1. Çevre dostu: Demiryolu taşımacılığı, diğer taşımacılık modlarına kıyasla denizyolu ile beraber en az karbon salınımı yaratır. Bu, doğal kaynakların korunmasına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlar [14].
2. Kapasite: Demiryolu taşımacılığı, karayolu ve havayolu modlarına göre daha yüksek kapasiteye sahiptir. Bu, büyük hacimli yüklerin daha hızlı ve daha verimli bir şekilde taşınmasına olanak tanır.
3. Güvenlik: Demiryolu taşımacılığı, karayolu moduna göre daha güvenli bir seçenektir. 1996 yılına ait istatistiklerde Türkiye genelinde milyar yolcu-km bazında kaza sayısı karayollarında 2.200 iken demiryollarında yalnızca 100’dir. Bu durum, demiryollarının karayollarına göre 22 kat daha güvenli olduğunu göstermektedir [15].
4. Maliyet: Demiryolu taşımacılığı, diğer taşımacılık modlarına göre daha düşük maliyetlidir. Bu, özellikle büyük hacimli yüklerin taşınması için ekonomik bir seçenek olarak tercih edilir [16].
5. Zamanlama (Dakiklik): Demiryolu taşımacılığı, diğer taşımacılık modlarına göre daha dakik bir seçenektir. Bu, belirli amaçla yapılan planlı yolculuklar gibi zamanın kritik olduğu işlerde özellikle tercih edilir.

6. Hava koşullarından etkilenmeme: Demiryolu taşımacılığı, diğer taşımacılık modlarına göre daha az hava koşullarından etkilenir. Bu, hava koşullarının taşımacılık sektöründe sıkıntı yarattığı bölgelerde önemli bir avantaj sağlar [17].
7. Konfor: Demiryolu taşımacılığı, karayolu ve havayolu ulaşım modlarına göre daha konforlu bir seçenektir. Yolcular, geniş koltuklar ve yemek vagonu, kafeterya, kantin gibi konforlu özelliklerden faydalanabilirler.

Demiryolu taşımacılığının dezavantajları nelerdir?

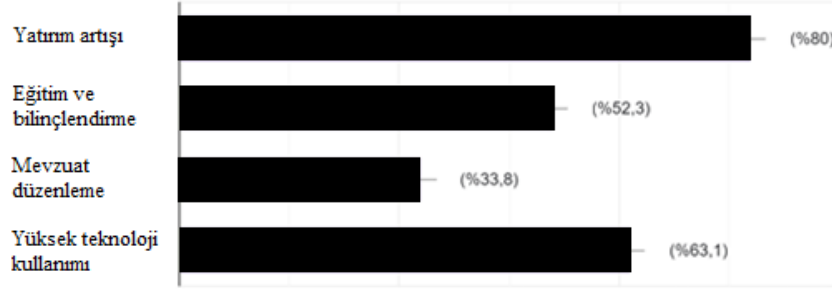


Şekil 3. Anket – Demiryolu taşımacılığının dezavantajları

Katılımcılara “Demiryolu taşımacılığının dezavantajları nelerdir?” sorusu yöneltilmiştir. %70,8 oranında altyapı eksikliği en çok vurgulanan dezavantaj olmuştur. %58,5 ile kapıdan-kapıya taşınamaması bir eksiklik olarak görülmüş son sırada ise %38,5 oranda ilk yatırım maliyetinin yüksek olması seçilmiştir (Şekil 3). Yine baskın olarak öne çıkan cevaplar altyapının ve demiryolu ağının yetersiz düzeyde olduğuna yöneliktir. Buna ilişkin çeşitli tedbirler alınmalı ve altyapı yatırımları artırılmalıdır.

- 1- İlk yatırım maliyetinin yüksek olması: Demiryolu taşımacılığı için öncelikle raylı altyapının yapılması gereklidir. Bu altyapı yatırımları ilk etapta oldukça yüksek maliyetlidir. Bu nedenle, demiryolu taşımacılığı için yatırım yapmak isteyen şirketler için ilk yatırım maliyetleri, diğer taşımacılık modlarına göre daha yüksek olabilir.
- 2- Altyapı eksikliği: Bazı bölgelerde demiryolu altyapısı yetersiz olabilir. Geçmiş dönemlerde yapılan düşük miktarda yatırımlar, coğrafik koşulların elverişsiz olması, bütçeden demiryollarına yüksek bütçe ayırılamaması gibi hususlar yüzünden ülkemizde altyapı eksikliği hissedilmektedir.
- 3- Kapıdan kapıya taşıma yapılamaması: Demiryolu taşımacılığı genellikle belirli istasyonlara ve terminal noktalara kadar yapılabildiği için, taşımacılık zincirinin diğer aşamalarında, özellikle son kilometrelerde veyahut başlangıç yerlerinde bir başka taşımacılık moduna ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, mal sahipleri ve lojistik şirketleri için ek maliyet oluşturabilir.

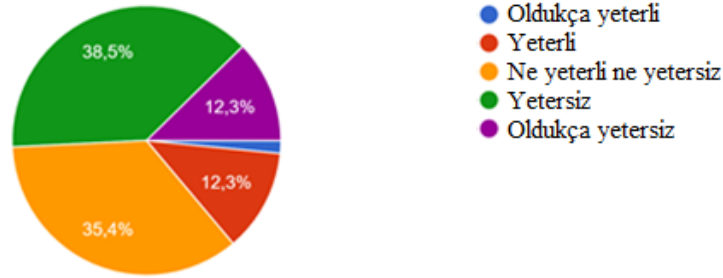
Demiryolu taşımacılığında yaşanan sorunların çözümü için hangi adımların atılmasını önerirsiniz?



Şekil 4. Anket – Demiryolu taşımacılığında yaşanan sorunların çözümü

Şekil 4’te katılımcılara “Demiryolu taşımacılığında yaşanan sorunların çözümü için hangi adımların atılmasını önerirsiniz?” sorusuna verilen cevaplar ile ilgili olarak dağılım grafiği gösterilmektedir. Katılımcılar %80 oranında altyapı yatırımlarının artırılması gerektiğini, %63,1 oranında teknolojik gelişmelerin kullanılması gerektiğini, %52,3 ile eğitim ve bilinçlendirme sağlanması gerektiğini düşünmektedir. Katılımcıların %33,8’i ise mevzuat ve yönetmelikler ile bir çözüm sağlanacağını düşünmektedir. Altyapı yatırımları yeni yolların yapımı, gar-istasyon binalarının iyileştirilmesi, elektrifikasyon ve sinyalizasyon çalışmalarını kapsamaktadır. Teknolojik gelişmeler ise raylı sistemlerde yine en modern sinyalizasyon ve elektrifikasyon sistemleriyle donatım, maglev, hyperloop gibi yeni teknolojik gelişmelerin takibi, yüksek hız maksimum verim gibi uygulamaları ifade etmektedir. Eğitim ve bilinçlendirme ise çeşitli kampanyalarla halkın farkındalığını artırma çalışmaları olarak değerlendirilebilir. Mevzuat ve yönetmeliklerde serbestliğin sağlanması, demiryollarına teşviklerin artırılması konuları ise mevzuat düzenleme maddesinin içeriğini oluşturmaktadır.

Devletin demiryolları için sağladığı sübvansiyonlar hakkında ne düşünüyorsunuz?



Şekil 5. Anket – Devlet sübvansiyonları

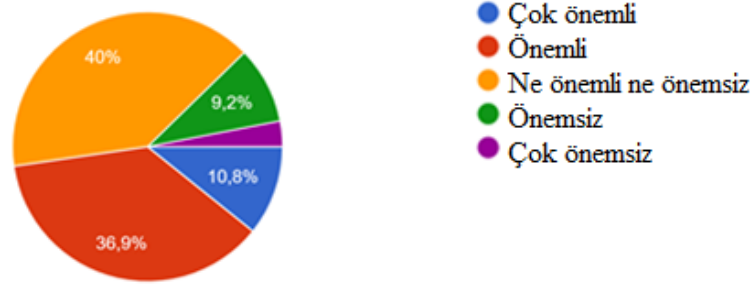
Şekil 5’te katılımcılara “Devletin demiryolları için sağladığı sübvansiyonlar (desteklemeler) hakkında ne düşünüyorsunuz?” sorusuna verilen cevaplar ile ilgili olarak dağılım grafiği gösterilmektedir. Katılımcıların %48,8’i verilen sübvansiyonları yetersiz veya oldukça yetersiz bulurken sadece %13,8’i bu sübvansiyonlar için yeterli görüşünde bulunmuştur.

Türkiye’de devletin demiryolu sektörüne sağladığı sübvansiyonlar, diğer ülkelerle karşılaştırıldığında hala yetersiz görülebilmektedir. Özellikle Avrupa ülkelerinde demiryolu sektörüne sağlanan destekler oldukça fazla ve sektörün gelişmesi için önemli bir katkı sağlamaktadır. Birçok AB ülkesi, tren bilet fiyatlarını düşürmek için sübvansiyon desteğinde bulunmaktadır. Örneğin Slovakya ve Macaristan, belli bir yaşın üstündekilere bedava tren bileti vermektedir. Avusturya ise, günlüğü 3 avroya gelen yıllık tren kartı kampanyası başlatmıştır [18].

Son yıllarda Türkiye'de demiryolu sektörüne yapılan yatırımların artmasıyla birlikte, devletin bu alanda sağladığı sübvansiyonların da artacağı umulmaktadır.

Demiryolu sektörü, sürdürülebilir bir taşımacılık seçeneği olarak önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, sektörün gelişimi ve yaygınlaştırılması için devletin desteği oldukça önemlidir. Yüksek maliyetli yatırımların gerektiği demiryolu sektörü, özel sektörün tek başına finanse edemeyeceği bir sektördür. Bu nedenle, devletin demiryolu sektörüne sağladığı sübvansiyonlar, sektörün sürdürülebilirliği ve gelişimi açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Hazinenin, 'demiryolu tahvilleri' adı altında değerli kağıt çıkarması hakkında ne düşünüyorsunuz?"



Şekil 6. Anket – Demiryolu tahvilleri

Şekil 6'da katılımcılara "Hazinenin, 'demiryolu tahvilleri' adı altında değerli kağıt çıkarması hakkında ne düşünüyorsunuz?" sorusuna verilen cevaplar ile ilgili olarak dağılım grafiği gösterilmektedir.

Katılımcıların %47,7'si bu fikrin önemli ya da çok önemli olduğunu belirtmiştir. %40'lık bir kısım 'ne önemli ne önemsiz' diye düşünürken yalnızca %12,3'ü 'önemsiz' olduğunu düşünmektedir.

Hazinenin demiryolu tahvilleri adı altında değerli kâğıt çıkarması, Türkiye'nin demiryolu sektörüne yatırım yapmak isteyen yatırımcılara cazip bir seçenek sunma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Demiryolu yatırımları genellikle büyük sermaye gerektirdiği için bu tür tahviller yoluyla yatırımcılar bu yatırımlara ortak olabilmektedir. Ancak, demiryolu tahvillerinin çıkarılmasının avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır.

Avantajları:

- Demiryolu tahvilleri, hazine tarafından çıkarılacağı için yatırımcılar için güvenilir bir yatırım aracı olarak görülebilmektedir.
- Demiryolu tahvilleri yoluyla hazine, demiryolu sektöründe yatırım yapabilmekte ve bu yatırımların finansmanını sağlayabilmektedir.
- Demiryolu tahvilleri, yatırımcılara sabit bir getiri sunar ve risk düzeyi daha düşüktür.

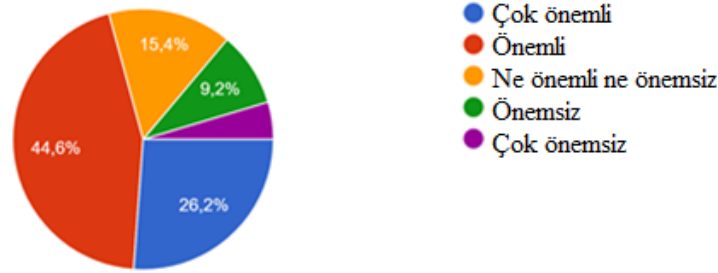
Dezavantajları:

- Demiryolu tahvilleri, yatırımcıların tahvilleri aldıktan sonra yüksek bir likidite sorunu yaşamamasına neden olabilmektedir. Yatırımcılar, tahvilleri elden çıkarmak istediklerinde, bu tahvillerin piyasa değerindeki dalgalanmalar nedeniyle kayıplar yaşayabilmektedir.
- Demiryolu tahvillerinin getirileri, piyasa koşullarına bağlıdır ve bunlar, genellikle sabit getirili tahvillerden daha yüksek risk taşımaktadır.

- Demiryolu tahvilleri, hazine tarafından çıkarıldığı için hazineye bağımlıdır. Hazine, demiryolu yatırımlarının finansmanını sağlamak için bu tahvilleri çıkarmak zorunda kalabilmekte ve bu da yatırımcıların getirilerini etkileyebilmektedir.

Sonuç olarak demiryolu tahvilleri hazine için demiryolu yatırımlarını finanse etmek için bir seçenek olabilir ancak yatırımcıların risk iştahlarına bağlı olarak çekiciliği değişebilmektedir. Hazine tarafından çıkarılan bu tahvillerin yatırımcılara sunulan getirileri, piyasa koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir.

Demiryollarında serbestleşme sonrası sektöre yeni işletmecilerin girmesi hakkındaki düşünceniz nedir?



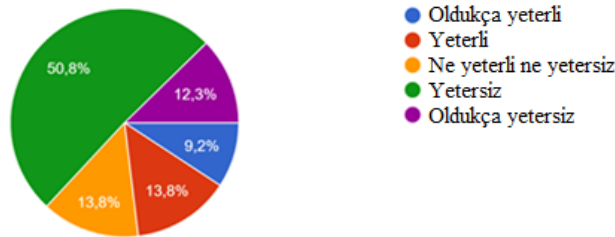
Şekil 7. Anket – Demiryollarında serbestleşme

Şekil 7’de katılımcılara “Demiryollarında serbestleşme sonrası sektöre yeni işletmecilerin girmesi hakkındaki düşünceniz nedir?” sorusu yöneltildiğinde alınan cevaplar sonrası oluşan dağılım grafiği gösterilmektedir.

Katılımcıların %68,8’i yeni işletmecilerin sektöre girmesini çok önemli veya önemli bulmuştur. Öte yandan %13,8’i bu gelişmeyi önemsiz ya da çok önemsiz diye nitelemiştir.

Demiryollarında serbestleşme sonrası sektöre yeni işletmecilerin girmesi, sektörün rekabetçi bir yapıya kavuşmasını sağlayabilmektedir. Bu da sektördeki verimliliği artırabilmekte ve hizmet kalitesini yükseltebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, yeni işletmecilerin sektöre girmesi olumlu bir gelişme olarak değerlendirilebilir. Türkiye’de demiryolu sektöründe serbestleşme çalışmaları devam etmektedir ve bu bağlamda, yeni işletmecilerin sektöre girişi mümkün olabilmektedir. Bu süreçte, sektörün rekabetçi bir yapıya kavuşması, hizmet kalitesinin artması ve maliyetlerin düşürülmesi açısından olumlu sonuçlar doğuracaktır. Ancak, yeni işletmecilerin sektöre girişi öncesinde, altyapı yatırımları, finansman, düzenleyici çerçeve gibi konuların detaylı bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Ülkemizde halihazırda yapılan demiryolu yatırımlarının (Ankara-Sivas, Ankara-İzmir, Ankara-Bursa gibi YHT projeleri düşünülerek) ne kadar yeterli olduğunu düşünüyorsunuz?



Şekil 8. Anket – Ülkemizdeki demiryolu yatırımları

Şekil 8’de katılımcılara “Ülkemizde halihazırda yapılan demiryolu yatırımlarının (Ankara-Sivas, Ankara-İzmir, Ankara-Bursa gibi YHT projeleri düşünülerek) ne kadar yeterli olduğunu düşünüyorsunuz?” sorusu yöneltilmesi sonucunda alınan cevaplar ile oluşan dağılım grafiği gösterilmektedir.

Bu soruya katılımcıların %12,3’ü oldukça yetersiz cevabını vermiş, %50,8’i yetersiz bulunduğunu ifade etmiştir. Ankete katılanların sadece %23’ü yapılan yatırımları yeterli bulmuştur.

Ülkemizde son yıllarda yapılan demiryolu yatırımları, ülke genelinde demiryolu ağının modernizasyonu ve genişletilmesi açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. YHT projeleri gibi büyük ölçekli yatırımlar, kentler arasındaki ulaşımın hızlandırılması ve konforunun artırılması açısından önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, halihazırda yapılan demiryolu yatırımlarının yeterli olup olmadığına dair bir değerlendirme yaparken, bazı faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Öncelikle, demiryolu ağı genişletme ve modernizasyonu, uzun vadeli bir planlama ve yatırım süreci gerektirir. Bu nedenle, hâlihazırda yapılan yatırımların yeterli olup olmadığını değerlendirirken, daha büyük bir resmi ele almak gerekmekte ve gelecek yıllarda yapılacak yatırımların da dikkate alınması önem arz etmektedir.

İkinci olarak, demiryolu yatırımlarının yeterli olup olmadığını değerlendirirken, ülkemizin demiryolu altyapısının mevcut durumunu ve gelecekteki ihtiyaçlarını da dikkate almak gerekmektedir. Bu bağlamda, mevcut demiryolu hatlarının modernizasyonu, yeni hatların yapılması, altyapı yatırımlarının artırılması ve demiryolu taşımacılığının çevreye olan etkilerinin azaltılması gibi konular ele alınmalıdır.

Son olarak, hâlihazırda yapılan demiryolu yatırımları önemli bir adım olsa da ülkemizin demiryolu taşımacılığı alanında daha ileriye gitmek için daha fazla yatırım yapması gerekmektedir. Demiryolu taşımacılığı, sürdürülebilir bir ulaşım seçeneği olduğu için ülkemizdeki demiryolu ağının genişletilmesi ve modernizasyonu, daha fazla yatırım yapılması gereken bir alan olarak öne çıkmaktadır.

3. Sonuç ve Öneriler

Bütün ulaşım modlarının tek bir taşıma zinciri oluşturacak bir biçimde entegre edilerek yeterli imkânlarla ve fiziki kapasiteye sahip aktarma, yükleme ve boşaltma terminallerinin kurulması gereklidir. Bunların etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi ve gerekli işlemlerin hızlandırılabilmesi amacıyla sektör paydaşları arasında elektronik işlemler standartlaştırılarak yaygınlaştırılmalıdır.

Demiryollarına yapılan yatırım kademeli bir şekilde artırılmalıdır. Bu karayoluna yapılmakta olan yatırımları kademeli olarak azaltmakla mümkün olabilir. Yatırım maliyetleri, çevreye verilen zarar, emisyon, enerji tüketimi, güvenli olması gibi değerler düşünüldüğünde, geleceğe yönelik artan talepleri karşılayabilmek için demiryoluna öncelik verilmeli ve demiryollarının etkin-verimli kullanılması ve yenilenmesine yönelik yatırım atakları devam ettirilmelidir.

Eğitim ve bilinçlendirme faaliyetleri kapsamında, TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları) nitelikli ve kaliteli personel yetiştirilmesi amacıyla paydaşlar ve üniversiteler ile iş birliği yapmalı, meslek içi eğitim programlarını geliştirmelidir. Demiryolu hatları bütüncül bir şekilde onarılarak gözden geçirilmeli, sinyalizasyon ve elektrifikasyon eksiklikleri hızlı bir şekilde tamamlanmalıdır. Ulaşımında güvenlik problemlerini azaltmak ve artan trafik talebini daraltmak için kentler arası ulaşım ile kent içi ulaşımın entegrasyonu sağlanmalı, şehir içi ve şehirler arası ulaşımında toplu taşımacılık projeleri hayata geçirilmelidir. Yolculuk alışkanlıklarının değiştirilmesine yönelik programlar hazırlanmalıdır. Başta demir cevheri ve kömür olmak üzere kamu yüklerinin taşınmasında, demiryolu taşımacılığı birincil öncelik olarak benimsenmelidir.

Demiryollarının devlet tarafından desteklenerek teşvik edilmesi için hazineden aldığı sübvansiyonların artırılması sağlanmalıdır.

Devlet, özel sektörün demiryolu işletmeciliğine daha çabuk entegre olması için çeşitli teşvikler ve politikalar uygulayabilir:

*Mali Teşvikler: Devlet, demiryolu işletmeciliği sektörüne yatırım yapmak isteyen özel sektör firmalarına mali teşvikler sağlayabilir. Örneğin, düşük faizli krediler, vergi indirimleri, serbest ticaret bölgeleri ve diğer teşvikler gibi destekler sağlayabilir. Bu teşvikler, özel sektörün demiryolu işletmeciliğine daha çabuk entegre olmasını sağlayabilir.

*Düzenlemeler: Devlet, demiryolu işletmeciliği sektöründe faaliyet gösteren özel sektör firmalarının faaliyetlerini kolaylaştırmak için uygun düzenlemeler yapabilir. Örneğin, izin sürelerini kısaltabilir, lisanslama süreçlerini basitleştirebilir ve diğer idari engelleri azaltabilir. Bu düzenlemeler, özel sektörün demiryolu işletmeciliğine entegrasyonunu hızlandırabilir.

*Altyapı Geliştirme: Devlet, demiryolu taşımacılığı altyapısını geliştirerek, özel sektörün daha kolay ve ucuz bir şekilde işletmelerini gerçekleştirmelerine yardımcı olabilir. Örneğin; devlet, demiryolu hatlarının modernizasyonu, yeni hatların inşası ve diğer altyapı projeleri gibi konularda yatırım yapabilir.

*İş birliği ve Ortaklıklar: Devlet, demiryolu işletmeciliği sektöründe özel sektör firmalarıyla iş birliği ve ortaklıklar kurarak, sektörün daha verimli hale gelmesini sağlayabilir. Örneğin, kamu-özel ortaklığı modeliyle, devletin sahip olduğu demiryolu hatlarının özel sektör firmalarına kiralanması mümkündür.

*Eğitim ve İş Gücü Geliştirme: Devlet, demiryolu işletmeciliği konusunda eğitim programları ve diğer iş gücü geliştirme programları sağlayarak, özel sektör firmalarının işlerini daha verimli bir şekilde yürütmelerine yardımcı olabilir. Bu programlar, özel sektörün demiryolu işletmeciliğine entegrasyonunu hızlandırabilir.

Demiryolları, uzun vadeli ve büyük ölçekli yatırımlar gerektirir. Bu yatırımların finanse edilmesi için demiryolu şirketleri genellikle borçlanma yoluyla finansman sağlarlar. Ancak, bazen bu finansman kaynakları yetersiz kalabilir. Bu nedenle, hükümetin hazine tahvilleri yoluyla borçlanması, demiryollarının finansman ihtiyaçlarını karşılamak için alternatif bir kaynak sağlayabilmektedir.

Tahviller, bir hükümetin borçlanma aracı olarak kullanabileceği borç senetleridir. Bu senetler, önceden belirlenmiş bir faiz oranı ve vade süresi ile ihraç edilirler ve genellikle yatırımcılar arasında çok popüler bir yatırım aracıdır. Demiryollarına ek finansal destek sağlamak amacıyla hazine “demiryolu tahvilleri” adı altında devlet kâğıdı ihraç ederek iç piyasaya borçlanabilmesi değerlendirilmelidir.

Bu öneri, hükümetin demiryolu projelerine yatırım yapmasını kolaylaştırmak ve ülkenin ulaşım ağının gelişimine katkıda bulunmak için kullanılacak bir araçtır. Ayrıca, bu değerli kağıtların yüksek likidite özellikleri sayesinde, bu tahviller yatırımcılar tarafından kolayca alınıp satılabilir ve hazineye düzenli bir gelir akışı sağlayabilir.

Sonuç olarak, demiryollarının finansman ihtiyaçlarını karşılamak için hazine tahvilleri kullanımı, demiryolu sektörünün büyümesi ve gelişmesi için bir fırsat yaratabilmekte ve hükümetin ulaşım sektörüne yatırım yapmasını kolaylaştırabilmektedir. Demiryollarının yönetimine geçecek kişilerin kısa, orta ve uzun vadeli planlarını ve projelerini hazırlamaları istenmelidir. Bu plan ve projeler ile ilgili hedef süreler verilerek durum takibi yapılmalıdır. Konulan sürelerin bitiminde

hedefler ile başarımlar kıyaslanmalı buna göre stratejik kararlar verilmelidir. Yeni yüzyılda Türkiye'de demiryollarının sorunlarının çözülmesinin ve sağlıklı bir yapıya kavuşmasının ekonomik gelişmeyi de beraberinde getireceği düşünülerek demiryollarına hak ettiği önem mutlaka verilmelidir.

Kaynakça

- [1] UDHB-Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. "Ulaşan ve Erişen Türkiye 2017", Ankara, Türkiye, 2017.
- [2] Ü. Ekici, "Evaluation of Rail Passengers Sector in Turkey," Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2022.
- [3] UAB-T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. "Ulaşan ve Erişen Türkiye", Ankara, 2022.
- [4] TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü. "2018 – 2022 İstatistik Yıllığı", Ankara, 2023.
- [5] UTİKAD- Uluslararası Taşımacılık ve Lojistik Hizmet Üretenleri Derneği "Lojistik Sektörü Raporu 2021", İstanbul, 2021.
- [6] TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) "Dış Ticaret İstatistikleri" 2023 [Online] Available: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dis-Ticaret-Istatistikleri-Eylul-2023-49627> (Erişim tarihi: 14.11.2023)
- [7] ÇŞB (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı) "Ulaştırma Türlerine Göre Taşınan Yolcu ve Yük Miktarı," 2022 [Online] Available: <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789> (Erişim tarihi: 02.11.2023)
- [8] L. Çakıcı, "Yeni ekonomik politikalar açısından ulaştırmanın sektörel önceliği," Yeni ekonomik politikalar karşısında ulaştırma sektörünün sorunları, İstanbul, Evin Yayıncılık, 1985, pp. 27-39.
- [9] A. Aydoğdu, "Avrupa Birliği'ne Giriş Sürecinde Trafik Kazalarının Azaltılması İçin Türkiye'nin Geliştireceği Ulaşım ve Enerji Politikaları," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, pp. 1-150..
- [10] P. Nijkamp, B. Ubbels, and E. Verhoef, "Transport investment appraisal and the environment," *Tinbergen Institute Discussion Paper*, 2002.
- [11] S. Kaya, "Türkiye'de Ulaştırma Sektörünün Genel Görünümü ve Sorunları," AR-GE Bülten, 2008, pp. 31-38.
- [12] Ş. T. Kaya "Demiryolu İşletmeciliği ve Demiryolu Mühendisliği." *Demiryolu Mühendisliği*, 2017, 6: 47-51.
- [13] SBB "Kalkınma Planları," 2019 [Online] Available: <https://www.sbb.gov.tr/kalkinma-planlari> (Erişim tarihi: 02.11.2023)
- [14] AÇA (Avrupa Çevre Ajansı-European Environment Agency) "Rail and waterborne — best for low-carbon motorised transport" 2021 [Online] Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport> (Erişim tarihi: 13.11.2023)
- [15] ÜDY (Üst Düzey Yönetici) Belgesi "Demiryolu – Karayolu Sistemlerinin Karşılaştırılması" [Online] Available: <https://www.udybelgesi.com/demiryolu-karayolu-karsilastirilmesi.asp> (Erişim tarihi: 13.11.2023)
- [16] İMO (İnşaat Mühendisleri Odası) "Ulaştırma ve Demiryolları" Türkiye Mühendislik Haberleri Yıl:67/2022-4 Sayı:511 Ankara, Türkiye
- [17] T. Alataş ve E., T. Somunkıran "Türkiye'de Demiryolu Ulaşımının Sorunları ve Çözüm Önerileri", 2016
- [18] Euronews "Avrupa'da demiryolu ulaşımı: Sorunlar, projeler ve hedefler" [Online] Available: <https://tr.euronews.com/2021/09/16/ab-de-demiryolu-ulas-m-sorunlar-projeler-ve-hedefler> (Erişim tarihi: 14.11.2023)

Özgeçmiş**Üsame EKİCİ**

1989 yılında Ankara'da doğmuştur. Ankara Atatürk Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra lisans eğitimini Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, yüksek lisans eğitimini Birmingham Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği, doktora eğitimini ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği (Ulaştırma) bölümünde tamamlamıştır. 2014 yılında çalışma hayatına TCDD Genel Müdürlüğü Etüt Proje ve Yatırım Dairesinde başlayan Ekici, 2016 yılından beri Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığında görev yapmaktadır. İlgili alanlarına giren araştırma konuları Ulaşım planlaması, Demiryolları yolcu taşımacılığı, Talep tahmini ve Demiryolu işletmeciliğidir.

E-Posta: usameekici@gmail.com

**Talha FERŞADOĞLU**

1989 yılında İstanbul'da doğmuştur. Yalova Fen Lisesi'nden mezun olduktan sonra lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği ve Anadolu Üniversitesi İşletme bölümünde tamamlamıştır. Halen yüksek lisans eğitimine Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde devam etmektedir. 2017 yılında çalışma hayatına ERDEM-TAŞ Makinede başlamış ve 2 seneye yakın Cezayir'de çalışmıştır. 2019 yılından beri Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığında görev yapmaktadır. İlgili alanlarına giren araştırma konuları Ulaşım planlaması, Demiryolları yolcu taşımacılığıdır.

E-Posta: talha.fersadoglu@gmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Üsame EKİCİ: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Doğrulama, Kontrol. Talha FERŞADOĞLU: Literatür Taraması, Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama.



Tren Makinistliğinin Otomasyonu İçin Lokomotif Hız Kontrolcüsü Tasarımı ve Kapalı Çevrim Simülasyonu

Ege GÜNİNDİ*^{ID}, Hakan ÜLKER^{ID}

*Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Bursa, Türkiye*

*gunindiege@gmail.com

(Alınış/Received: 13.11.2023, Kabul/Accepted: 09.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Açık demiryolu şebekesinde işletilen, lokomotif ve vagonlardan müteşekkil trenlerin makinistliğindeki otomasyon henüz kapalı demiryolu şebekesindeki nazaran çok daha düşük seviyededir. Türkiye açık demiryolu şebekesindeki tren makinistliğinin otomasyonu için PID (oransal-integral-türev) kontrol stratejisinde, Türkiye'nin ilk yerli ve milli elektrikli anahat lokomotifi E5000 ile benzer özelliklerdeki bir lokomotifte cer ve dinamik fren kuvvetleriyle hız kontrolü yapılması amacıyla PI (oransal-integral) kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan PI kontrolcü, tren seyrinin dinamik sistem modellenmesi için MATLAB Simulink ortamında oluşturulan modele entegre edilmiştir. Bu şekilde oluşturulan kapalı çevrim sistemde, halihazırda işletilen bir yük treninin seyrinden gerçek işletmecilik şartlarına uygun şekilde seçilen safhalarda bazı parametrelerin farklı değerleri için yapılan simülasyon sonuçlarında, tasarlanan PI kontrolcünün yeterince başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: PID, Otomasyon, Lokomotif, Tren, Demiryolu, Kontrol sistemi

Designing of Locomotive Speed Controller and Closed Loop Simulation for Train Driving Automation

Abstract: Automation of the driving of trains consisting of locomotive and wagons operated in open rail networks is still at a much lower level than in closed rail networks. In the PID (proportional-integral-derivative) control strategy for the train driving automation in Türkiye's open rail network, a PI (proportional-integral) controller has been designed to control the speed by the use of traction and dynamic brake forces in a locomotive with similar specifications to Türkiye's first domestic and national electric mainline locomotive E5000. The designed PI controller is integrated into the model created in the MATLAB Simulink for dynamic system modeling of the cruise of the train. In the closed loop system created in this way, the simulation results for different values of some parameters in selected phases of the cruise of a currently operated freight train in accordance with the real operating conditions have shown that the designed PI controller is successful enough.

Keywords: PID, Automation, Locomotive, Train, Railway, Control system

1. Giriş

Çoklu ünite setlerinin aksine katarların (lokomotif ve vagonlardan müteşekkil tren dizilerinin) idaresinde, farklı durumlar için kumandaların doğru kademede ve doğru zamanda verilmesinin mesleki tecrübeyi şart koşması ve fiziki müdahale icap eden rutin ve arıza işlerin insan tarafından yapılması gibi sebeplerle tren makinistliğindeki otomasyon henüz çok düşük seviyededir [1]. Otomasyon seviyelerinin tasnifini ve muhtelif otoritelerin taksonomilerini inceleyen Ramírez vd. gibi; halihazırda yüksek seviyede otomasyon ve otonomiye haiz, çoklu ünite setleri ile tren işletilen “kapalı demiryolu şebekesi” ve bu çalışmanın da konusu olan “açık demiryolu şebekesi” ifadeleri tercih edilmiştir [2]. Açık demiryolu şebekesinde tren idaresinin tam otomatik olduğu henüz tek uygulamada blok yük trenleri tıpkı bir kapalı demiryolu şebekesi gibi devamlı aynı tren teşkilatında ve aynı yolda [1]; bir başka tabir ile “kapalı hizmet” işletilmektedir [2]. Bu çalışmanın

Atıf için/Cite as: E. Günindi, H. Ülker, “Tren makinistliğinin otomasyonu için lokomotif hız kontrolcüsü tasarımı ve kapalı çevrim simülasyonu,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 133-146, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1390378

konusu olan, “açık hizmet” işletilen trenler için geliştirilen bir üründe yapay zeka (AI) tabanlı kontrolcü tarafından cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılmakta olup halen seyrüsefer emniyeti makinistin mesuliyetindedir [3]. Benzer bir üründe belirli yol kesimlerinde takriben 20 km/h ve üzeri hızlar için kontrolcü tarafından cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılırken dik rampa inişi gibi hava frene ihtiyaç duyulan yerlerde fren atması ve tahliye vermesi makinistten talep edilmekte; sistemin hava frene müdahalesi bu hız kontrol süreci haricinde, Otomatik Tren Koruma (ATP) sisteminden alınan müteakip sinyal bildirisi ve tren sevk bilgilerine bağlı duruş ve kalkış süreçlerinde vuku bulmaktadır [4]. Fransa’daki bir örnekte ülkemiz modern elektrikli anahat lokomotifine yakın modelde bir lokomotif; Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi (ERTMS) dahilindeki bir hat kesiminde makinist nezaretinde tek lokomotif olarak otomatik seyretmiş, ERTMS öncesi sinyalizasyon sistemli hatlarda da aynı otomasyonun hedeflendiği belirtilmiştir [5]. Bu otomasyonun şebeke kapasitesinde artış, livre optimizasyonu, operatif verimde artış, enerji verimliliğinde artış ve haliyle daha yeşil ulaşımına vesile olacağı belirtilmiştir [6]. Bu hususların, demiryolu altyapı işletmecisinin (DAİ) demiryolu tren işletmecilerine (DTİ) sunduğu hizmetin esaslarından olan kapasite yönetim alanındaki kapasite geliştirme hedeflerine [7]; ayrıyeten ülkemiz açık demiryolu şebekesinin DAİ kuruluşu TCDD’nin ilgili eylem planındaki katenerde enerji tasarrufu hedefine katkısı muhtemeldir [8].

Fransa’daki tek lokomotifin otomasyonu projesi Avrupa Tren Kontrol Sistemi (ETCS) tabanında, GOA2 otomasyon seviyesinde ifade edilmektedir [5]. Bu ifadede tercih edilen taksonomi (Grade of Automation, GOA) esas itibari ile kent içi toplu taşımadaki raylı sistemlerin otomasyon seviyesini tasnif etmektedir [9]. Bu noktada, ülkemizin zorlu coğrafyası gibi sebeplerle insana ihtiyaç duyulan yoğun iş yükü hatırlanmalıdır [1]. Zira ülkemizdeki tren işletmeciliği, Avrupa ekseriyetinin aksine tıpkı Kuzey Amerika’daki gibi henüz katarın esas lokomotifinde iki adet makinist iktiza etmektedir [2]. Buna mukabil halihazırda tek makinist ile katar idaresi de yapılan Avrupa’da vidalı koşum takımının yerini alması için Dijital Otomatik Koşum Takımı (DAC) geliştirilmektedir [10]. Çoklu ünite setlerinde kullanılan Scharfenberg misali mekanik, pnömatik ve elektrik bağlantıları havi bu yeni koşum takımı vasıtasıyla, insana ihtiyacı artıran işler olan dizi muayenesi ve fren tecrübesinde de otomasyon tesis edilecektir [11].

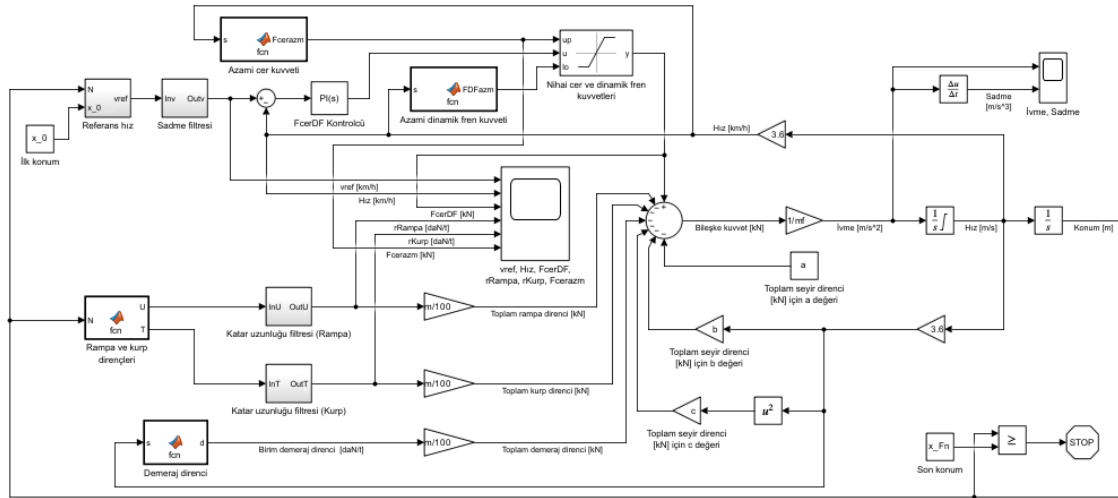
PID (oransal-integral-türev) kontrol stratejisi; endüstriyel otomasyon, kimyasal prosesler, enerji ve savunma sanayii gibi alanlardaki dinamik sistemlerde genellikle referans takibi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca otomotiv alanında çeşitli kara araçlarının sürücü modelini temsil ettiği çalışmalar da mevcut olup örnek bir çalışmada modellenen hibrit elektrikli aracın boylamsal hız kontrolü için ihtiyaç duyulan sürücü modeli olarak %0,01 maksimum aşma ve 4 s oturma zamanı şeklindeki performans kriterlerini karşılayan iki farklı PI (oransal-integral) kontrolcü tasarlanmıştır [12]. Bir başka örnek çalışmada elektrikli yarış aracının istikamet ve boylamsal hız kontrolü için geliştirilen sürücü modelinde boylamsal hız kontrolü için Simulink-Carsim simülasyon platformunda oluşturulan modelde kullanılan PID kontrolcünün yavaş tepki ve yüksek aşma zafiyeti için PID kontrol stratejisinin ileri beslemeli yapısından istifade edilerek nihayetinde kapalı çevrim sistemin geçici rejim cevabı iyileştirilmiştir [13]. Kara araçlarındaki boylamsal hız kontrolü örneklerinden tahmin edileceği üzere PID kontrol stratejisi raylı sistemlerde kapalı demiryolu şebekelerinde de kullanılmaktadır. Modern metro araçlarının ATO (Otomatik Tren İşletme) sistemlerinde PID ile hız kontrolü hayli yaygındır [14].

Bu çalışmada, ülkemiz açık demiryolu şebekesindeki tren makinistliği işinin otomasyonu için bir anahat lokomotifinde cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılması amacıyla PID kontrol stratejisinde PI kontrolcü tasarlanmış ve MATLAB Simulink ortamında oluşturulan dinamik sistem modeline entegre edilmiştir. Oluşturulan kapalı çevrim modelde, halihazırda işletilen bir yük treninin seyrinden seçilen safhalarda bazı cer mekaniği parametrelerinin farklı değerleri için kapalı çevrim simülasyonlar yapılarak sistem davranışı ve kontrolcünün başarısı incelenmiştir. Amerikan Demiryolları Birliği (AAR) tarafından tavsiye edilen taksonomi (Automated Rail Taxonomy) ile ifade edildiği takdirde [15]; bu çalışma kapsamında tasarlanan

kontrolcü vasıtasıyla, hızlanma ve yavaşlamanın kısmen otomatik olduğu “Initial Automation” seviyesindeki tren makinistliği otomasyonunun ülkemiz açık demiryolu şebekesinde tesis edilmesi amaçlanmaktadır.

2. Metot

Bu çalışmada, cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılması için PID kontrol stratejisinde PI kontrolcü tasarımı yapıp The MathWorks, Inc. firması tarafından yayımlanan MATLAB paket programı içerisinde yer alan Simulink ortamında, önceki çalışmada tren seyrinin modellenmesi için oluşturulan modele entegre edilmiş [1]; ayrıyeten modelin bazı kısımları takviye edilerek nihayetinde Şekil 1.’de gösterilen dinamik sistem modeli oluşturularak kapalı çevrim simülasyonlar bu modelde yapılmıştır.



Şekil 1. MATLAB Simulink ortamında oluşturulan kapalı çevrim sistem modeli

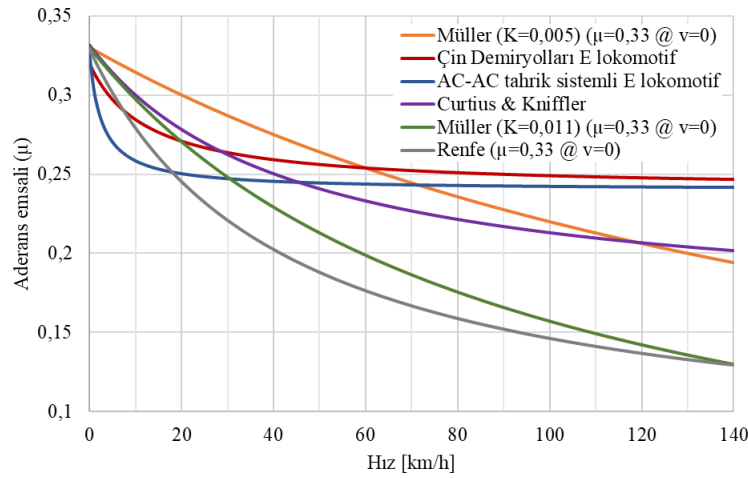
Seyri modellenen 23256 numaralı blok yük treninin güzergahı elektrifikasyonlu ve elektrifikasyonsuz, trafik muhtelif sistemlerle idare edilen hat kesimlerinden geçmekte, tren servis boyu dizel cer ile işletilmektedir. Önceki çalışmada mukayese edilen parametrelerin trenin seyrindeki tesirlerinin gösterilmesi için seçilen safhalar şebekenin Irmak-Yerköy kısmında olup bu kısmı ihtiva eden Irmak-Boğazköprü hat kesiminde elektrifikasyon mevcut, trafik idaresi ETCS Seviye 0 sinyalizasyonlu TSİ (Trafığın Sinyallerle İdaresi) ve azami dingil basıncı 22,5 t'dur [16]. Bu hat kesiminde elektrikli cer ile tren işletmeciliği de yapılmaktadır. Buna istinaden, yine aynı hamulenin (Rgns tipi 14 vagon, 56 dingil, 1092 t) modern bir elektrikli anahat lokomotifini ile cer edilmesi için kontrolcü tasarlanmıştır.

Sistem için tasarlanan kontrolcünün cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapacağı lokomotifin, ülkemizin ilk yerli ve milli elektrikli anahat lokomotifini olarak tasarlanan E5000 ile benzer özelliklerde olması adına B₀B₀ dingil tertibinde [17], 88 t servis kütlelerinde, azami cer gücü için 5000 kW anma gücünde [18], AC-AC tahrik sistemli, dinamik frende rejeneratif frenleme kabiliyetindeki bir elektrikli anahat lokomotifini kabulü yapılmıştır.

2.1. Cer ve dinamik fren eğrileri

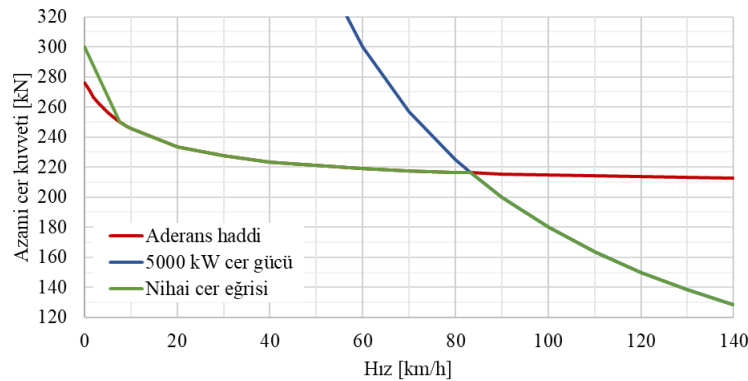
Lokomotifin azami cer ve dinamik fren kuvvetlerinin hıza bağlı değişimleri için cer mekaniği literatürü ve modern lokomotif tasarımlarına itibar edilerek lokomotif kabulü için çizilen eğrilerin denklemleri modele kontrol sinyalinin asgari ve azami değerleri olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmadaki gibi yüksek cer gücüne sahip elektrikli lokomotiflerin cer eğrilerinde azami cer gücü bölgesi dizel lokomotiflere nazaran çok daha yüksek hızlarda başlamaktadır. Şayet tekerlek ile ray arasındaki aderans haddi aşılar ise lokomotif patinaja düşeceğinden kuvvetin mecburen kısıtlandığı bölgedeki kuvvet-hız karakteri modern lokomotif tasarımlarının çoğunda sabit kuvvet, hızdaki artış ile ekseriyetle lineer azalan kuvvet, bazen de ikisi birden olmakta; gelişmiş patinaj önleme sistemlerinden istifade edilerek düşük aderanslı koşullarda dahi bu eğriler temin edilmeye çalışılmaktadır. Aderans; araç, yol ve temas yüzeyine bağlı çok sayıda faktörden etkilenmektedir [19]. Anlık da olsa patinaj daima muhtemel olduğundan bu riski minimize etmek adına kısıtlı kuvvet bölgesindeki cer eğrisi için (çok düşük hızlar hariç) bir aderans denklemi tercih edilmiştir. Literatürden örnekler teşkil etmesi adına Müller [20], Çin Demiryolları elektrikli lokomotif (bu çalışmada tercih edilmiştir) [21], AC-AC tahrik sistemli elektrikli lokomotif [22], Curtius & Kniffler [23] ve Renfe (İspanya Demiryolları) [24] aderans denklemlerinin hıza bağlı değişim eğrileri Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Muhtelif aderans denklemlerinin hıza bağlı değişim eğrileri

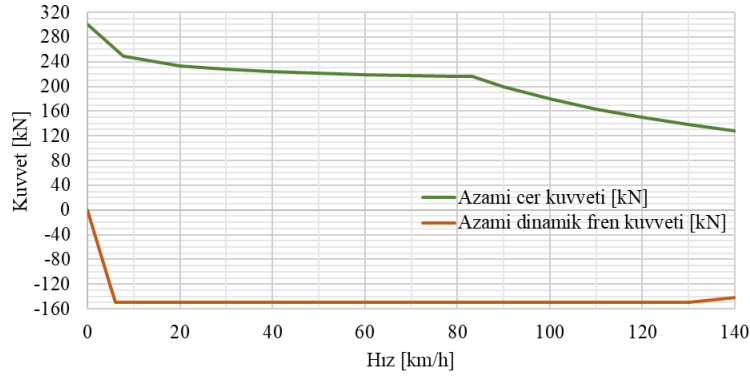
Çalışmada tercih edilen aderans denklemi lokomotifin ağırlığı (88 t_r) ile çarpılarak elde edilen aderans haddi kalkışta 276 kN cer kuvvetine cevaz vermektedir. Demeraj direnci ile bilhassa dik rampa kalkışlarındaki yüksek kuvvet ihtiyacı sebebiyle çok düşük hızlarda cer eğrisi kalkışta 300 kN'dan aderans haddinin 250 kN olduğu hıza (7,62 km/h) kadar lineer azaltılmıştır (Şekil 3.).



Şekil 3. Lokomotifin cer eğrisinin izahatı

Bu çalışmadaki lokomotif kabulüne, haliyle E5000 tasarımına benzer özelliklerdeki modern bir elektrikli lokomotif tasarımında olduğu gibi azami dinamik fren gücü 5500 kW kabul edilmiştir [25]. Bu güç bölgesine kadar yine bu konseptteki modern lokomotif tasarımlarının çoğunda olduğu gibi sabit kuvvet karakteri, azalma için tercihen 6 km/h; sabit kuvvetin şiddetinde ise

boylamsal kuvvetler sebebiyle 30 km/h ve altındaki hızlar için bahsedilen 150 kN değeri kabul edilmiştir [26]. Lokomotif kabulünün cer ve dinamik fren eğrileri Şekil 4.'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Lokomotifin cer ve dinamik fren eğrileri

Çok düşük hızlarda dinamik fren kuvvetindeki azalma sebebiyle duruş anlarındaki fren kuvveti yetersiz kaldığından, azalma ile orantılı şekilde fren silindirleri direkt fren havası ile doldurularak kuvvet zafiyetinin izalesi kabul edilmiştir. Benzer telafi metodundan, endirekt fren atıldığında lokomotifte dinamik fren kullanan sistemlerde de istifade edilmektedir [27]. Dinamik fren ve hava frenden eş zamanlı istifade halinde, tekerlek ile ray temasında kızaklama olmaması adına toplam fren kuvveti tahdit edilmelidir [28]. E5000 tasarımı gibi modern elektrikli anahat lokomotiflerinde ekseriyetle diskli fren kullanılmaktadır. Lokomotiflerde tekerleğe monte disk ile balata arasındaki anlık sürtünme hızla bağlı çok az değişmektedir ve ortalama sürtünmenin itibari değeri yüksek hızlara kadar sabittir [29]. Diskli frenin sabolu frene nazaran bu avantajından istifade edilerek, dinamik fren kuvvetinin azaldığı hızlarda 150 kN toplam fren kuvveti muhafaza edilmiştir.

2.2. Cer ve dinamik fren arası geçişler

Önceki çalışmada seyir simülasyonu yapılan treni temin eden DE 22000 tipi lokomotiflerde, hatta yıllar sonra envantere giren daha güçlü ve geliştirilmiş modeli DE 33000 tipi lokomotiflerde DC (doğru akım) fırçalı cer motorları kullanıldığından cerden dinamik frene geçişte flashover (alevlenme) riski sebebiyle gazı kapatınca bir süre beklenmelidir [30]. AC-AC tahrik sistemli lokomotiflerde ise AC (alternatif akım) asenkron cer motorları kullanılmakta olup bu tahrik sisteminin gerçek sistem üzerinden tetkiki için çalışma kapsamında AC-AC tahrik sistemli modern lokomotifler ile tecrübeler yapılmış ve araçların TCMS (Tren Kontrol ve Yönetim Sistemi) veri kayıtları incelenmiştir. Aslen kontrolcü tasarımında kontrol sinyalinin işaret değişimleri için delay (tehir) yapısı da tasarlanmakta iken; bu tetkikler neticesinde, lokomotive verilen cerden dinamik frene ve dinamik frenden cerre geçişli kumandaların cer motorlarında tehirsiz tatbik edildiğine kani olunarak, tasarlanmakta olan delay yapısı iptal edilmiştir.

2.3. Referans hız, ivme, sadme ve dinamik sistem modeli takviyeleri

Livre hızları ile birlikte gerçek işletmecilikteki hız kısıtları ve trenin gerçek seyirindeki makul duruş konumları tespit edilerek referans hız sinyali, konuma bağlı fonksiyonlar ile modele tanımlanmış ve 300 m katar uzunluğu daima nazarda tutulmuştur. Daha yüksek hız bölgesine geçişlerde dizinin sonu ilgili konumu geçince referans hız sinyali artırılmaktadır. Antrparantez, insan kumandasında mesafe tahmini mesleki tecrübe, konum işaretleri, cisimler ve gölgelerden istifade kabiliyetine bağlı olduğundan bu konumun tayininde sıkça hatalar yapılmaktadır. Daha düşük hız bölgesine geçişlerde ise ilgili konuma gelindiğinde yeni hedef hıza düşülecek şekilde referans hız sinyali azaltılmaktadır.

Düşük hızlanma ivmesi enerji sarfiyatını azaltmakta, düşük yavaşlama ivmesi de rejeneratif frenleme ile katenerin daha fazla beslenmesine vesile olmaktadır [31]. Daha az sadme, daha az enerji sarfiyatını intac edecektir [32]. Buna istinaden, gerçek yük treni seyri için makul değerler de olduğundan demeraj ivmesi $0,1 \text{ m/s}^2$ ve frenaj ivmesi $-0,1 \text{ m/s}^2$ tercih edilmiş, farklı rejim hızları arası hızlanmalar ve yavaşlamalar için de bu değerlere itibar edilmiştir.

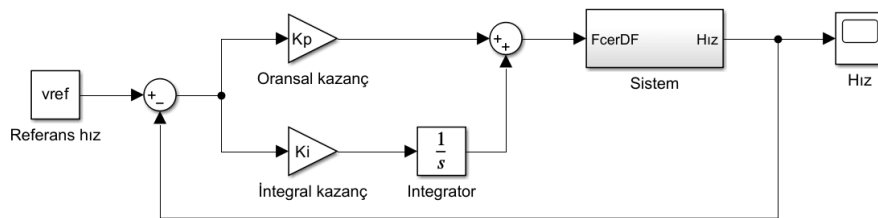
İvmeli hareketin başladığı ve bittiği noktalarda referans hız sinyalinin yumuşatılması için sadme filtresi tasarlanarak referans hız değişimindeki yüksek sadme engellenmiştir. Nitekim referans hız sabitken dahi muhtelif sebeplerle tren hızının referans hızdan uzaklaşmasının kontrol sinyalinde sebep olacağı agresyonlara tedbir olarak kontrolcü tasarımında oturma zamanı artırılarak kuvvet değişim tahdidi 75 kN/s değerine ayarlanmak istense de bu değerde kontrolcü başarısının düştüğü görülmüş, ayrıyeten cer kuvvetinin 1 s içinde 0 kN 'a düşebilmesi adına kontrolcü tasarımında bu ayar 300 kN/s için yapılmıştır [27]. Yine de hem normal seyirde kontrolcü davranışının yumuşatılmasına vesile olması hem de modelin takviyesi adına; önceki çalışmada farklı değerler arası geçişleri ilgili blok içinde yazılan kodlar ile yumuşatılan rampa ve kurp dirençleri için bu çalışmada ise katar uzunluğu filtreleri tasarlanmış, filtre parametrelerinde katarın maddesel noktaya intibakı hassas şekilde ayarlanarak seyir esnasında katar tesir eden rampa ve kurp dirençleri de optimize edilmiştir.

2.4. PID kontrol stratejisi ve PI kontrolcü tasarımı

Kapalı çevrim sistemin kararlılığı, kalıcı ve geçici rejim cevabında etkisi olan P (oransal), doğruluğunu artıran I (integral), sönümünü artırıp dolaylı olarak kalıcı rejim cevabında etkili olan D (türev) bileşenlerinden oluşan PID kontrol stratejisinin basit yapısı ve kolay ayarlanabilmesi sebebiyle endüstrideki yaygın kullanımı devam etmektedir. Literatürde Ziegler-Nichols açık ve kapalı çevrim, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick, Wang-Juang-Chan, Haalman, Dahili Model Kontrol, kutup yerleştirme ve hatanın integraline ilişkin ISE (hatanın karesinin integrali), IAE (hatanın mutlak değerinin integrali), ITAE (hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı integrali) gibi PID kontrolcü tasarım yöntemleri mevcuttur. Bu çalışmada hem kapalı çevrim sistemin kararlılığının ve doğruluğunun sağlanabilmesi hem de geçici rejim cevabının hedeflenen performans ölçütlerine ulaştırılabilmesi amacıyla PI kontrolcü yapısı seçilmiş ve kutup yerleştirme yöntemiyle tasarımı gerçekleştirilmiştir. PI kontrolcünün frekans domeninde transfer fonksiyonunu gösteren Denklem 1.'de " K_p " oransal kazanç ve " K_I " integral kazançtır [33].

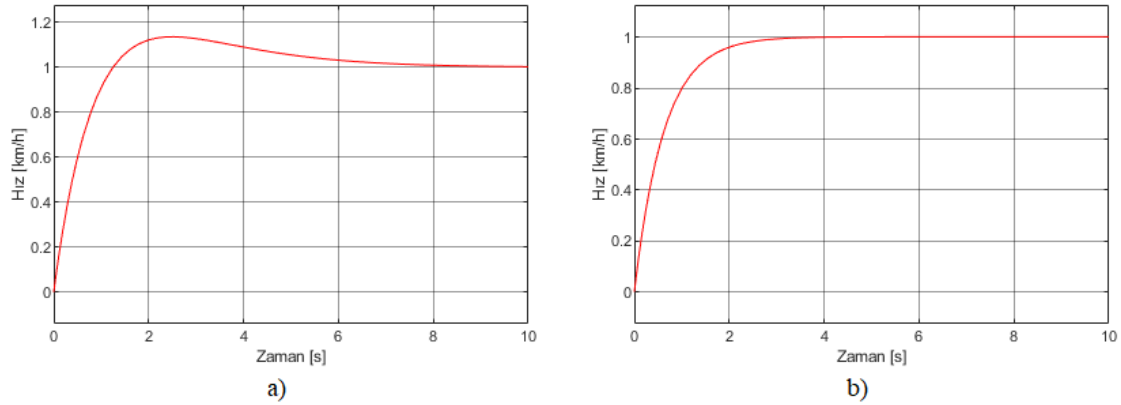
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (1)$$

PI kontrolcülü kapalı çevrim sistemin blok diyagramı Şekil 5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Entegre edilen PI kontrolcülü kontrol sisteminin blok diyagramı

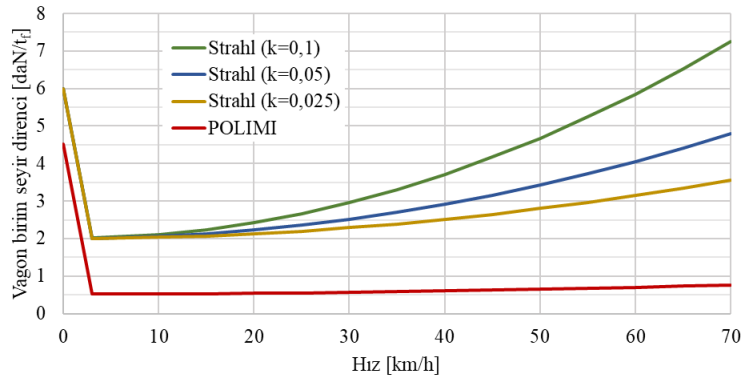
Kutup yerleştirme yöntemi ile bulunan K_p ve K_I değerleri için sistemin birim basamak cevabı Şekil 6. (a)'da gösterilmiş olup %2 kriterinde oturma zamanı $6,8 \text{ s}$, maksimum aşma %14 ve kalıcı rejim hatası %0'dır. Bu değerler üzerinden, 300 kN/s kuvvet değişim tahdidine itibar edilerek yapılan ayarlama neticesi Şekil 6. (b)'de gösterilen birim basamak cevabında %2 kriterinde oturma zamanı $2,4 \text{ s}$, maksimum aşma %0 ve kalıcı rejim hatası %0'dır.



Şekil 6. Sistemin birim basamak cevabı a) Kutup yerleştirme ile ilk değerler b) Ayarlama neticesi

2.5. Mukayese parametreleri

Ülkemize en uygun vagon seyir direnci formülünün tespit edilmesi için yapılan deneysel bir çalışmada deney verileri ile en uyumlu formülasyonun POLIMI regresyon metodu [34] olduğu görülmektedir [35]. Ülkemiz otoritelerince uzun yıllardır tercih edilen formülasyon ise $k=0,05$ için Strahl formülüdür [36]. Tasarlanan kontrolcünün vagon seyir direncinin asgari ve azami değerlerindeki başarısının mukayese edilmesi için POLIMI ve $k=0,1$ için Strahl formülleri ile seyir simülasyonları yapılmış olup hem bu formüller hem de Strahl formülünde farklı vagon özelliklerine bağlı “k” değerinin tesiri (demeraj direnci ilave edilerek) Şekil 7.’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Strahl ve POLIMI formülleri ile vagon birim seyir dirençleri

Rgns tipi vagonun dingil yataklamasında rulmanlı yataklar kullanılmaktadır. Strahl formülü aslen kaymalı yataklar ve $k=0,1$ değeri boş vagonlar içindir [36]. Gerçek tren işletmeciliğinde karşılaşılan tekerlek ve yatak arızaları ile meteorolojik hadiseler gibi seyir direncini artıran faktörler bu parametreye intibak edilerek, tasarlanan kontrolcünün gerçek sistemdeki başarısının tahmini amaçlanmıştır.

Tasarlanan kontrolcünün, kütle faktörünün asgari ve azami değerlerindeki başarısının mukayese edilmesi için; her ne kadar dolu katarlar için 0,06 kütle faktörü değeri verilse [22] ve modern cer mekaniği hesaplamalarında da sıkça buna uygun olarak hakiki kütlenin %6 ve civarında artırıldığı görülse de gerçek tren işletmeciliğinde karşılaşılan tonaj hataları bu parametreye intibak edilerek kontrolcünün gerçek sistemdeki başarısının tahmini adına kütle faktörünün 0 ve 0,30 değerleri ile seyir simülasyonları yapılmıştır.

Seyir direnci ve kütle faktörünün asgari ve azami değerli durumları için kısaca “asgari direnç” ve “azami direnç” ifadeleri kullanılacaktır.

2.6. Seyirden seçilen safhalar

Trenin seyriden iki safha seçilmiştir. İlk safha, livre hızının istasyon giriş-çıkışlarından müstakilen hattı caride değişmesi sebebiyle farklı rejim hızlarını ihtiva eden Irmak-Yahşihan arasında trenin seyri; ikinci safha, güzergahın devamı olan Yahşihan-Kırıkkale arasında trenin seyridir. Safhalar seçilirken kesintisiz kumanda için nötr bölgelerden imtina edilmiştir. 23256 numaralı blok yük treninin seyir cetveli Şekil 8.’de gösterilmiştir.

| İSTASYONLAR | Azami Hız | Asgari Müddet | Tabii Müddet |
|-------------|-----------|---------------|--------------|
| Irmak | 30 | 1 | 2 |
| Km.080+200 | 50 | | |
| Km.083+800 | 60 | | |
| Yahşihan | 55 | 19 | 20 |

a)

| İSTASYONLAR | Azami Hız | Asgari Müddet | Tabii Müddet |
|-------------|-----------|---------------|--------------|
| Yahşihan | 55 | 19 | 20 |
| Km.086+200 | 55 | | |
| Km.091+400 | 70 | | |
| Kırıkkale | 55 | 6 | 8 |

b)

Şekil 8. 23256 trenin seyir cetvelinden ilgili kısımlar: a) Irmak-Yahşihan b) Yahşihan-Kırıkkale

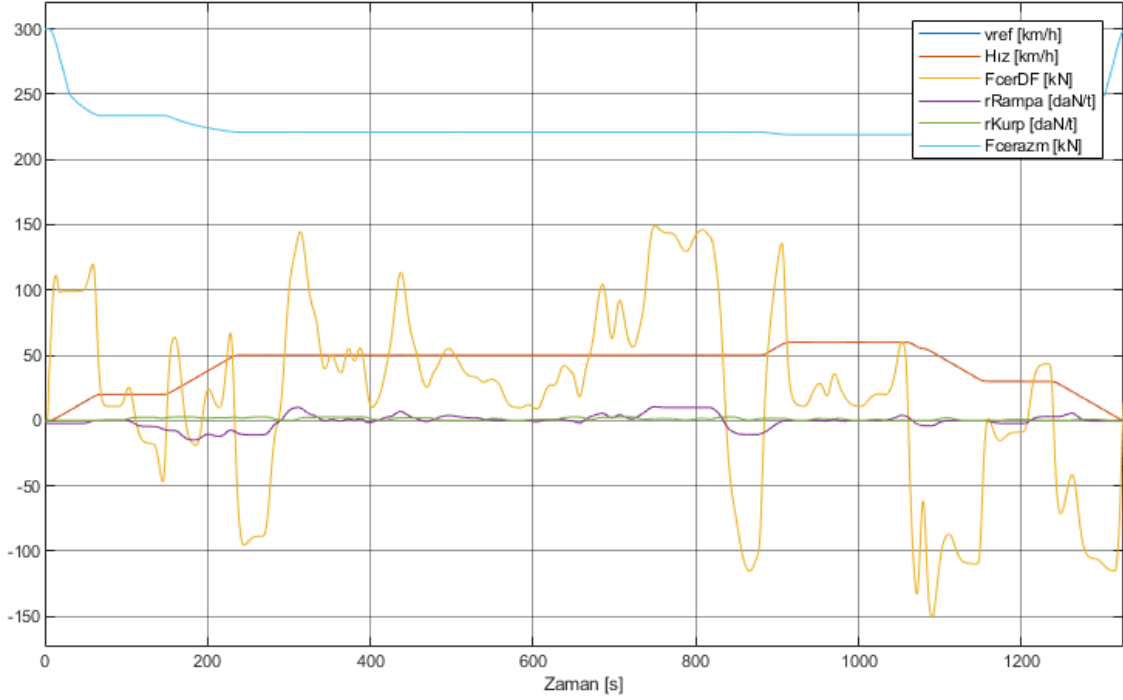
Trenin mevcut seyir cetveli, anavan vaziyetteki DE 22000 tipi dizel lokomotif teminatında Kalecik’ten Irmak’a gelen trene alt-üst manevrası yapılması halinde lokomotif anarya vaziyete düşeceği için trenin kalkış sonrası Irmak kuşak hattında Yahşihan cihetine tevcihi için çizilmiştir. Bu çalışmada ise vagon dizisinin homojen olmasından istifade edilerek Irmak’ta dizi torna edilmeden, dizel lokomotif diziden kesilip dizinin diğer ucuna bağlanan elektrikli lokomotif teminatında Yahşihan cihetine devam edilmesi amaçlanmıştır. Gerçek işletmecilik açısından yeni tren teşkilatında mevzuata muvafık bir husus bulunmamakta, personelce ilgili modele trenin terkinin ters sırayla tekrar işlenmesi ve basit fren tecrübesi yapılması gerekmektedir. Her iki safhada trenin çıkışından; tüm istasyon giriş ve çıkışlarında makaslardan sapmalı geçilen, açık sinyallerden ilerleyerek mücafire varışına kadarki seyri simüle edilmiştir.

Referans hız değişim konumları belirlenirken livre hızlarına ilaveten gerçek işletmeciliğin simülasyonu adına diğer hız kısıtlarına da riayet edilmiştir. Mevzuata uygun olarak bu hat kesiminde sapmalı geçişlerde azami 30 km/h hız ile seyredilmiştir. Tüm yaklaşma ve koruma sinyallerinde sarı bildiriden geçildiği için ATS (Otomatik Tren Durdurma) sisteminin şartı olarak 20 s içinde hız 65 km/h’in altına düşürülmüştür. Bu noktada “Initial Automation” seviyesindeki işletmeciliğe örnek teşkil eden bir husustur ki 10 s içinde ATS Sistem Kontrol Birimi’ndeki “Sistem Uyarı Onay” anahtarına halen makinist tarafından basılmaktadır. Giriş sinyallerinde sarı üzeri sarı ya da sarı üzeri yeşil bildiriden geçildiği için sinyalden 300 m önceki 40 km/h hız tahdit yolu boyunca magnetine varmadan hız 40 km/h’in altına düşürülmüştür. Halihazırda Irmak gar sahası boyunca km 70+450’ye kadar azami 20 km/h tekayyüdata ve Kırıkkale batı giriş evvelindeki km 91+450 – km 91+650 arası azami 30 km/h tekayyüdata da itibar edilmiştir.

3. Bulgular

Trenin Irmak-Yahşihan ve Yahşihan-Kırıkkale arası asgari ve azami direnç durumları için yapılan seyir simülasyonlarında referans hız (lejantta “vref”) [km/h], hız (lejantta “Hız”) [km/h], kontrol sinyali (lejantta “FcerDF”) [kN], birim rampa direnci (lejantta “rRampa”) [daN/t_r], birim kurp direnci (lejantta “rKurp”) [daN/t_r] ve azami cer kuvveti (lejantta “Fcerazm”) [kN] parametrelerinin zamana [s] bağlı değişim grafikleri verilmiştir.

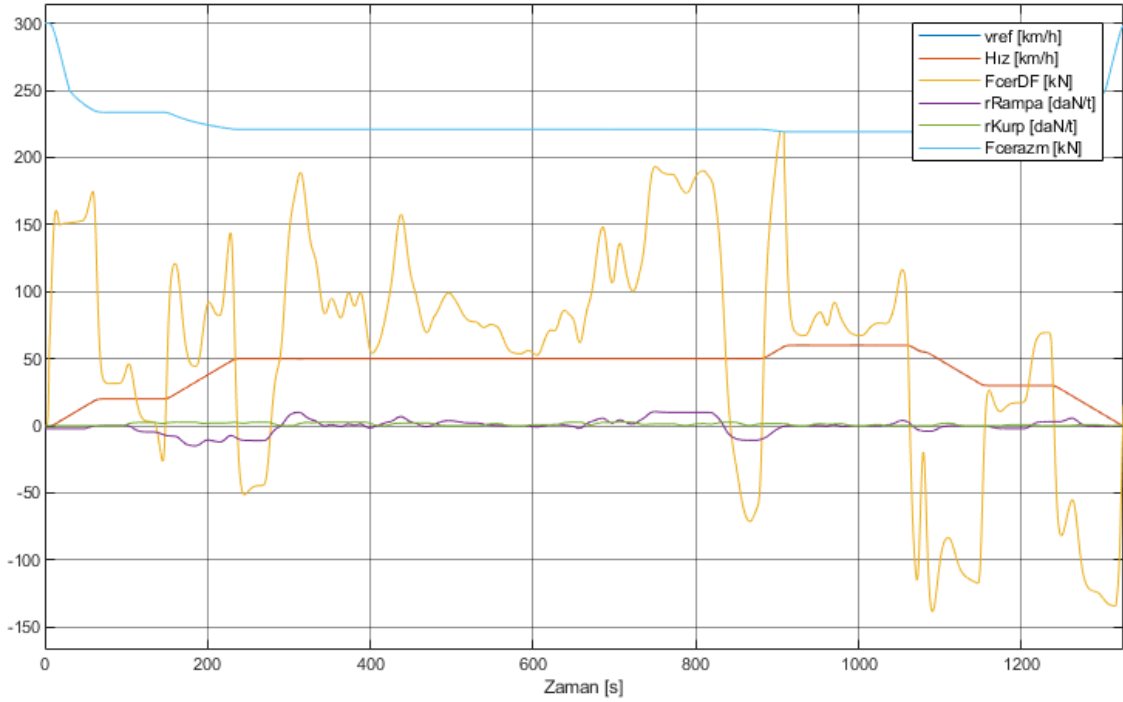
Irmak-Yahşihan, asgari direnç durumu için simülasyon sonucu Şekil 9.’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Irmak-Yahşihan, asgari direnç durumunda seyir simülasyonu

Şekil 9.'da görülen simülasyon boyunca referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile takip edilmiş ve seyir süresi 1325 s'dir.

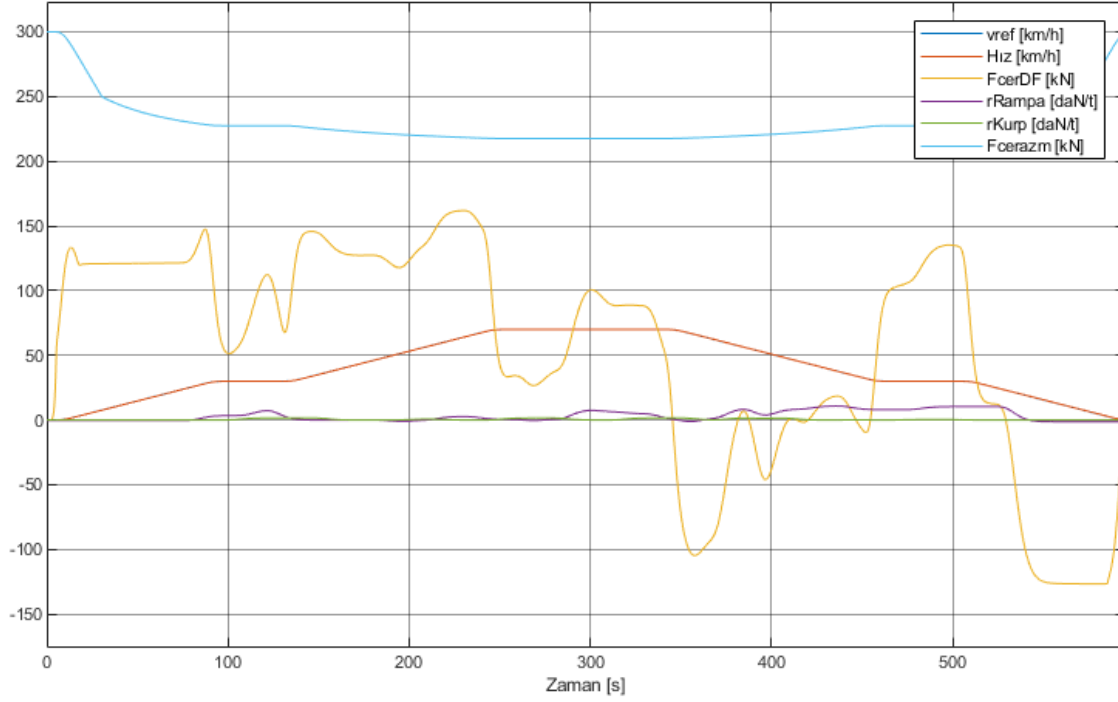
Irmak-Yahşihan, azami direnç durumu için simülasyon sonucu Şekil 10.'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Irmak-Yahşihan, azami direnç durumunda seyir simülasyonu

Şekil 10.'da görülen simülasyon boyunca referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile takip edilmiş ve seyir süresi yine 1325 s'dir. İlk duruma kıyasla harekete karşı gelen kuvvetlerin şiddetlerindeki farka rağmen aynı seyir süresi temin edilmiştir.

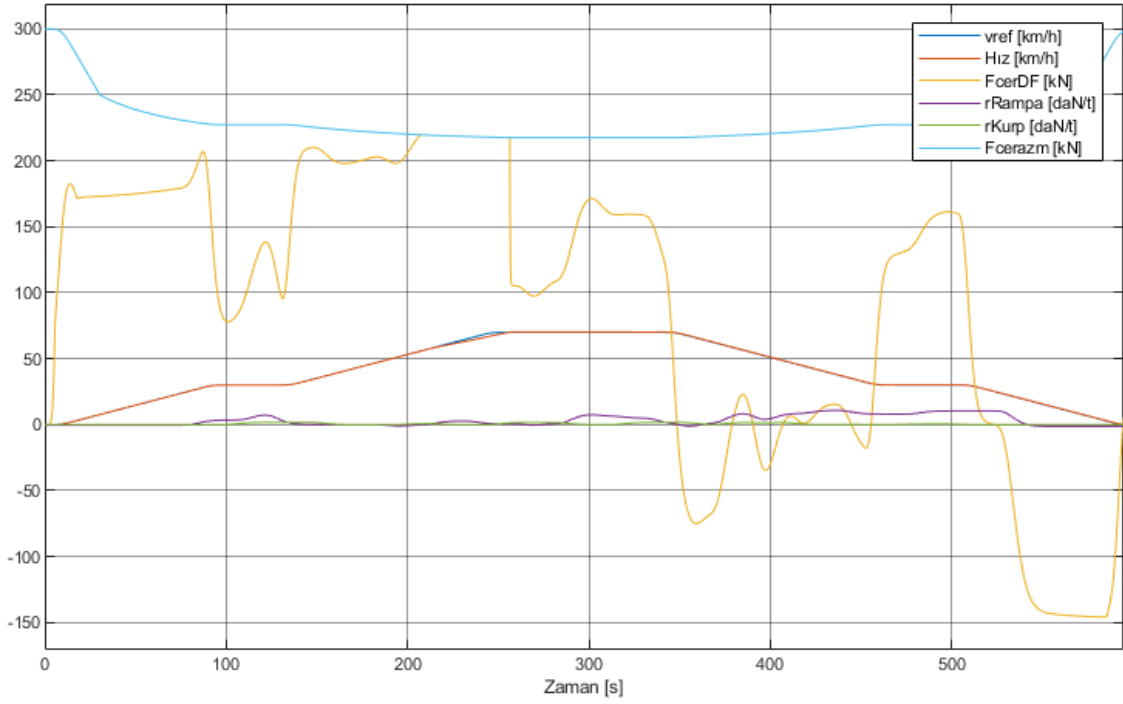
Yahşihan-Kırıkkale, asgari direnç durumu için simülasyon sonucu Şekil 11.'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Yahşihan-Kırıkkale, asgari direnç durumunda seyir simülasyonu

Şekil 11.'de görülen simülasyon boyunca referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile takip edilmiş ve seyir süresi 594 s'dir.

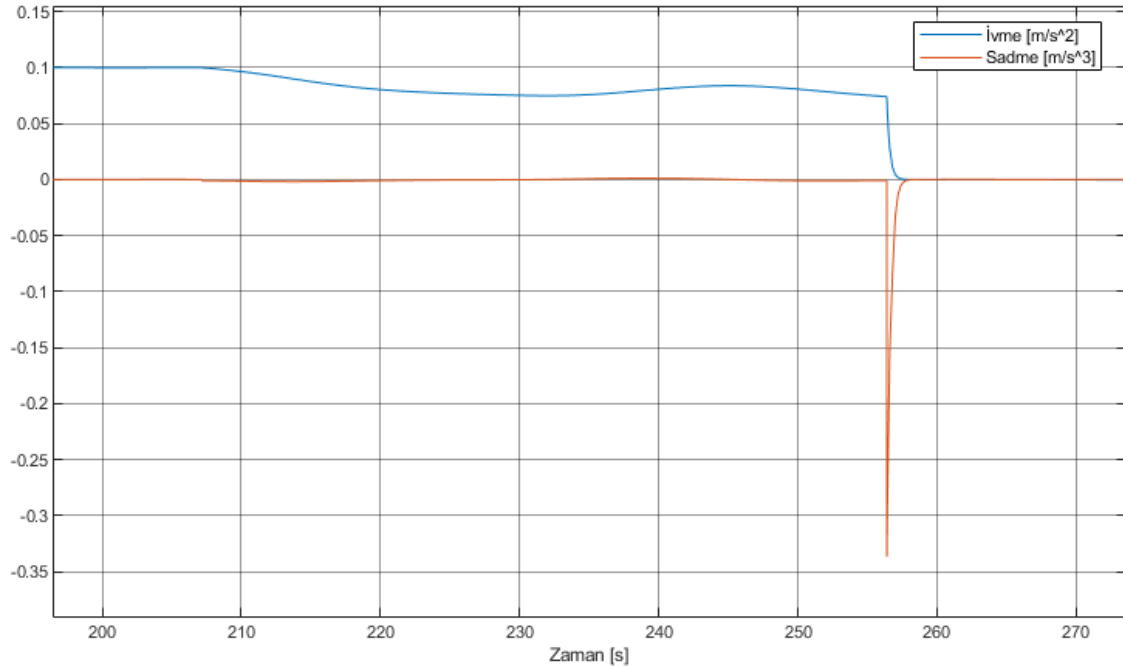
Yahşihan-Kırıkkale, azami direnç durumu için simülasyon sonucu Şekil 12.'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Yahşihan-Kırıkkale, azami direnç durumunda seyir simülasyonu

Şekil 12.'deki simülasyonda kontrol sinyalinin azami cer kuvveti ile sınırlandırıldığı süreç haricinde referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile takip edilmiştir. Kuvvet sınırlı süreçte, referans hızın peyderpey 2,5 km/h'e kadar altına düşülmesini müteakip referans hız %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası ile tekrar yakalanmıştır. 50 s süren kuvvet sınırlı süreçte hafif hız kaybının yeterince hızlı geçici rejim cevabı ile telafi edilmesi ile kayıp yaşanmamış olup seyir süresi 596 s'dir.

Kontrol sinyalinin azami cer kuvveti ile sınırlandırıldığı süreçte ivmenin [m/s^2] ve sadmenin [m/s^3] zamana [s] bağlı değişimi Şekil 13.'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Yahşihan-Kırıkkale, azami direnç durumundaki kuvvet sınırlı süreçte ivme ve sadme

Şekil 13.'te görüldüğü üzere, 206. saniyeden sonra kontrol sinyali sınırlanmaya, nihayetinde referans hızdan uzaklaşmaya başlanmaktadır. Bu süreçte daha çok yola bağlı dirençlerin (rampa ve kurp) tesiriyle ivme hafif değişerek, sabit değere oturmuş olan referans hızda da haliyle yaklaşılmaktadır. 256. saniyede referans hız yakalandığı için kontrol sinyali süratle takriben 110 kN azalarak sistemde $-0,34 \text{ m/s}^3$ değerinde sadmeye sebep olmaktadır. DC cer motorlu lokomotiflerde şöntleme ve transisyon anlarında benzer kuvvet değişimleri meydana geldiğinden bu sadmenin ciddi problem teşkil etmeyeceği mülahaza olunmuştur.

4. Sonuç

Modern bir elektrikli anahat lokomotifinde cer ve dinamik fren kuvvetleri ile hız kontrolü yapılması için PI kontrolcü tasarlanmış ve tren seyir simülasyonu için MATLAB Simulink ortamında oluşturulan dinamik sistem modeline entegre edilmiştir. Halihazırda işletilen bir yük treninin seyrinden seçilen iki safhada, seyir direnci ve kütle faktörünün farklı değerleri için kapalı çevrim simülasyonlar yapılarak sistem davranışı ve kontrolcünün başarısı incelenmiştir.

Hızlı geçici rejim cevabı, %0 aşma ve %0 kalıcı rejim hatası kriterleri için yapılan kontrolcü tasarımının modele entegrasyonu neticesi; simüle edilen her iki safhada da seyir direncinin ve kütle faktörünün asgari ve azami durumlarında yolun aynı sürede katedildiği, yani harekete karşı gelen kuvvetlerin şiddetlerindeki farklı değerler için kontrolcünün başarılı olduğu görülmüştür.

Kontrol sinyalinin lokomotif tasarımından kaynaklı azami kuvvet ile sınırlanması sebebiyle referans hızdan uzaklaştığında, kontrolcü tasarımında riayet edilen performans kriterleri sayesinde sistem yeterince hızlı bir geçici rejim cevabı ile kısa müddette referans hızı geri yakalamaktadır.

Tasarlanan kontrolcünün gerçek sisteme entegrasyonu halinde, tren idaresinin esası olan hız kontrolünün kısmen otomatikleşmesi suretiyle henüz dünya tarihinde da çok az örneği bulunan, açık demiryolu şebekesindeki katarlarda tren makinistliğinin otomasyonu için ülkemiz demiryollarında önemli bir merhale katedilecektir.

Kaynakça

- [1] E. Günindi, T. Efil, and H. Ülker, "Lokomotif ve vagonlardan müteşekkil bir trenin dinamik modellenmesi ve açık çevrim simülasyonu," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 171–183, Jul. 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1324847.
- [2] R. C. Ramírez, I. Adin, J. Goya, U. Alvarado, A. Brazalez, and J. Mendizabal, "Freight train in the age of self-driving vehicles. A taxonomy review," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 9750–9762, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144602.
- [3] Progress Rail, *Talos™ Train Automation*. (Nov. 22, 2019). Accessed: Oct. 11, 2023. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wB6VC1JldU>
- [4] Wabtec Corporation, *Wabtec's Trip Optimizer™*. (Aug. 26, 2020). Accessed: Oct. 11, 2023. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=kCwajO3dMGs>
- [5] Alstom, "SNCF and its partners run the first semi-autonomous train of the national railway network," [Online]. Available: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/12/sncf-and-its-partners-run-first-semi-autonomous-train-national-railway> [Accessed Oct. 11, 2023]
- [6] SNCF, "Driverless trains: On track for a rail revolution," [Online]. Available: <https://www.sncf.com/en/innovation-development/innovation-research/driverless-trains-to-run-in-2023> [Accessed Oct. 11, 2023]
- [7] TCDD, "Kapasite Yönetim Dairesi Görevleri," [Online]. Available: <https://www.tcdd.gov.tr/kapasite-yonetim-dairesi-gorevleri> [Accessed Oct. 11, 2023]
- [8] TCDD, "Enerji yönetimi ve iklim değişikliği eylem planı 2023-2025," T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, Nov. 28, 2022. Accessed: Oct. 11, 2023. [Online]. Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/eylemplani/eylemplani.pdf>

- [9] *Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts*, IEC 62290-1, 2014.
- [10] L. Cantone, T. Durand, A. Ottati, G. Russo, and R. Tione, “The digital automatic coupler (DAC): an effective way to sustainably increase the efficiency of freight transport in Europe,” *Sustainability*, vol. 14, no. 23, pp. 15671, Nov. 2022, doi: 10.3390/su142315671.
- [11] A. M. Rilo Cañas, T. Rozynek, and W. Sawczuk, “Test train with digital automatic couplers DAC in Poland,” *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*, Dec. 2022, doi: 10.53502/RAIL-158487.
- [12] E. Taşkaya, “Fotovoltaik-yakıt hücreli bir hibrit elektrikli aracın modellenmesi ve simülasyonu,” M.S. thesis, Bursa Tech. Univ. Graduate School, Bursa, Türkiye, 2022.
- [13] J. Wang, W. Li, J. Li, Y. Liu, B. Song, and H. Gao, “Modeling a driver’s directional and longitudinal speed control based on racing track features,” *Shock and Vib.*, vol. 2018, Art. no. 7487295, doi: 10.1155/2018/7487295.
- [14] X. Wang, Z. Xiao, M. Chen, P. Sun, Q. Wang, and X. Feng, “Energy-efficient speed profile optimization and sliding mode speed tracking for metros,” *Energies*, vol. 13, no. 22, pp. 6093, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13226093.
- [15] K. D. Kirmayer and S. G. Yurasko, “Automation comments,” The Association of American Railroads, Washington, DC, USA, May 7, 2018. Accessed: Oct. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.aar.org/wp-content/uploads/2018/05/AAR-Automation-comments.pdf>
- [16] TCDD, “2024 Şebeke Bildirimi,” T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, Version 8.1, 2023. Accessed: Oct. 11, 2023. [Online]. Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/sebekebildirimi/2024/2024sebekebildirimi801.pdf>
- [17] *Standard designation of axle arrangement on locomotives and multiple-unit sets*, UIC Code 650, 1983.
- [18] *Definition of the rated output of electric locomotives and motive power units*, UIC Code 614, 1990.
- [19] H. A. Marta and K. D. Mels, “Wheel-rail adhesion,” *ASME J. Eng. Ind.*, vol. 91, no. 3, pp. 839–846, Aug. 1969, doi: 10.1115/1.3591704.
- [20] A. E. Müller, “Adhesion and wheel slip,” *The Brown Boveri Review*, vol. 38, no. 7–8, Jul./Aug. 1951.
- [21] W. Zhang, J. Chen, X. Wu, and X. Jin, “Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig,” *Wear*, vol. 253, no. 1–2, pp. 82–88, 2002. doi: 10.1016/S0043-1648(02)00086-8.
- [22] C. Urlu, *Demiryolu araçlarının ileri dinamiği*. Ankara, Türkiye: TCDD Yayınları, 1999.
- [23] E. W. Curtius and A. Kniffler, “Neue erkenntnisse über die haftung zwischen treibrad und schiene,” *Elektrische Bahnen*, vol. 21, no. 9, pp. 201–210, 1950.
- [24] Renfe, “Determinación de cargas máximas y rampas características,” Gerencia de Gestión de Capacidades de la U.N. de Circulación, Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles, Madrid, Spain, Rep. Norma Técnica NT – GGC – 6, May 1, 2001.
- [25] Škoda Transportation a.s., “Cer Eğrileri ve Seyir Simülasyonları TCDD Elektrikli Lokomotifler,” 2011.
- [26] *Specific sub-system requirements (traction, braking, etc.) for EMU/DMU, locomotives and driving coaches (Rolling stock sub-system requirements, requirements for economic purposes, requirements for railway standardisation)*, UIC Code 612-2, 2009.
- [27] *Driver machine interfaces for EMU/DMU, locomotives and driving coaches - Functional and system requirements associated with harmonised driver machine interfaces*, UIC Code 612-0, 2009.
- [28] *Conditions to be observed by the dynamic brake of locomotives and motor coaches so that the extra braking effort produced can be taken into account for the calculation of the braked-weight*, UIC Code 544-2, 1983.
- [29] *Brakes - Disc brakes and their application - General conditions for the approval of brake pads*, UIC Code 541-3, 2010.
- [30] *GT26CW-2 Lokomotif Servis El Kitabı*, 2nd ed., Electro-Motive Division of General Motors Co., La Grange, IL, USA, 2003.
- [31] Ö. Akbayır, “Demiryolu araçlarında enerji verimliliği ve tasarrufu,” in *3. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'16)*, Karabük, Türkiye, Oct. 13–15, 2016, pp. 457–465.
- [32] Eress - Erex, “Article: NMBS Logistics reduces energy consumption by 25%,” Dec. 21, 2015. [Online]. Available: <https://eress.eu/news/news/article-nmbs-logistics-reduces-energy-consumption-by-25> [Accessed Oct. 11, 2023]
- [33] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson Educ. Inc., 2017.
- [34] C. Somaschini, D. Rocchi, G. Tomasini, and P. Schito, “Simplified estimation of train resistance parameters: full scale experimental tests and analysis,” in *Proc. 3rd Int. Conf. Railway Tech. Res. Develop. and Maintenance*, Stirlingshire, Scotland, 2016, Paper 58.

- [35] Ö. Akbayır and B. Başeğmez, “Türkiye şartlarına uygun vagon seyir direnci formülünün enerji verimliliği açısından deneysel olarak belirlenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 65–75, Jan. 2021, doi: 10.47072/demiryolu.796392.
- [36] G. Strahl, “Verfahren zur bestimmung der belastungsgrenzen der dampflokomotiven,” *Z. Des. Vereins Dtsch. Ing.*, vol. 57, pp. 251, 1913.

Özgeçmiş



Ege GÜNİNDİ

Bursa Teknik Üniversitesinde makine mühendisliği lisans eğitimine devam etmektedir. İlgi alanına giren araştırma konuları demiryolu cer mekaniği konularıdır.

E-Posta: gunindiege@gmail.com



Hakan ÜLKER

Lisans eğitimini Gaziantep Üniversitesinde, yüksek lisans eğitimini İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde, doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. 2018 yılından bu yana Bursa Teknik Üniversitesinde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: hakan.ulker@btu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ege GÜNİNDİ: Yazma-orijinal taslak hazırlama, Metodoloji, Kaynaklar, Yazılım, Görselleştirme. Hakan ÜLKER: Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Metodoloji, İnceleme, Yazılım, Kaynaklar.



Konvansiyonel Kazı Yöntemleriyle Açılan Demiryolu Tünel Projeleri Yapım ve İşletme Süreçleri için Risk Esaslı Uygulama Modeli Önerisi

Özgür SATICI^{id}

Karayolları Genel Müdürlüğü, İç Denetim Birimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

osatici@gmail.com

(Alınış/Received: 01.11.2023, Kabul/Accepted: 09.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Tüm mühendislik projeleri aynı zamanda bir risk yönetim uygulamasıdır. Bu nedenle mühendisler projeleri tasarlarırken ve yönetirken bilinçli ya da bilinçsiz şekilde proje risklerini de yönetmek zorundadır. Beklenmeyen durumlarla karşılaşılacak mühendislik projelerinden biri de yeraltı mühendislik yapılarından biri olan tünel projeleridir. Bu çalışma yaygın bilinen tünel yapım teknikleri ile risk yönetim prensiplerini bir araya getirecek bir bakış açısı ortaya koymakta ve bir tünel projesinin uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek olası sorunlara karşı önceden önlem alınmasına yardımcı olacak bir yöntem önermektedir. Bu çalışmanın amacı özellikle yeraltı mühendislik projelerinde risk yönetim ilke ve tekniklerinin kullanımı ile ilgili bir farkındalık yaratmaktır. Bu bağlamda tünel mühendislik tasarım ve kazı aşamaları senaryo yapılandırma modeli yöntemi ile değerlendirilmiş ve tünel projesinin tasarımdan yapım aşamasına kadar olan süreçlerde risk oluşturabilecek önemli belirsizlikler tanımlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Risk değerlendirme, Risk yönetimi, Senaryo yapılandırma modeli, Tünel projelendirilmesi, Yeraltı kazı yöntemleri

Risk Assessment Based Application Model for Design, Construction and Operational Stages for Conventionally Excavated Railway Tunnels

Abstract: Every engineering project inherently involves applications of risk management. For this reason engineers have to manage the risks consciously or unconsciously. Underground excavations are the projects that unexpected situations may occur mostly. This study combines common tunnel construction techniques and risk management principles and proposes a method that will help to take precautions against possible problems that may arise during the implementation of a tunnel project. In this context, tunnel engineering design and excavation phases were evaluated with the scenario structuring model and important uncertainties that could pose risks in the processes from the design to the construction phase of the tunnel project were defined. The aim of this study is to raise awareness about the use of risk management principles and techniques, especially in underground engineering projects.

Keywords: Risk assessment; Risk management; Scenario structuring model; Tunnel project; Underground excavation methods.

1. Giriş

Yeraltı kazılarında temel felsefe; önce kazı yapılması sonra desteklenmesi veya destekler uygulandıktan sonra kazının yapılması şeklindedir. Bu temel felsefe çerçevesinde çeşitli tünel açma yöntemleri geliştirilmiştir [1], [2]. Ancak bu yöntemlerin hiçbiri bir tünel projesinin risklerini tünelciliğin temel ilke ve prensipleri ile birlikte değerlendirmemiştir. Bazı araştırmalarda kazıdaki jeoteknik risklere odaklanılmış, bazıları sağlık ve güvenlik riskleri üstünde durmuş, birtakım araştırmalarda da sıkışan zemin koşullarındaki Tünel Delme Makinesi (yaygın bilinen adı: TBM - Tunnel Boring Machine) kazı risklerini incelenmiştir [3-19]. Bir tünel projesinde karşılaşılacak riskler teknik (mühendislik tabanlı) ve teknik olmayan olarak iki grupta değerlendirilebilir. Tünel kazı ekibinin, yüklenicinin tecrübesi, sözleşme koşulları, ihale bedeli, iklim koşulları, küresel salgın vb. faktörler teknik olmayan risk faktörleri içinde

Atıf için/Cite as: Ö. Satıcı, "Konvansiyonel kazı yöntemleriyle açılan demiryolu tünel proje, yapım ve işletme süreçleri için risk esaslı uygulama modeli önerisi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 147-159, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1384548

değerlendirilebilir. Tünel kazı deformasyonları, plastik zon kalınlığının gelişimi, jeolojik koşullar, bölgesel tektonizma gibi etkenler ise teknik risk faktörleri olarak değerlendirilebilir. Bu risk faktörleri; tünel kazı güvenliği, tünel duraylılığı ve dolayısı ile maliyet ve projenin öngörülen tamamlanma takvimi üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu çalışmanın amacı bir tünel projesinin sahadaki jeolojik-jeoteknik etütler ile mühendislik jeolojisi modelleme çalışmalarından başlayarak, kazı destek aşamaları ve sonrasında ikincil işler olarak tabir edilen aydınlatma ve havalandırma projeleri ile işletme dönemi projelerini de kapsayacak şekilde belirsizlikleri ve projenin risklerini ortaya koyabilmek, bunların sistematik bir şekilde sınıflamasını yapabilmek ve bu konuda bir farkındalık oluşturabilmektir.

2. Metot

Bu çalışmada risk yönetim esaslı tünel proje tasarım ve yapım yöntemi önerilmiş, bir tünel projesini etkileyebilecek olası riskler ve etkileri incelenmiştir. Çalışmada öncelikle klasik kazı ve destekleme için bilinen tünel tasarım ve yapım yöntemleri anlatılmış, daha sonra risk yönetimi ile ilgili temel kavramlar verilmiş ve tünel yapımında risklerin değerlendirilmesi ile ilgili önceki çalışmalar aktarılmıştır. Daha sonra tünel proje adımları risk yönetimi bakış açısı ve temel mühendislik ilkeleri ışığında incelenmiştir. Senaryo Yapılandırma Modeli yaklaşımı kullanılarak bir tünel projesine ilişkin riskler, tasarım aşamasından yapım aşamasına kadar belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır. Daha sonra belirlenen riskler olası senaryolar ışığında yorumlanarak risk yönetimine dayalı tünel proje ve yapım yöntemi önerilmiştir.

3. Yaygın Bilinen Klasik Tünel Açma Yöntemleri

Günümüzde tünel yapım yöntemlerinin büyük bir kısmı aşamalı kazı ya da tam ayna kazısının çeşitli türevleri şeklindedir [1], [2], [20], [21]. Bu yöntemlerin dezavantajı tünel kazı derinliği, kaya kütlelerinin jeolojik özelliklerinden (mineralojik, petrografik, jeomekanik) kaynaklanan hassasiyetleri, kazı alanının boyutlarını ve kazı sonrası kaya davranışlarını dikkate almıyor olmalarıdır. Ayrıca bu yöntemler, kullanılacak desteğin tipi, dizilimi, boyutları ve en önemlisi bunların uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek belirsizliklerle ilgili bir değerlendirme ve öneride bulunmamaktadır [1-4], [6], [14], [16], [21-30]. Tasarım aşamasında dikkate alınmayan bir takım hata ve eksikliklerden kaynaklanan belirsizlikler (jeolojik ve jeoteknik belirsizlikler) yapım aşaması riskleri olarak ortaya çıkacaktır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için kaya kütlelerinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri tam olarak bilinmeli ve buna uygun olarak destekleme tasarımı yapılmalıdır. Aksi takdirde kazı duraylılığını sağlamakta sorunlar yaşanacaktır. Ancak günümüz yöntemleri kaya kütle davranışlarını nesnel ve niceliksel olarak tanımlamakta yeterli değildir [1], [2], [25], [26], [28], [29]. NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ve ADECO R.-S. (Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils, Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi) yöntemleri çeşitli kaya sınıflama sistemlerine (Q; Engineering Classification of Rock Masses [22], RMR; Rock Mass Rating system [23], RMi; Rock Mass Index [29], RQD; Rock Quality Designation [30], GSI; Geological Strength Index [31], M-RMR; Modified RMR [32], RSR; Rock Structure Rating [33], Rock Load [34]) ve bu sistemler tarafından önerilen ampirik denklem ve grafikler esasına dayanmaktadır [8], [22], [23]. Kaya sınıflama sistemleri de bir takım öznel değerlendirme kriterleri içermekte ve bu öznel nedeni ile uygulama aşamasında risk oluşturabilecek birtakım belirsizlikleri bünyesinde barındırmaktadır [10]. NATM temelinde aşamalı kazı önerilmekte, zeminler duraylı, gevrek ve sıkışan şeklinde tanımlanmaktadır [35]. Bu yöntem basınç altında kazı sonrası kaya kütle davranışlarını gözleme ve bu bağlamda kazı performansını değerlendirme esasına dayanır. Bu nedenle de uygulaması sırasında kaya kütle sınıflama sistemleri ve onların ampirik yaklaşımlarını da kullanmaya ihtiyaç duyar [25], [27]. Ancak NATM'nin kazı sonrası kaya davranışını izleme ve değerlendirme kriterleri oldukça öznel ve kullanılan yöntem, kazı ekibi, hızı, jeolojik – jeoteknik belirsizlikler, makine, ekipman, patlatma hataları gibi konulardan kaynaklanacak belirsizlikleri ve bunların sonucu ortaya çıkacak risklerin projeye olumsuz etkilerini dikkate

almaz. Tünel yapımında kullanılan diğer bir yöntem ise ADECO adı verilen deformasyonların kontrollü analizi yaklaşımıdır. Bu yaklaşım NATM'nin aşamalı kazı önerisinin aksine tam ayna kazı yöntemini savunur. Bu yöntem kaya kütle yapısı nasıl olursa olsun kazı aynasının tam kesit desteklenmesi gerektiğini savunur [2], [26], [28]. Ancak, tıpkı NATM de olduğu gibi ADECO yaklaşımı da öznel ve kullanılan yöntemden, kullanıcılardan ve kaya kütle davranışından kaynaklanabilecek belirsizlikleri değerlendirmez. Kazı sonrası kaya davranışını değerlendirirken nesnel değerlendirme yöntemleri kullanmaz. Tünel yapımı için kullanılan yöntemler kazının ve kaya kütle davranışının gözlemsel değerlendirmesine dayanmaktadır. Bu da yapılan değerlendirmenin öznel ve niteliksel olması anlamına gelir. Oysa ki, böyle büyük inşaat projelerinde niceliksel ve nesnel değerlendirme birtakım belirsizlikleri de beraberinde getirecektir [4], [10]. Zira yeraltı kazıları ve tünel projeleri özgün çalışmalardır ve jeolojik birimler aynı olsa dahi iki farklı lokasyondaki kaya kütle davranışları aynı olmayacaktır. Bu nedenle tünel kazı çalışmalarına başlamadan önce detaylı mühendislik jeolojisi modeli oluşturulmalı, kazısı yapılacak birimlerin jeoteknik özellikleri tanımlanmalı ve yorumlanmalıdır. Ancak, zaman zaman çeşitli nedenlerle, ki bunlar çoğu zaman maliyet ve zaman kaynaklı olurlar, kazı alanının jeolojik ve jeoteknik özellikleri istenilen ölçüde tanımlanamayabilir. Saha araştırmaları ile tam olarak aydınlatılamayan jeolojik koşullarla ilgili olarak yapım aşamasında gelişebilecek problemleri öngörebilmek için ise risk esaslı değerlendirme yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir [3], [5-7], [9], [13], [16-19].

3. Tünel Projelerinde Risk Değerlendirme ile İlgili Önceki Çalışmalar

Eskenes vd. [6] çalışmasında tünelcilikte risk yönetim prosedürlerine ilişkin bir rehber önerisi sunulmuştur. Bu rehber göre tünel projesine ilişkin risk yönetimi ön tasarım, teklif-sözleşme ve inşaat aşamaları olmak üzere 3 aşamada incelenmiş, bir kısmı niteliksel bir kısmı niceliksel olmak üzere genel risk yönetim süreçleri ve karar destek araçları verilmiş fakat tünel proje ve kazı aşamaları için olası risk kategorileri tanımlanmamıştır. Haines [36] yeraltı yapılarına ilişkin riskleri kırılma ve esneklik yönünden teorik olarak incelemiştir. Schubert [11], Poeschl ve Kleberger [10] tünel ve jeoteknik çalışmalarda risk yönetim kavramını çalışmışlardır. Bu çalışmalarda risk kavramı jeolojik faktörler ve tünel duraylılığı yönünden incelenmiştir. Risk değerlendirmesi için simetrik risk matrisi kullanılmış ancak projeye ilişkin bütçe, kalite ve zaman bileşenleri risk unsuru olarak değerlendirilmemiştir. Brown [3] yeraltı kazılarında risk değerlendirme ile ilgili en kapsamlı çalışmalardan biridir. Bu çalışmada çeşitli risk analiz ve değerlendirme teknikleri tanımlanmış ve yeraltı yapıları için risk analizine ilişkin bir değerlendirme önerisi sunulmuştur. Bu çalışmada jeoteknik risklerin tanımlanması ve değerlendirmesi için olasılıksal bir değerlendirme aracı sunulmuştur. Olası risk tanımlamaları ve bunların tünel açma projesine potansiyel etkileri bu çalışmada yer almamaktadır. Sousa vd. [15] kaya patlamasına ilişkin risk değerlendirmesi için veri madenciliği tekniğini kullanmışlardır. Bu amaçla Bayes ağı kullanılarak çeşitli mühendislik parametreleri, jeolojik yapı ve kaya patlamalarına ilişkin veri tabanı bilgileri değerlendirilmiştir. Gutierrez-Fernandez [8] yeraltı yapılarında bazı yaygın kullanılan kaya kütle sınıflandırma sistemlerini (RMR, GSI, Q ve RMI gibi) kalitatif ve kantitatif risk analiz yöntemleri kullanarak analiz etmişlerdir. İnşaat ve kaya mühendisliği uygulamaları açısından bazı jeoteknik risk faktörleri, olasılıkları değerlendirilmiş ve jeolojik olaylardan kaynaklanacak sorunlar ve bunlara bağlı maliyet artışlarına da değinilmiştir. Fakat risklerin azaltılmasına ilişkin bir strateji ve öneri verilmemiş, daha ziyade kaya mekaniği ve jeoteknik uygulamalarda risk değerlendirmenin önemi vurgulanmıştır. Tidlund et al. [17] İzlanda da yürütülen bir tünel projesi için gözlemsel olarak risk yönetim çalışması uygulamıştır. Bu çalışmada da risk analizleri gözlemsel hasar göstergeleri adı verilen ve daha çok jeoteknik risklere karşı önceden önlem almayı sağlayan bir değerlendirme kullanılmıştır. Jeoteknik çalışmalarda, kaya mekaniği ve tünelcilik uygulamalarında bazı risk değerlendirme yöntemleri kullanılmış olmasına karşın bir tünel projesinin bütüncül olarak risklerinin değerlendirmesine ilişkin kapsamlı bir çalışma bugüne kadar uygulamada yer almamıştır. Özellikle bilinen tünel açma yöntemleri ile jeoteknik ve kaya mühendisliği prensiplerinin risk

esaslı değerlendirilmesi ile ortaya konacak yöntem söz konusu mühendislik uygulamalarının daha güvenli ve ekonomik olarak yapılmasına imkan sağlayacaktır.

4. Risk Yönetimine İlişkin Bazı Temel Kavramlar

Risk ve belirsizlik kavramları risk yönetimi hakkında bilinmesi gereken iki temel kavramdır. Risk en basit haliyle hedeflere etkisi olan belirsizliklerdir, dolayısı ile olasılık içerir. Belirsizlik ise süreç, devamlılık, olay vb. yönlerden belirsiz olma durumudur. Eğer bir durum belirsizlik içeriyorsa, belirsizliğe neden olan olasılıklar durumla ilişkili bilgi eksikliği nedeni ile tanımlanamıyor demektir [37]. Haimes [38] belirsizliği; bir durumu belirsiz yapan ölçülemeyen veya belirlenemeyen olasılıklar şeklinde tanımlamıştır. Risk yönetimi çeşitli kontroller kullanarak riskin olumsuz etkisini azaltmaya çalışır [39]. Bu bağlamda riske karşı kontroller arttıkça riskin tehdit etkisi azalacak, ya da fırsatın ortaya çıkma olasılığı artacaktır [36], [40], [41].

5. Bir Demiryolu Tünel Projesi İçin Risk Oluşturabilecek Koşullu Bağlantıların Belirlenmesi

Yeraltı yapıları ve kazıları çok sayıda belirsizlik içerdiğinden bir tünel kazısı projesinde başarı için çok sayıda belirsizliğin tespit edilmesi ve bunların üstesinden gelinmesi zorunludur [4], [6], [10], [42]. Bu nedenle zemin koşulları, kazı derinliği, sözleşme şartları ve tünel kazı ekibinin ve davranışlarının değişkenlik gösterdiği ve dolayısı ile belirsizlik içerdiği her tünel inşaatı projesi için aynı kazı yöntemini uygulamak ne ekonomik ne de güvenli olacaktır [11]. Dolayısı ile, yürütülen tünel projesine özgü riskler belirlenmeli ve risk yönetim ilke ve prensipleri çerçevesinde mühendislik uygulamaları ile birlikte yönetilmelidir [4], [12], [43]. Tünel projesi ile ilgili belirsizlikler çoğunlukla mühendislik tasarım parametrelerini etkileyecek teknik ve teknik olmayan iki grup faktörle alakalıdır [4], [6], [10], [11]. Bir tünel projesi için 4 temel aşama tanımlanabilir; saha araştırmaları ve tasarım çalışmaları, kazı ve hafriyat çalışmaları, destekleme ve kaplama çalışmaları ile ikincil işler adı verilen işletme dönemine yönelik çalışmalar. Bu aşamaların her biri risk barındıran belirsizlikler içerir ve her aşama sonrakinin başarısını etkileyecektir [4], [6], [11]. Topoğrafik haritalar ve mühendislik jeolojisi haritaları, jeolojik boy profiller ve enine kesitler, jeoloji, jeolojik birimlerin mühendislik özellikleri, jeoteknik saha araştırmaları ve laboratuvar çalışmaları tünel tasarım projesinin temel girdileridir. Bu girdiler ve diğer teknik olmayan değişkenler istatistik bilimi bakış açısı ile projenin bağımsız değişkenleri olarak sınıflandırılabilirler [24], [44], [45]. Bu nedenle istatistiksel modeller belirsizlikleri anlamak ve projenin risklerini analiz etmek için tünel mühendisliği ilke ve prensipleri ile birlikte kullanılmalıdır. İstatistiksel modellemede deneyim, bilgi birikimi ve veri analitiği süreçleri önemlidir, ancak risk modellerini kurabilmek için başka bilinmeyenlere de ihtiyaç olacaktır [3]. Bu sebeple tünel mühendisliğinde risk analizleri için istatistiksel modeller kurulurken tünel projelendirme sistemini ve çevresi ile olabilecek tüm etkileşimleri dikkate almak gereklidir. Esasen bu durum çeşitli olasılıksal koşullar altında bulunan tüm durumsal modeller için genel bir önkoşuldur [38]. Bu nedenle bu çalışmada ilk defa Kaplan ve Garrick [39] tarafından ortaya konulmuş olan Senaryo Yapılandırma Modeli (SYM, Scenario Structuring Model) kullanılmıştır. SYM de risklerin değerlendirilmesi için matematiksel model oluşturmak üzere bir dizi değişken kullanılmıştır [36], [38], [39]. Bir tünel inşaat projesinde SYM için seçilen değişkenler ve onların koşullu bağlantıları Şekil 1.'de verilmiştir. Şeklin sol bölümü bağımlı değişkendeki duruma neden olan “sebebe” faktörü yani bağımsız değişkenlerin kategorizasyonlarını, sağ taraf ise söz konusu sebebe faktörü nedeniyle tetiklenebilecek ve bağımlı değişkende bir değişime sebebe olacak “etki”yi açıklamaktadır. Bu çalışmada, 4 bağımlı (etkilenen) ve 4 de bağımsız (etkileyen) değişken grubu tanımlanmıştır. Etkileyen grup “olası sebebe” grubu, etkilenen grup ise “sonuç” grubunu ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan sebebe değişkenleri grubu (bağımsız değişkenler); durumsal değişkenler (DuD), karar değişkenleri (KD), dışsal değişkenler (DıD) ve rassal değişkenlerdir (RD). Ana bağımlı değişken olan tünel yapım projesine bağılı sonuç değişkenleri (bağımlı değişkenler) ise; saha çalışmaları (SÇ), tasarım çalışmaları (TÇ), kazı destek işleri

(KDİ), işletme dönemi proje ve çalışmaları olarak sınıflandırılmıştır (İDÇ). Çalışmada bağımlı ve bağımsız değişkenlerin alt grupları ilişkili değişkene indis değeri verilerek gösterilmiştir. Bağımsız değişkenlere ilişkin açıklamalar burada verilmiştir. Bağımlı değişken grubu ise bir tünel inşaatı projesinin tüm teknik detaylarını oluşturduğundan detayları bu çalışmada sunulmamış sadece isim olarak verilmiştir (Şekil 1).

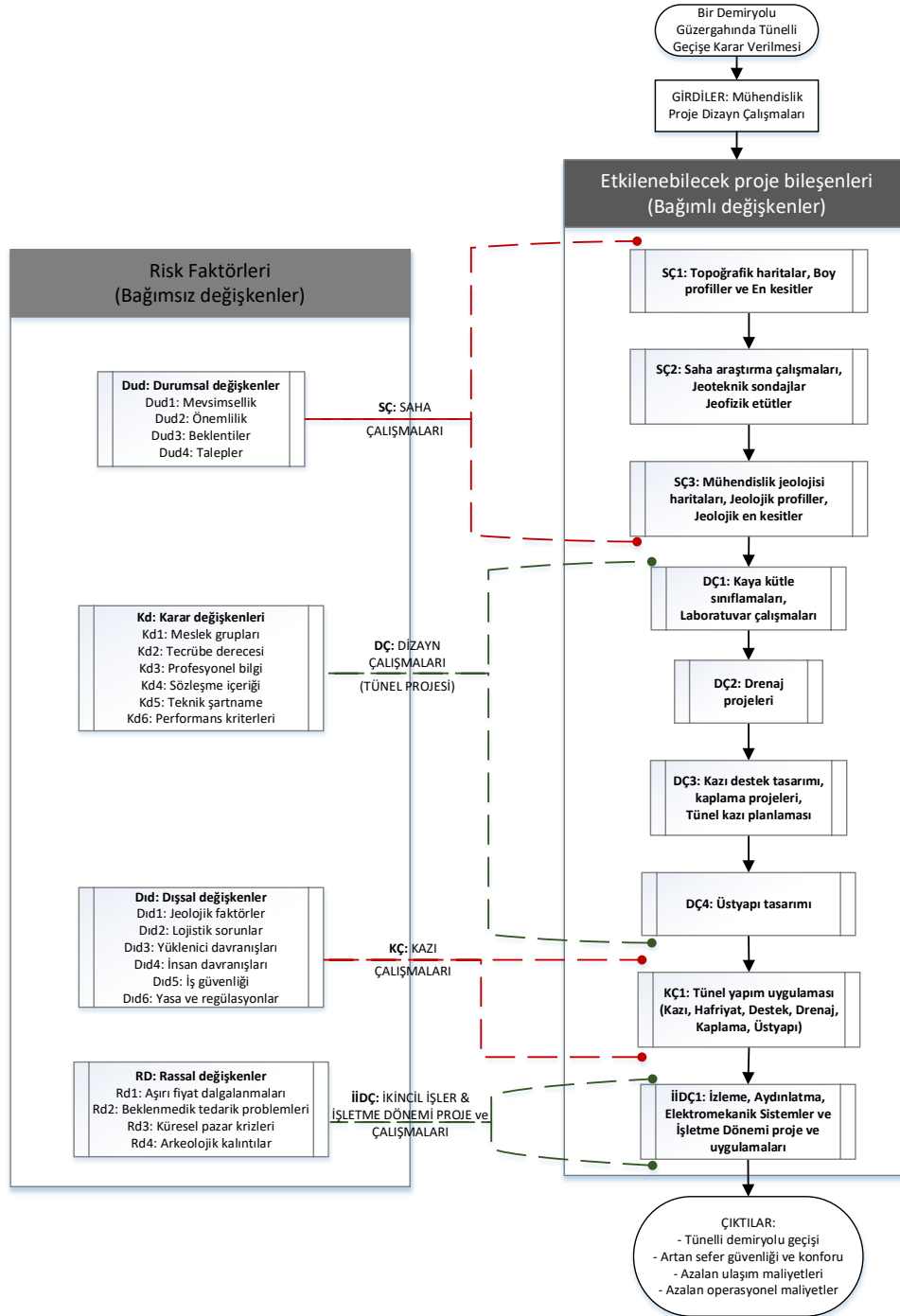
- Durumsal Değişkenler (DuD): Bu gruptaki değişkenler zamana bağlıdır, etkileri ve olasılıkları zamanla değişebilir. Dolayısıyla sistem veya projelerin içindeki durumsal değişkenlerin sürekli olarak izlenmesi gerekir [38].
- Karar Değişkenleri (KD): Bu gruptaki değişkenlerin proje başarısı üzerinde doğrudan ve güçlü etkileri vardır. Ancak, risk yönetim araç ve tekniklerinin kullanılması halinde durumsal değişkenlere göre statik ve daha kolay kontrol edilebilir yapıdadırlar.
- Dışsal Değişkenler (DıD): Bir tünel yapım projesi ile ilgili olarak önsel çalışmalar tasarım aşamasında ne kadar iyi yürütülmüş olursa olsun, tünelin açılacağı jeolojik birimlerin kazı sonrası davranışı ancak kazı başladıktan sonra gözlenebilir [11]. Yeraltı koşullarının tasarım aşamasında öngörülenden bazı farklılıklar göstermesi muhtemeldir. Bunlar bir tünel projesi ile ilgili önceden kontrol edilemeyen dışsal değişkenler içinde sınıflandırılabilir. Ayrıca, insan kaynaklı belirsizlik içeren ve önceden tahmin edilemeyen faktörler de bu grup içinde risk oluşturan değişkenler olarak sınıflandırılabilir. Dolayısı ile bu grup içinde sınıflandırılacak risk ve kontrollerin sürekli olarak izlenmesi gerekir.
- Rassal Değişkenlerdir (RD): Rassal değişkenler beklenmedik bir şekilde ve tamamen dış kaynaktan ortaya çıkarlar [46]. Proje mühendisinin bu gibi değişkenler üzerinde herhangi bir kontrolü olamayacaktır. Rassal değişkenler projeyi, herhangi bir zaman herhangi bir şekilde etkileyebilir. Çoğunlukla proje ile doğrudan bir bağlantıları da yoktur. Ancak bu değişken grubu içinde yer alan belirsizliklere bağlı doğacak riskler projenin ilerlemesinin önünde ciddi bir tehdit oluştururlar.

Yazarın öznel tecrübesi ve bilgi birikimi kullanılarak SYM ile bir tünel projesi için belirlenen değişkenler ve model bileşenleri yukarıda ana hatları ile özetlenmiş ve Şekil 1.'de koşullu bağlantıları verilmiştir. Şekil 1.'de oluşturulan koşullu bağlantılara bağlı oluşabilecek riskler için, uygun istatistiksel modeller kullanılarak (Bayes Ağı, Karar Ağacı Analizi, Monte Carlo Similasyonu vb.) risklere ilişkin olasılıklar da hesaplanabilir. Bu çalışmada verilen senaryo yapılandırma modelinde kullanılan içerik, modelde yer alan değişkenlerin ve risklerin adları değiştirilebilir veya yeniden adlandırılabilir. Burada bağımsız değişkenlere ilişkin tanımlanan riskler ve bunlara bağlı belirsizlikler nitel olarak tanımlanmış ancak tanımlama için sistematik bir yol (senaryo yapılandırma modeli) izlenmiştir. SYM olası riskleri belirlemede kullanılmış ve bu riskler kalitatif olarak değerlendirilmiştir. SYM oluşturulurken Şekil 2.'de verilen örnek iş kırılma yapısı esas alınmıştır. Oluşturulan model ve iş kırılma yapısı projeye yeni bilgiler geldikçe veya proje ihtiyaçlarına uygun şekilde revize edilebilir. Risk değerlendirme için sahadan toplanan sayısal veriler ışığında Bayes Ağı, Karar Ağacı, Monte Carlo Similasyonu gibi kantitatif yöntemler kullanılabilir, bu gibi sayısal yöntemlerin kullanılması risk analizlerin daha nesnel yapılmasına imkan tanıyacaktır. Ancak, bu çalışmanın amacı bugüne kadar önerilmiş olan tünel yapım yöntemleri yer almayan, risk esaslı tünel projelendirme ve yapım yöntemine ilişkin bir farkındalık yaratmaktır. Belirlenen risklere ilişkin değerlendirme için Tablo 1 de yer alan matris kullanılmıştır.

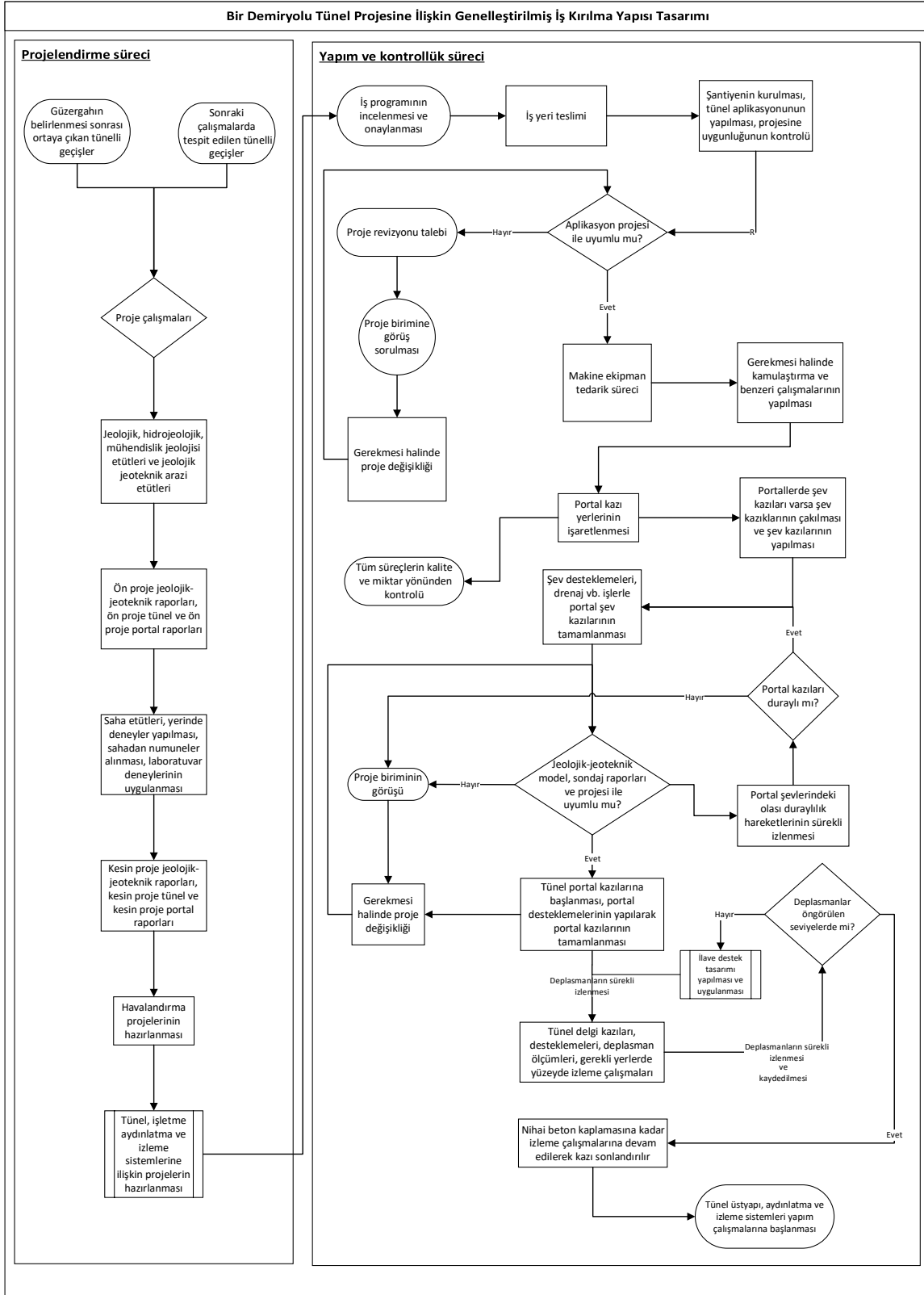
5.1. Demiryolu tünel projesine ilişkin risk esaslı projelendirme ve yapım yöntemi önerisi

Tablo 2 de SYM ile Şekil 2.'deki iş adımları için belirlenmiş olan risklere ilişkin Tablo 1 aracılığı ile yapılan analiz verilmiştir. Tablo 1 de verilen değerlendirme için eldeki veriler artıkça daha kantitatif ölçütler belirlenebilir. Tablo 1 de verilen risk değerlendirme matrisi aracılığı ile ortaya çıkan risk puanları Tablo 2 de gösterilmiştir. Tablo 2 de elde edilmiş olan risk puanlarına göre proje mühendisi söz konusu riske ilişkin bir alt sınır belirleyerek bu sınırın üstündeki risk puanları

için ya mevcut kontrolleri gözden geçirmeli ya da gerekli ise yeni kontroller tasarlamalıdır. Bu tasarımı yaparken Şekil 2.'dekine benzer bir iş kırılma yapısı oluşturmalı ve Şekil 3.'deki risk yönetim adımlarını uygulamalıdır. Çünkü, bu tip gömülü mühendislik yapılarında riskin neden olduğu sorunlar zincirleme etkiyle sonradan ortaya çıkacak ve bu aşamadan sonra riskin neden olduğu sorunun çözümü çok büyük miktarda zaman, işgücü ve parasal kaynağının harcanmasına neden olacaktır. Kontroller tasarlanırken veya risklere karşı aksiyon alırken izlenmesi gereken işlem adımları ise Şekil 3.'de verilmiştir.



Şekil 1. Demiryolu tünel yapım projesi için SYM modeli, değişkenler ve risk bağımlılıkları



Şekil 2. Demiryolu tünel yapım projesi için örnek bir iş kırılma yapısı tasarımı

Tablo 1. Kalitatif risk değerlendirme matrisi [47,48]

| | | ETKİ | | | | |
|----------|----------------|---------------|-----------|----------|------------|----------------|
| | | Çok düşük (1) | Düşük (2) | Orta (3) | Yüksek (4) | Çok yüksek (5) |
| OLASILIK | Çok yüksek (5) | 11 | 16 | 20 | 23 | 25 |
| | Yüksek (4) | 7 | 12 | 17 | 21 | 24 |
| | Orta (3) | 4 | 8 | 13 | 18 | 22 |
| | Düşük (2) | 2 | 5 | 9 | 14 | 19 |
| | Çok düşük (1) | 1 | 3 | 6 | 10 | 15 |

Olasılık Puanları (Geçmiş 10 proje düşünüldüğünde): Çok Yüksek; Her projede ortaya çıkmış, Yüksek; En az 7 projede ortaya çıkmış, Orta; En az 5 projede ortaya çıkmış, Düşük; En az 3 projede ortaya çıkmış, Çok Düşük; En az 1 projede ortaya çıkmış.

Etki Puanları: Çok Düşük; Çok düşük tutarlı mali kayıplar, faaliyetlerde kabul edilebilir aksaklıklar yaşanması, Düşük; Düşük tutarlı mali kayıplar, faaliyetin devamlılığına ilişkin düzeltilebilir düzeyde sorunlar yaşanması, Orta; Proje için orta ölçekli mali kayıplar, faaliyetin bir kısmının belli bir süre ile yürütülememesi ancak ilave kontrollerle sisteme tekrar eski esnekliğin kazandırılabilmesi, Yüksek; Ortaya çıkacak sorunlar nedeni ile kişilerin ciddi yaralanmaları, sakatlanmaları, büyük miktarda mali kayıplar oluşması, kurumsal itibar kaybı, faaliyetin bir süre durması, sosyal rahatsızlıklar oluşması, Çok Yüksek; Ortaya çıkacak sorunların, can kayıpları, çok büyük miktarda mali kayıplar, ciddi itibar sorunları ortaya çıkarması, faaliyetin uzun bir süre yürütülememesi

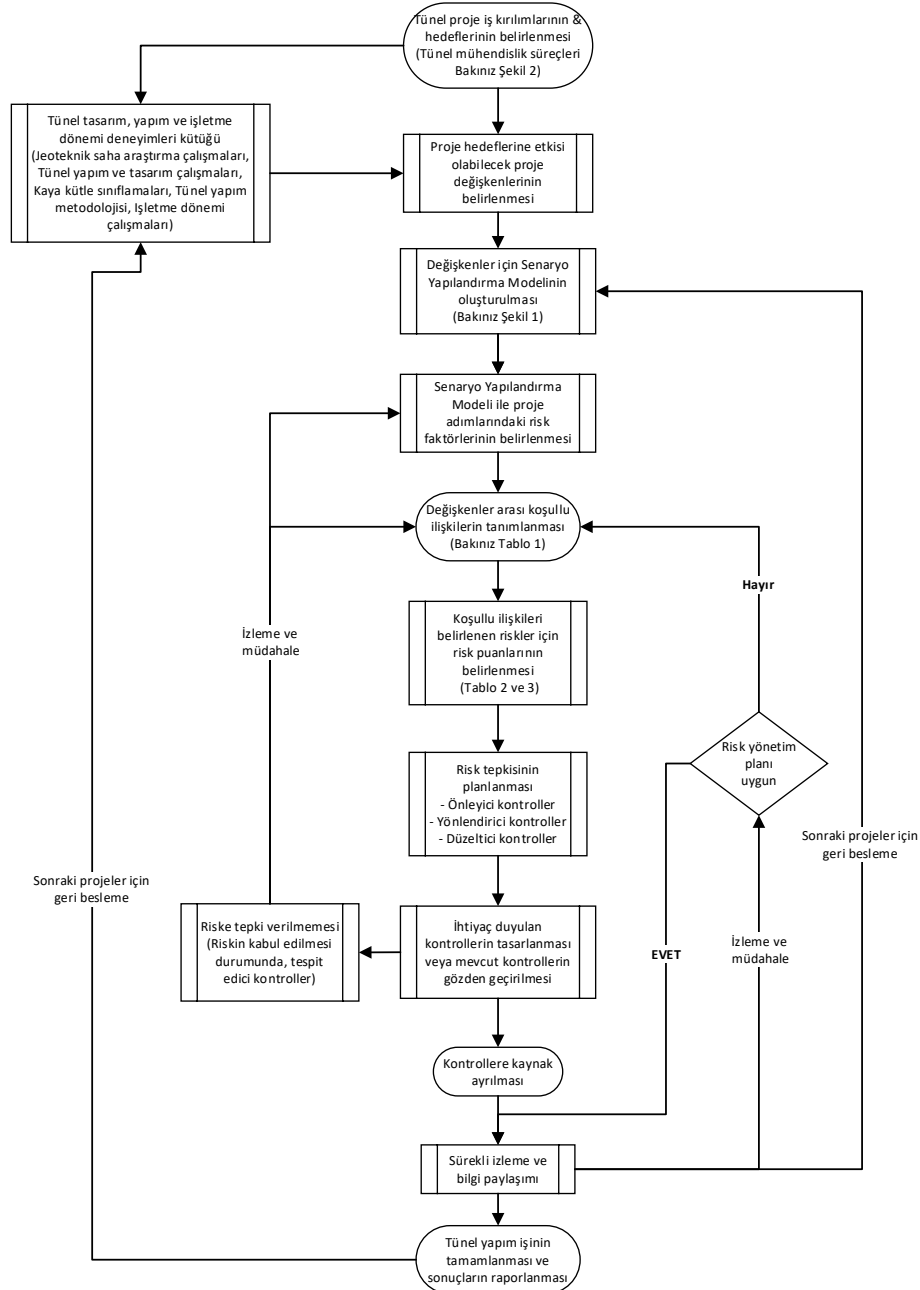
Tablo 2. Tablo 1 ve SYM sonucu yapılan kalitatif risk değerlendirmesi sonucu bulunan risk puanları

| DEĞİŞKENLER | KALİTATİF DEĞERLEME | | |
|--|---------------------|----------|------|
| | Etki | Olasılık | Puan |
| Durumsal Değişkenler (Dud) | | | |
| Mevsimsel kaynaklı riskler | 3 | 4 | 17 |
| Proje kaynaklı riskler | 3 | 3 | 13 |
| Beklenti ve talep kaynaklı riskler | 4 | 3 | 18 |
| Projenin önemi kaynaklı riskler | 4 | 4 | 21 |
| Karar Değişkenleri (Kd) | | | |
| Mesleki köken kaynaklı riskler | 5 | 1 | 15 |
| Mesleki bilgi kaynaklı riskler | 5 | 2 | 19 |
| Şartname ve sözleşme kaynaklı riskler | 5 | 1 | 15 |
| Dışsal Değişkenler (Dıd) | | | |
| Lojistik kaynaklı riskler | 5 | 2 | 19 |
| İş Sağlığı ve güvenliği kaynaklı riskler | 5 | 2 | 19 |
| Mevzuat kaynaklı riskler | 3 | 2 | 9 |
| Yüklenici tutumu kaynaklı riskler | 4 | 3 | 18 |
| İnsan davranışları kaynaklı riskler | 4 | 4 | 21 |
| Jeolojik koşullar kaynaklı riskler | 5 | 3 | 22 |
| Rassal (RD) | | | |
| Tedarik zinciri kaynaklı riskler | 4 | 2 | 14 |
| Para piyasaları kaynaklı riskler | 5 | 1 | 15 |
| Küresel pazar kaynaklı riskler | 5 | 1 | 15 |
| Arkeolojik kalıntı kaynaklı riskler | 5 | 1 | 15 |

Tablodaki renkler risk öncelik şiddetlerini ifade etmektedir: yeşil az, sarı orta ve kırmızı çok öncelikli risk sınıflarını göstermek için kullanılmıştır.

Şekil 1 ve 2.'de de gösterildiği gibi tünel projesine ilişkin ilk aşamalar saha çalışmaları ve tasarım (SÇ, TÇ) çalışmalarıdır. Bu iki çalışma bir arada jeoteknik etütler ve tasarımlar olarak adlandırılabilir. Bu aşamalardan kaynaklanan riskler tünel kazısı başladıktan sonra duraysızlık ve güvenlik problemlerine neden olarak ortaya çıkacaktır. Bu durumda tünel güvenliği ve

duraylılığının sağlanması için ilave zaman ve sermaye gerekecektir. Dolayısı ile aslında bu çalışmada tespit edilen risklerin büyük çoğunluğu yapım aşamasında ortaya çıkabilecek problemlerin önlenmesini hedeflemektedir. Yapımı sonrası işletmeye alınarak kullanıma açılacak ve yaşayan bir yapı haline gelecek olan bu tip projelerde istenilen teknik standartların sağlanmadan hizmete sunulması mümkün değildir. Sonuç olarak kalite ve teknik standartlar açısından nihai hedeften sapma kabul edilemez. Ancak, eksik olan teknik gereklilikleri tamamlamak zaman ve bütçe yönünden sapsmalara neden olacaktır.



Şekil 3. Risk yönetim esaslı demiryolu tünel yapım projesi uygulama modeli adımları

Tespit edilen risklere karşı alınacak ilave önlemler yani uygulamaya konulacak yeni kontroller, risk tepkisi olarak adlandırılır. Risk tepkisi sadece yapım aşamasında değil tasarım ve saha etütleri aşamasında da uygulanabilir. Bir kez uygulandıktan sonra ilgili proje değişkenlerinin sürekli izlenmesi ve gözden geçirilmesi gerekir. Risklere karşı verilen tepkiye rağmen proje adımlarında

veya alt adımlarında herhangi bir sapma meydana gelirse bunların hızlı bir şekilde düzeltilmesi veya yeni düzenlemelerin (yeni kontroller) yapılması gerekir [49]. Bu çalışmada önerilen yöntemle risk kavramı ve risk yönetiminin temel süreçlerini tünel mühendisliği disiplini ile birleştirerek, bir tünel projesinin yeri, uzunluğu, yapım amacı ve kazı için seçilen yöntemden bağımsız olarak ortaya çıkabilecek riskler maliyet etkin bir şekilde yönetilebilir. Ayrıca burada önerilen yöntem yaygın kullanılan NATM ve ADECO gibi yöntemlerin öznel ve kalitatif yapısından [50] kaynaklanacak risklerin tespit edilmesi ve bu gibi yöntemlerin daha etkili kullanımına imkan vermektedir.

6. Bulgular

Demiryolu tüneli gibi yer mühendisliği projeleri ile ilgili hesaplamalar ve analizler ne kadar hassas yapılırsa yapılsın sıklıkla önceden öngörülemeyen sorunlar ortaya çıkabilir. Yer küre gibi homojen ve izotrop olmayan, aksine oldukça karmaşık bir yapısı olan ortamda yapılan mühendislik projelerinde oluşturulan jeolojik modeller, jeoteknik saha çalışmaları, tasarım aşamasında kazı ve destek sistemine ilişkin analizler uygulama sırasında ortaya çıkabilecek sorunları asgariye indirmeyi amaçlamaktadır. Bir tünel projesinin kazı destek tasarımı aşamasındaki çalışmalar tünel kazısı yapılacak olan jeolojik yapının mühendislik parametreleri ve ilgili jeolojik yapının kazı sonrası vereceği tepkinin öngörülmesi esasına dayanmaktadır. Tüm bu çalışmalar ise kazı ve destek sisteminin (nümerik modellemeler ve destek tasarımı) girdileridir. Aynı zamanda tüm bu veriler çeşitli bilinen tünel yapım yöntemleri içinde birer girdi niteliğindedir. Dolayısı ile tasarım aşamasında yapılan hata ve eksiklikler yapım aşamasında duraylılık ve güvenlik problemleri olarak ortaya çıkacaktır. Ancak, bu hata ve eksikliklerden kaynaklanacak risklerin etkileri hızlı ve kolay bir şekilde ortaya çıkmaz. Bu nedenlerle, kazı başladıktan sonra, tasarım aşamasında yapılan tasarım ve hesaplamalar mevcut içsel ve dışsal koşullara göre izlenmeli ve gerekirse revize edilmelidir. Tünel mühendisi, sadece tasarım aşamasında açıklanan kaya kütle koşullarını izlemek ve değerlendirmekle yetinmemeli aynı zamanda deformasyon sonuçlarını, kazı hızını, kazı ekibinin davranışlarını, çevresel koşulları, sözleşme koşullarını ve diğer teknik olmayan koşulları da göz önüne almalı ve değerlendirmelidir. Zira, sözü edilen tüm bu faktörler belirsizlik içerir ve risk yönetim araç ve teknikleri kullanılarak değerlendirilmelidir. Kazıya karşı kaya kütlelerinin göstereceği davranış ve diğer jeoteknik parametreler de burada açıklanan yöntemlerle öznel bir değerlendirme ile tünel mühendisinin kullanımına sunulmaktadır. Bu çalışmada belirlenen aşamaların sayısı ve isimleri değişebilir, ancak özellikle tasarım aşamasındaki çalışmalar (saha çalışmaları ve kazı destek sistemi tasarımları) mutlaka risk esaslı şekilde değerlendirilmeli, riskleri tanımlanmalı ve bu risk değerlendirmesine uygun olacak şekilde tasarımlar gözden geçirilmeli ve bir sonraki aşamaya geçmeden gerekli düzeltme ve düzenlemeler yapılmalıdır.

7. Sonuç

Bu çalışmada, bir yeraltı mühendislik yapısı ile ilgili çalışmaların felsefesi ve kalitesi ile ilgili teknik değerlendirme yapmak yerine, tasarım ve yapım aşamalarında ortaya çıkabilecek hata ve eksikliklerin önlenmesi ve düzeltilmesine ilişkin risk esaslı projelendirme ve yapım strateji önerisi ortaya konulmuştur. Çalışma tünel proje ve yapım risklerine karşı yarı kantitatif ve sistemli bir risk değerlendirme yöntemi sunmaktadır. Bu amaçla, senaryo yapılandırma modeli ile belirsizlik kaynakları tanımlanmış, etki olasılık analizleri ile yönetilmesi gereken risklere ilişkin bir model ortaya konulmuştur. Bu şekilde proje mühendisi projenin ilerlemesi aşamasında muhtemel sorunlu alanları anlayabilecek ve olası hata ve eksikleri yönetebilme şansına sahip olacaktır. Böylece, Rabcewicz'in ilerledikçe projelendir felsefesine uygun şekilde tünel projesi riskleri optimize edilebilecek ve en iyi yapım stratejisi uygulanabilecektir. Zira NATM ve ADECO R.S. sistemleri tünel mühendisinin tünel kazısına ilişkin öznel değerlendirme yapmasını gerekli kılar. Ancak, kazı stratejisi ve destek paterni jeolojik ve jeoteknik verilere bağlıdır. Bu iki önemli veri de karmaşık ve değişen yer koşulları nedeniyle belirsizlik içerir, risklerin yönetilmesi

gerekir. Burada önerilen risk esaslı tünel proje yönetimi yaklaşımı, proje verilerinin yerindeki kazı koşullarına uygunluğunun değerlendirmesine, destek sistemi ve kazı stratejisine uygunluğuna ilişkin risk yönetim felsefesi temelli bir yaklaşım sağlamaktadır. Ayrıca tünel kazısını geciktirecek veya güvenlik problemlerine neden olabilecek risklere karşı pro-aktif şekilde önlem alma imkanı sunmaktadır. Sonuç olarak, tünel mühendisine tünel projesinin maruz kalabileceği riskleri tanımlayabilmeyi ve bu riskleri yönetebilme imkanı sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada demiryolu yapım ve projelendirme işleri ile ilgili sunduğu teknik bilgi ve desteklerinden dolayı Sayın Osman ALTINORDU' ya teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] O. Satici, Topal T., “Evaluation of tunnel excavation methods in accordance with engineering geology and rock mass classification systems”, *Journal of Geological Engineering* 39 (1), 2015
- [2] F. Tonon, Sequential excavation, NATM and ADECO: what they have in common and how they differ, *Tunneling and Underground Space Technology*, 25(3) pp245–265, 2010, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.12.004>
- [3] T.E. Brown, “Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview”, *Journal of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering*, v4 (3), pp193–204, 2012, <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00193>
- [4] J. Daller, “Risk control at the design of a 13 km long railway tunnel in Austria”, *Geotechnical Risks in Rock Tunnels*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-40005-8, pp155-163, 2006, <https://doi.org/10.1201/9780203963586>
- [5] M. Deng, “Challenges and thoughts on risk management and control for the group construction of a super-long tunnel by TBM”, *Engineering*, v4, pp112–122, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.07.001>
- [6] D.S. Eskesen, P. Tengborg, J. Kampman, H.T. Veichherts, “Guidelines for tunneling risk management”, *International Tunneling Association, Working Group No. 2, Tunneling and Underground Space Technology*, v19, pp217–237, 2004
- [7] D. Fabbri, “Risk, contract management, and financing of the gotthard base tunnel in Switzerland”, *Engineering*, v5 pp379–383, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.04.001>
- [8] J.D. Gutierrez-Fernandez, S.S. Rodriguez, H. Gonzalo-Orden, H. Perez-Acebo, “Analysis of rock mass classifications for safer infrastructures”, *Transportation Research Procedia*, v58 pp606–613, 2021
- [9] X. Lei, “Risk assessment model of underground engineering based on Delphi-AHP”, *2nd International Conference on Oil & Gas Engineering and Geological Sciences*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2020, pp558, 032029, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/3/032029>
- [10] I. Poeschl, J. Kleberger, “Geotechnical risk in rock mass characterization – A Concept”, *Geotechnical Risks in Rock Tunnels*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-40005-8, pp145-154, 2006
- [11] P. Schubert, “Geotechnical risk management in tunneling”, *Geotechnical Risks in Rock Tunnels*, Taylor & Francis Group, London, ISBN-0-415-40005-8, pp53-62, 2006
- [12] J. Schuyler, “Risk and decision analysis in projects”, *Project Management Institute Publication*, 2nd edition, p278, 2001
- [13] K. Shahriar, M. Sharifzadeh, K.J. Hamidi, “Geotechnical risk assessment-based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions”, *Tunneling and Underground Space Technology*, v23, pp318–325, 2008
- [14] R.L. Sousa, H.H. Einstein, “Risk analysis during tunnel construction using bayesian networks: Porto Metro case study”, *Tunneling and Underground Space Technology*, Risk Analysis During Tunnel Construction Using Bayesian Networks: Porto Metro case study, 27, pp86–100, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.07.003>
- [15] L.R. Sousa, T. Miranda, R.L. Sousa, J. Tinoco, “The use of data mining techniques in rockburst risk assessment”, *Engineering*, v3, pp552–558, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.002>
- [16] J. Spross, L. Olsson, H. Stille, “The Swedish geotechnical society’s methodology for risk management: a tool for engineers in their everyday work”, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 12:3, 183-189, 2018, <https://doi.org/10.1080/17499518.2017.1416643>

- [17] M. Tidlund, J. Spross, S. Larsson, “Observational method as risk management tool: The Hvalfjörður Tunnel Project”, *Iceland, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2022, <https://doi.org/10.1080/17499518.2022.2046784>
- [18] Y. Xiang, C. Liu, K. Zhang, Q. Wu, “Risk analysis and management of submerged floating tunnel and its application”, *Procedia Engineering*, v4, pp107–116, 2010, <https://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2010.08.013>
- [19] C. Zhang, N. Liu, W. Chu, “Key technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II Hydropower Station”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v8 pp499-512, 2016
- [20] G. Brierley, “Tunneling: A Historical Perspective” 2014, <http://tunnelingonline.com/tunneling-historical-perspective/> [06 Kasım 2023]
- [21] G.E. Sandström, “The history of tunneling, underground workings through the ages”, Barrie and Rockliff, 1963
- [22] N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde, “Engineering classification of rock masses for the Design of tunnel support” *Rock Mechanics* 6(4), 189-239, 1974, <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
- [23] Z.T. Bieniawski, “Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining”, *Civil and Petroleum Engineering*: New York, John Wiley and Sons, xii, p251, 1989, ISBN: 978-0-471-60172-2
- [24] W.W. Lowrance, “Of Acceptable risk”, Los Altos, CA: William Kaufmann, 1976
- [25] M. Karakus, R.J. Fowell, “An insight into the New Austrian Tunneling Method (NATM)”, *Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, 2004, Sivas, Türkiye
- [26] P. Lunardi, “Design and construction of tunnels, Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS)”, *Springer*, 2008
- [27] L. Özdemir, “North American Tunneling”, Washington, DC: Taylor & Francis. p246, ISBN 0-415-40128-3, 2006
- [28] C.L. Vydrova, “Comparison of tunneling methods NATM and ADECO-RS”, *The Civil Engineering Journal*, 2015, <http://dx.doi.org/10.14311/CEJ.2015.01.0003>
- [29] A. Palmstrom, “RMi-A system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering”, *Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology*, v1, pp69-108, 1996
- [30] D.U. Deere, R.P. Miller, “Engineering classification and index properties for intact rock”, *Tech. Rept.* No AFWL-65-116, 1966
- [31] E. Hoek, E.T. Brown, “Practical estimates of rock mass strength”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v34, pp 1165-1186, 1997
- [32] E. Ünal, and İ. Özkan, “Determination of classification parameters for clay-bearing and stratified rock mass”, *9th Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, USA, 1990, pp250-259
- [33] G.E. Wickham, H.R. Tiedemann, E.H. Skinner, “Support determination based on geologic predictions”, In: Lane, K.S.a.G., L. A., ed., *North American Rapid Excavation and Tunneling Conference: Chicago, New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 1972, pp43-64
- [34] K. Terzaghi, “Rock defects and loads on tunnel supports”, In Proctor, R.V., and White, T.L., eds., *Rock Tunneling with Steel Support*, Volume 1: Youngstown, Ohio, Commercial Shearing and Stamping Company pp17-99, 1946
- [35] L. Rabcewicz, “The New Austrian Tunneling Method”, Part one, *Water Power* (November), 453–457, part two, *Water Power* (December), pp511–515, 1964
- [36] Y.Y. Haimes, “On the definition of vulnerabilities in measuring risks to infrastructures”, *Risk Analysis*, v26-2, 2006, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00755.x>
- [37] P. Hopkin, “Fundamentals of risk management, understanding evaluating and implementing effective risk management”, *The Institute of Risk Management*, Kogan Page Limited, p385, 2018
- [38] Y.Y. Haimes, “On the complex definition of risk: a systems-based approach”, *Risk Analysis*, v29, p1647–1654, 2009a, <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01310.x>
- [39] S. Kaplan, B.J. Garrick, “On the quantitative definition of risk”, *Risk Analysis*, 1, pp11-27, 1981, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x>
- [40] Y.Y. Haimes, “On the definition of resilience in system”, *Risk Analysis*, v29, p498–501, 2009b, <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x>
- [41] V. Proag, “The concept of vulnerability and resilience”, *4th International Conference on Building Resilience, Procedia Economics and Finance*, v18, 2014, pp369-376,
- [42] Ö. Satıcı, “Projeler nasıl başarılı olur, mühendisler için risk yönetim rehberi”, Seçkin Yayınevi, Ankara, 156s, 2021

- [43] N. Munier, “Project management for environmental construction and manufacturing engineers”, *A Manuel for Putting Theory into Practice*, Springer, p262, 2013
- [44] V. Platon, A. Constantinescu, “Monte Carlo method in risk analysis for investment projects”, *Procedia Economics and Finance*, v15, p393-400, 2014, [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00463-8](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00463-8)
- [45] K.D. Prasanta, “Project risk management using multiple criteria decision-making technique and decision tree analysis: a case study of Indian oil refinery”, *Production Planning & Control*, 23:12, 903-921, 2012, <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.586379>
- [46] N.N. Taleb, “The Black Swan: the impact of the highly improbable”, Penguin Books Ltd. p480, 2008
- [47] D. Ristic, “A tool for risk assessment”, *Safety Engineering*, p121-127 Doi: 10.7562/SE2013.3.03.03
- [48] <https://www.nzta.govt.nz/roads-and-rail/rail/operating-a-railway/risk-management/risk-matrix-likelihood-and-consequence-tool/> (Son erişim 07.12.2023)
- [49] D. Hillson, “Managing risk in projects”, *Fundamentals of Project Management*, Gower Publishing, p127, 2009
- [50] E. B. Aygar, “Tünel projelendirilmesinde kullanılan yöntemler (ampirik, analitik ve nümerik yöntemler), kısıtlamaları, karşılaştırılması ve öneriler,” *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, sy. 15, ss. 125–133, Ocak 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1030404.

Özgeçmiş



Özgür SATICI

Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesinde, yüksek lisans: eğitimini Ankara ve Hacettepe Üniversitelerinde, doktora eğitimini ODTÜ’de tamamlamıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü’nde ARGE Dairesinde Mühendis, İç Denetim Birimi Başkanlığında İç Denetçi olarak çalışmıştır. Şu an İç Denetim Birimi Başkanı görevini devam ettirmektedir. İlgi alanları; jeoteknik, mühendislik jeolojisi, kaya mekaniği, tüneller, sayısal modeller, saha etütleri, mühendislik proje yönetimi, risk yönetimi ve analizleridir.

E-Posta: osatici@kgm.gov.tr, osatici@gmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.



Ray Yüzey Kusurları ve Ray Kırıklarının Evrişimli Artık Ağ Modeli ile Sınıflandırılması

Murat BAŞARAN^{*ID}, Ömür AKBAYIR^{ID}, Mehmet FİDAN^{ID}, Mine SERTSÖZ^{ID}, Muhammet ÖZTÜRK^{ID}

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, Türkiye

*muratb@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 21.11.2022, Kabul/Accepted: 25.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Demiryolu taşımacılığı, güvenilir, rekabetçi ve çevre dostu bir ulaşım ve yük taşıma alternatifi olduğu için günümüzde, demiryolu hatlarındaki trafiğin artması kaçınılmaz bir durumdur. Artan yolcu talebi sonucu sıklaşan seferler, tren hızlarının yükselmesi ve yüklerinin artması ile birleşince mevcut demiryolu üstyapısına önemli ek yükler getirmektedir. Bu ek yükler, raylarda olası problemlerin ortaya çıkma olasılığını arttırmaktadır. Buna bağlı olarak, raylarda görülen kusurlar daha önemli hale gelmiş; rayların kusurlara karşı kontrol edilmesi ve bakımının zamanında yapılması büyük önem kazanmıştır. Bu çalışmada ray görüntüleri Artık Ağ mimarisini kullanan evrişimli yapay sinir ağı ile eğitilmiş ve ray üzerindeki kusurlar ve ray kırıkları yüksek bir başarıyla sınıflandırılmıştır. Böylelikle birbirine karışma ihtimali fazla olan ve ayrıca ray kırığı probleminin öncülü olabilecek ciddi ray yüzey kusurlarının başlangıç aşamasında tespiti ile bakım onarım faaliyetlerine katkı sunabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Ray yüzey kusurları, Ray kırıkları, Derin öğrenme, Artık Ağlar

Classification of Rail Surface Defects and Rail Cracks by Convolutional Residual Network Model

Abstract: Since railway transportation is a reliable, competitive, and environmentally friendly transportation and freight alternative, the traffic on railway lines will inevitably increase today. The increasing frequency of trips as a result of increasing passenger demand, combined with increased train speeds and increased loads, brings significant additional loads to the existing railway superstructure. These additional loads increase the likelihood of possible problems on the rails. Accordingly, the defects seen in the rails have become more important; It has become of great importance to check the rails for defects and to carry out their maintenance on time. In this work, rail images were trained with a convolutional artificial neural network using Residual Network architecture, and defects on the rail and rail cracks were classified with high success. Thus, it is thought that it can contribute to maintenance and repair activities by detecting serious rail surface defects at the initial stage, which are likely to interfere with each other and may also be the precursor of rail crack problems.

Keywords: Railway, Rail surface defects, Rail cracks, Deep learning, Residual Networks

1. Giriş

Rayların yüzeyindeki kusurlar, tespit edilip gerekli bakım faaliyeti uygulanmadığı takdirde raylı sistem taşıtlarının tekerlek takımlarında ve yataklarında büyük hasara neden olabilirler. Tekerlekler kusurlu yüzeylere sahip raylarda hareket ederken periyodik darbeler meydana getirecek ve bu darbeler tüm araçta ve raylarda birleşik bir temas titreşimine neden olacaktır. Döner temas yorgunluğu olarak adlandırılan ray tekerlek etkileşiminden kaynaklı bu olumsuzluk, uzun vadede demiryolu bileşenlerinin servis ömrünü kısaltır ve raylı sistem araçlarında raydan çıkmaya varacak önemli kaza risklerini doğurabilir. Bu nedenle raylardaki kusurların başlangıç aşamasında tespiti demiryolunun ve raylı sistem araçlarının daha güvenli ve verimli olarak kullanılarak demiryolu yük ve yolcu taşımacılığının güvenliğini sağlamak için önemli bir araçtır [1]. Yalnızca Avrupa Birliği ülkelerinde ultrasonik muayene ve takiben manuel doğrulama

Atıf için/Cite as: M. Başaran, Ö. Akbayır, M. Fidan, M. Sertsöz, M. Öztürk, "Ray yüzey kusurları ve ray kırıklarının evrişimli artık ağ modeli ile sınıflandırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 160-170, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1207956

süreçlerini de kapsayan demiryolu hat izleme ve kestirimci bakım faaliyetlerinin maliyetinin yıllık olarak yaklaşık olarak 70 milyon Euro olduğu hesaplanmaktadır [2]. Sadece olası kazalardan kaçınmak için değil, aynı zamanda araçların ve demiryolunun hizmet ömrünü uzatmak ve oluşacak muhtemel bakım maliyetlerini ve bakım onarım için harcanacak zamanın azaltılmasında kestirimci bakım faaliyetleri ile alınacak önlemlerin önemi büyüktür ve demiryolu işletme maliyetlerini düşüreceği aşıkardır [3].

Avrupa Birliği ülkelerinde olduğu gibi, ülkemizde de işletmedeki problemlerin erken aşamada tespit edilmesi, ray yüzey kusurlarının tespiti ve ray kırıklarının oluşmadan önce önlem faaliyetlerinin alınması büyük önem arz etmektedir. Ülkemizde Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) eliyle yürütülen bu faaliyetlerin en önemlisi deneyimli teknik personel ile yapılan görsel muayenelerdir. Gözle kontrol ray yüzey kusurlarının tespitinde ve sınıflandırılmasında önemli bir muayene yöntemi olduğu için gerekli görsel muayeneyi yapan personelin demiryolu hat kontrolünde gerekli bilgi ve tecrübeye sahip olması gerekmektedir. Deneyimli personel, TCDD'nin yayınlamış olduğu 106 numaralı genel emir ile tanımlanan standartlarla ve sorumluluk çerçevesinde gerekli kontrolleri yaparlar. Bu genel emir çerçevesinde görsel muayene hızlı tren hatlarında 2 ayda bir, konvansiyonel hatlarda ise 6 ayda bir yapılmaktadır. Muayene esnasında tespit edilen kusurlar önem derecesine göre; küçük hatalar, büyük hatalar ve kritik hatalar olmak üzere 3 sınıfta toplanır ve raporlanır [4]. Günümüzde görsel veriler artan teknolojik imkanların yardımıyla gözle muayeneye destek olacak şekilde hızla gelişen görüntüleme teknolojilerini kullanan muayene treni ile de toplanabilmektedir. TCDD'ye ait Piri Reis muayene treni ile yüksek hızlı tren (YHT) hattının durumunu ve hat ile tren arasındaki etkileşimin takibi yapılabilmektedir. Görsel veriler, uyumlu bir aydınlatma sistemi ve doğrusal tarayıcı kamera tarafından toplanır. MERMEC şirketi tarafından üretilen VCUBE adı verilen gelişmiş bir makine görüş sistemi tarafından yakalanan ardışık görsellerden oluşan demiryolu hattının kamera görüntüleri, görsel muayeneye çok değerli katkılarda bulunmaktadır [5]. Şekil 1'de görseli verilen VCUBE makine görüş sistemi yardımı ile ray yüzeyindeki hatalarının yanı sıra ray mantarının profilini, aşınma miktarını, ekartman açıklığını, traverslerin konumunu, balast yeterliliğini ve bağlantı elemanlarının durumunu da izlemek mümkün olmaktadır. Muayene esnasında operasyon hızı 250 km/saate kadar ulaşabilmekte ve testler her 3 ayda bir periyodik olarak gerçekleştirilmektedir [6].



Şekil 1. MERMEC VCUBE makine görüş sistemi

Ray tekerlek etkileşimi ile oluşan en büyük problemlerden biri yorulma kaynaklı çatlaklardır. Kaynak bölgeleri rayların en problemleri bölgeleri olup buralarda da meydana gelen aşınmalar ve çatlakların erken tespiti çok önemlidir [7].

Ray kusurları, üretim kaynaklı veya kullanım kaynaklı olabilmektedir. Üretimden kaynaklı ray kusurları fitil kusurları, ham madde kusurları ve merdane kusurları olarak sıralanabilir [8].

Kullanım sonucu ray aşınması aks yükü, tren hızı, tekerlek ve ray profilleri, tekerlek ve rayın malzeme özellikleri, ray eğriliği, tekerlek ray temas yüzeyinin durumu, temas basıncı, yağlama ve çevresel diğer çevresel etkiler gibi çok çeşitli parametrelere bağlıdır [9]. Kullanım sonucunda oluşan ray kusurları ray mantarında oluşan sıralı kılcal çatlaklar, ezilmeler, kabuk atma, ondülasyon, periyodik yuvarlanma yüzeyi hasarları, zedelenme, patinaj izi ve diğer kılcal çatlak kusurlarıdır.

Ray mantarında sıralı kılcal çatlaklara genellikle tren gidiş yönünde, kurpların dış raylarının yuvarlanma yüzeyinde karşılaşılır ve temas yüzeyinde meydana gelen gerilmelerin bir sonucudur. Ezilmeler ise yuvarlanma temas bölgesinde yatay bir düzlemde uzanan bir temas çatlağıdır ve yuvarlanma yüzeyinde çökmelere yol açar. Kabuklanma genellikle kuplarda dış rayda görülen karakteristik bir yuvarlanma temas yorulma kusurudur. Oluş mekanizması ray yüzeyi yönünde mantarın içine doğru çatlakların ilerlemesi ve yuvarlanmanın yüzeylerde uzunlamasına, üretime bağlı kopmalara ve yuvarlanma yüzeyinde bölgesel çökmelere sebep olmasıyla gelişmektedir. Ondülasyon, ray yüzeyinin dalgalı bir biçimde aşınmasıdır. Ray yüzeyinin dalga boyları 20 ile 80 mm arasında ve neredeyse periyodik bir tekrarla bozulması durumu olarak görülür. Periyodik yuvarlanma temas yorulma kusurları ise yüksek hızlı tren hatlarında büyük dinamik kuvvetlerin ray yüzeyinde malzeme deformasyonuna neden olmasından kaynaklanmaktadır. Zedelenme kusuru ise teker ve ray arasına balast gibi yabancı maddelerin kaçması sonucu oluşmaktadır ve yuvarlanma yüzeyine yatay konumda, rasgele dağılmış halde karşılaşmaktadır. Trenin ani hızlanmaları ya da yavaşlamaları sonucu ray yüzeyinde çökmeler meydana gelebilir. Bu çöküntülere patinaj izi denir ve içerisinde çatlaklar barındırabilir. Sık karşılaşılan kılcal çatlaklar, önlem alınmadığı takdirde ileri aşamalarda ray kırıklarına sebep olabilir. Yukarıda sayılan ray kusurlarından seçilmiş örnek dört farklı ray kusuru görseli Şekil 2’de gösterilmiştir.

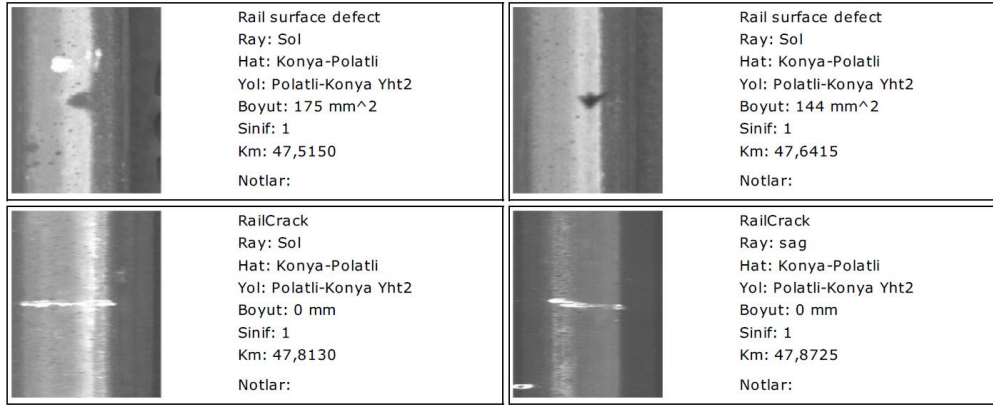


Şekil 2. Çeşitli ray yüzey kusuru örnekleri [10]

Bu çalışmada VCUBE makine görüş sistemi tarafından yakalanan demiryolu hattının yüksek çözünürlüklü görüntülerinden oluşan bir veri kümesinden yararlanıyoruz. VCUBE tarafından elde

edilen görüntüler, yazılım tarafından işlenmekte ve görüntü işleme teknikleri ile program hattın hangi kilometresinde hangi tip ray veya ray bağlantı elemanı kusuru olabileceğini içeren bir çıktı üretmektedir. Daha sonra yetkili uzman personel bu çıktıları inceleyerek yazılımın verdiği sonuçları teyit etmektedir. Bazı durumlarda özellikle ray yüzey kusuru tespitinde ray üzerine gelen kum, toprak, ağaç yaprakları, kuş pislikleri gibi bazı dış çevresel etmenler nedeniyle yazılım hatalı çıktılar üretilebilmektedir. Deneyimli uzman personel tarafından gerekli kontroller yapılmakta ve yazılımın çıktıları teyit veya reddedilerek nihai saha raporları oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada önerilen yöntemin sağlıklı ve güvenilir sonuçlar vermesi adına VCUBE tarafından elde edilen görüntüler doğrudan kullanılmamış, bunun yerine Polatlı – Konya YHT hattı üzerinde uzman personel tarafından teyitli bir saha raporu üzerindeki gri tonlamalı resimler kullanılmıştır. Çalışmada ray kırığı (rail crack) ve ray yüzey kusuru (rail surface defect) olmak üzere iki sınıflı bir sınıflandırma problemi tanımlanmıştır. Bu iki sınıfa ait ikişer örnek gri tonlamalı resim ve hatalara ait detaylar Şekil 3'te görülmektedir. Söz konusu raporda toplam 60 adet ray kırığı olarak teyitli ve toplam 195 adet ray yüzey kusuru olarak teyitli görüntü bulunmaktadır. Çalışma, bu görüntüleri kullanan iki sınıflı bir sınıflandırma problemine çözüm metodu üretmektedir. Çalışmada demiryolu görsel muayene prosedürüne derin öğrenme tabanlı bir destek mekanizması üretilmeye çalışılmıştır.

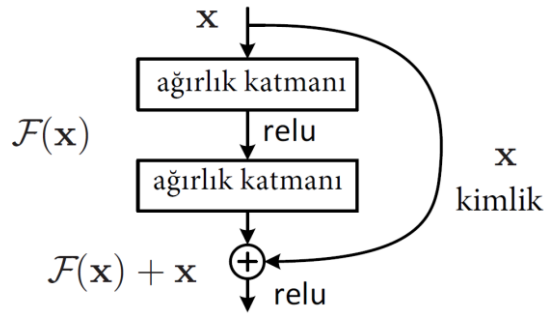


Şekil 3. Çalışmada kullanılan saha raporundan iki sınıfa ait örnek resimler

2. Metot

Bu çalışmada gri tonlamalı ray görüntüleri aracılığı ile verilen görüntünün hangi sınıfa ait olduğunun derin öğrenme ağları yardımı ile sınıflandırılmasına yönelik bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada iki sınıflı bir sınıflandırma problemi ortaya konmuştur. Veri setindeki görüntüler ray yüzey kusuruna (rail surface defect) ya da ray kırığı (rail crack) sahip gri tonlamalı jpg formatlı resimlerdir. Çalışmada Convolutional Neural Networks (CNNs) olarak bilinen yapay sinir ağları alanında önemli bir gelişme olan Evrişimli Sinir Ağlarının bir modeli olan Artık Ağlar: Residual Networks (ResNet) ile testler gerçekleştirilmiştir.

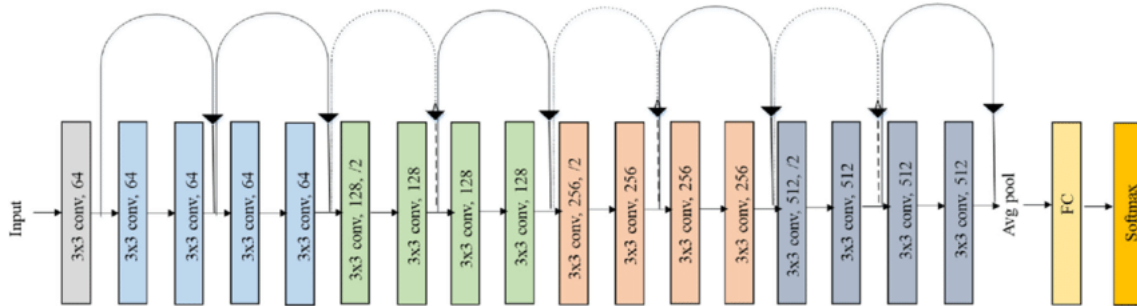
ResNet, derin öğrenme alanında önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilir. İngilizce "residual" yani "artık" anlamına gelen ResNet, Microsoft Research tarafından geliştirilmiştir [11]. ResNet, kendinden önceki derin öğrenme modellerinin aksine, çok daha derin ağların eğitilmesini mümkün kılan bir yenilik getirir. ResNet'in temel fikri, ağın her katmanının, giriş verisini artık veya fark olarak değil, orijinal giriş verisini hedef çıkış verisine yaklaştırmak amacıyla ona bir kimlik fonksiyonu ekleyerek çalışır. Böylelikle Şekil 4'te gösterilen bir öğrenme bloğu oluşturulur.



Şekil 4. Artık öğrenme bloğu örneği

Derin öğrenme ağlarının derinleşmesi, genellikle derin ağ sorunu olarak adlandırılan bazı zorlukları beraberinde getirmektedir. Derin ağlar, girişten çıkışa kadar birçok katman içerir ve her katman öncekine göre daha soyut ve yüksek seviyeli özellikler öğrenmektedir. Ancak ağın daha derin hale gelmesi, geriye doğru eğitim sırasında gradyan kaybı sorununa neden olabilir. Bu, ağın ilk katmanlarına geriye doğru eğitim sırasında çok küçük gradyanların iletilmesi sonucu olur. Bu durum ağın eğitimini zorlaştırır. ResNet, bu sorunu aşmak için artık bağlantılar (residual connections) kullanmaktadır. Her katman, kendisine önceki katmandan gelen bir artık bağlantı ile birleştirilmektedir. Bu, giriş verisinin artık fonksiyonlar tarafından dönüştürülen çıkış verisi ile toplanmasını sağlar. Bu sayede, ağın her katmanı orijinal giriş verisine yakın bir çıkış üretebilir ve gradyan kaybı sorununu azaltır.

ResNet'in temel yapısı, ardışık olarak bir araya getirilmiş bir dizi artık blok (residual block) içermektedir. Her artık blok, artık bağlantılar içerir ve genellikle birkaç evrişim (konvolüsyon) katmanı, toplama katmanları (artık bağlantıları yönetir) ve aktivasyon fonksiyonlarını içerir. Bu bloklar, birçok derin katmandan oluşan büyük bir ağı daha rahat bir şekilde eğitilebilir hale getirir. Örnek olarak Şekil 5'te ResNet-18 mimarisinin yapısı verilmiştir.

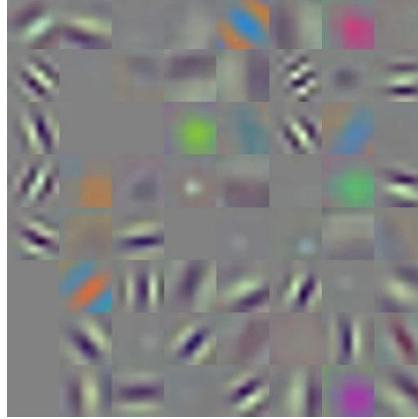


Şekil 5. Örnek ResNet Mimarisi (ResNet-18)

ResNet, birçok avantaj sunmaktadır. Derin ağları eğitime yeteneği ile daha derin ve karmaşık ağların eğitimini mümkün kılar, bu da daha iyi performans ve daha yüksek doğruluk sağlar. Artık bağlantılar, gradyanların daha iyi iletilmesini sağlar ve geriye doğru eğitimi daha verimli hale getirir. ResNet, daha az parametre kullanarak daha derin ağlar oluşturmaya olanak tanır, bu da daha hızlı eğitim süreleri ve daha az bellek kullanımı gibi avantajlar sağlamaktadır.

ResNet veya diğer evrişimli sinir ağı (CNN) mimarilerini gri tonlamalı görüntü sınıflandırma görevlerine uygulamak mümkündür. Tipik olarak ResNet gibi modeller, her pikselin üç renk kanalı içerdiği RGB (Kırmızı, Yeşil, Mavi) renkli görüntüler üzerinde tasarlanır ve eğitilir. Ancak bu mimariler gri tonlamalı görüntüleri de işleyebilir. Gri tonlamalı görüntüler, üç renk kanalı yerine her pikselin yoğunluğunu temsil eden yalnızca bir kanal içerir. Gri tonlamalı görüntü sınıflandırması için önceden eğitilmiş bir ResNet modeli kullanırken gri tonlamalı görüntüleri sözde RGB'ye (pseudo RGB) dönüştürmek gerekmektedir. Gri tonlamalı değerleri üç kanalı

tamamında çoğaltarak tek kanallı (gri tonlamalı) görüntüleri üç kanallı (sözde RGB) görüntülere dönüştürmek mümkündür. Bu, gri tonlamalı piksel değerlerinin Kırmızı, Yeşil ve Mavi kanallara kopyalanması, esasen her üç kanalda da orijinal görüntünün gri tonlamalı versiyonunun oluşturulması anlamına gelir. Daha sonra bu sözde RGB görüntüleri sanki renkli görüntülemiş gibi ResNet modeline beslemek mümkün olmaktadır. Şekil 6’da bu çalışmada kullanılan veri setindeki örnek bir görüntünün üç kanallı sözde RGB görüntüye dönüştürüldükten sonraki hali verilmiştir.



Şekil 6. Veri setindeki ray görüntülerinden elde edilmiş sözde RGB resim örneği

Literatürde, demiryolu ray muayene ve kusur tespiti problemlerinde ResNet modellerini de içeren derin öğrenme metodlarının kullanıldığı makale sayısı giderek artmaktadır. 2020 yılında Çinli bir grup araştırmacı 41 katmanlı artık ağ kullanarak demiryolu yüzeyindeki kabuklanma problemini tespit etmeye çalışmışlardır. [12] Yine aynı yıl demiryolu ray bağlantı elemanlarında kusur teşhisi için Çekişmeli Üretici Ağ (Generative Adversarial Network- GAN) ve Resnet’in beraber kullanıldığı derin öğrenmeye dayalı bir yöntem önerilmiştir [13]. Yine benzer konuda 2021 yılında yapılan bir çalışmada ray bağlantı elemanlarında hata tespiti için kırık, kayıp ve sağlam olmak üzere üç sınıflı bir sınıflandırma problemi içeren bir çalışma yapılmış ve Spatial pyramid pooling (SPP) destekli ResNet ile %96’ya varan bir başarı oranı yakalanmıştır [14]. Ray kırıklarının tespitinde de derin öğrenmenin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Yine 2021 yılında yapılan bir çalışmada ray yüzeyindeki çatlakların tespitine yönelik etkili veri odaklı modeller geliştirmek için derin öğrenme çerçevesi sunulmuş ve sunulan çerçevede ilk olarak topluluk öğrenmesine dayalı YOLOv3 modelini COCO veri seti üzerinde önceden eğitilmiş ağırlıklara sahip modeli kullanan ve daha sonra transfer öğrenimi yoluyla demiryolu hattındaki çatlakları tespit eden bir çalışma yapılmıştır [15]. YOLOv3 modelinin entegre edilmesinin ve arıza tespit başarısında olumlu etkisinin olduğu görülmüştür. Ülkemizde de topluluk öğrenmesine dayalı bir ray yüzey kusuru tespit problemi üzerinde çalışılmış ve farklı YOLO modelleri için topluluk öğrenmesine dayalı bir yöntem önerilmiştir [16]. Çalışmanın sonucunda 8 farklı kusur içeren veri seti üzerinde bütün sınıfları içeren tespit oranının %80’in üzerinde bir başarıya sahip olduğunu gösterilmiştir. Yine ülkemizde yapılan başka bir çalışma, ray kusur tespitinde ResNet-18, ResNet-50 ve ResNet-101 modellerini kullanmış ve yine %80 civarında başarılı sınıflandırma sonuçlarına ulaşmıştır [17]. Yine ülkemizde güncel konulardan biri olan açıklanabilir yapay zekâ temelli bir yaklaşım ile ray yüzey kusurları tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmada Vgg16 ve MobileNetV3 modellerinin sınıflandırıcı katmanlarının özelleştirilmesiyle yapılan uygulamada, etiketsiz verilerle öğrenme ve ray yüzey kusurlarının açıklama haritaları ile tespitinde %98 e varan doğruluk oranı ile sınıflandırma başarısı elde edilmiştir [18]. Demiryolu bakım konuları içinde sadece ray kusurları değil farklı konularda da ResNet kullanılan makaleler literatürde mevcuttur. Örneğin katener sistemlerindeki izolatör kusurlarının derin öğrenme ile tespiti ile ilgili bir çalışmada ResNet-34 mimarisi kullanılmış ve 1100 adet izolatör görüntüsü içeren veri seti ile %95’in üzerinde bir sınıflandırma başarısı elde edilmiştir [19].

3. Bulgular

Bu çalışmada VCUBE makine görüş sistemi tarafından Polatlı – Konya YHT hattı üzerinde elde edilen görüntülerden uzman personel tarafından oluşturulmuş teyitli bir saha raporu üzerindeki gri tonlamalı resimler kullanılmıştır. Çalışmada ray kırığı (rail crack) ve ray yüzey kusuru (rail surface defect) olmak üzere iki sınıflı bir sınıflandırma problemi tanımlanmıştır. Söz konusu raporda toplam 60 adet ray kırığı olarak teyitli ve toplam 195 adet ray yüzey kusuru olarak teyitli görüntü bulunmaktadır. Bu gri tonlamalı resimlerin tamamı eğitim ve test verisinde kullanılmaktadır, başka görüntü işleme tekniği kullanılarak veri artışı yapılmamıştır. Veriler önceden eğitilmiş bir evrişimli yapay sinir ağı modeli olan artık ağ (residual network, ResNet) ile sınıflandırılmıştır.

ResNet, ImageNet veri tabanının bir alt kümesi üzerinde eğitilmiş ve 2015 yılında ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Yarışması (ILSVRC) yarışmasını kazanmış, önceden eğitilmiş bir modeldir. Model, bir milyondan fazla görüntü üzerinde eğitilmiştir ve görüntüleri farklı 1000 nesne kategorisine sınıflandırabilir. Deneysel çalışmada literatürde çok sayıda farklı varyasyonları bulunan ResNet mimarilerinden üç tanesi kullanılmıştır. Bunlar, önceden eğitilmiş ResNet-18, ResNet-50 ve ResNet101 mimarileridir. Bu ağların mimarisi sırasıyla 18 (72 alt katman), 50 (177 alt katman) ve 101 (347 alt katman) katmandan oluşmaktadır.

Deneysel çalışmanın veri setindeki görüntüler 60 adeti ray kırığı ve 195 adeti ray yüzey kusuru olarak teyitli olmak üzere toplamda 255 adettir. Bu iki sınıftaki görüntülerin %70'i sistemi eğitmek için (train set) kalan %30'u da eğitim sonrası sistemin performansını test etmek için (test set) rasgele olarak ayrılmıştır. Kullanılan üç farklı ResNet mimarisinin sınıflandırma başarısı, karışıklık matrisleri (confusion matrix) aracılığı ile görselleştirilmiştir.

Karışıklık matrisi, makine öğreniminde bir sınıflandırma modelinin doğruluğunu temsil eden bir performans değerlendirme aracıdır. Gerçek pozitiflerin, gerçek negatiflerin, yanlış pozitiflerin ve yanlış negatiflerin sayısını görüntüler. Bu matris, model performansının analiz edilmesine, yanlış sınıflandırmaların belirlenmesine ve tahmin doğruluğunun iyileştirilmesine yardımcı olur.

Karışıklık matrisi, bir sınıflandırma modelinin performansını değerlendirmek için kullanılan, N sınıf sayısı olmak üzere, N x N boyutlu bir matrisidir. Matris, gerçek hedef değerlerini makine öğrenimi modelinin tahmin ettiği değerlerle karşılaştırır. Bu bize sınıflandırma modelimizin ne kadar iyi performans gösterdiğine ve ne tür hatalar yaptığını dair bütünsel bir görünüm sağlar. Bu çalışmada olduğu gibi ikili bir sınıflandırma problemi için, aşağıda gösterildiği gibi 4 değere sahip 2 x 2'lik bir karışıklık matrisi oluşur:

| | | Gerçek değer | |
|--------|---------|--------------|---------|
| | | Pozitif | Negatif |
| Tahmin | Pozitif | TP | FP |
| | Negatif | FN | TN |

Şekil 7. 2 x 2'lik karışıklık matrisi

Bu değerler TP, FP, FN ve TN dir. Eğer tahmin işleminde normalde pozitif olarak var olan bir durum pozitif olarak tahmin ediliyorsa TP (true positive) bir tahmin yapılmıştır. Eğer var olan durum negatif ve tahmin negatif ise TN (true negative) bir tahmin yapılmıştır. Başka bir deyişle yanlış bir durum yanlış olarak doğru bir şekilde tahmin edilmiştir. Eğer var olan durum negatif ise ancak tahmin sistemi pozitif olarak tahmin ederse birinci tip hata FP (false positive) durumu oluşur. Eğer var olan durum pozitif ise ve tahminci negatif olarak tahmin ederse FN (false negative) ikinci tip hata oluşur.

Karışıklık matrisi üzerinden çıkarılan literatürde sıklıkla kullanılan performans metrikleri ile sistemin sınıflandırma başarı performansı ölçülebilir. Bu metrikler sırasıyla doğruluk (accuracy), duyarlılık (recall), kesinlik (precision) ve F-skoru (F-score) dur.

Doğruluk, sistemde doğru olarak yapılan tahminlerin tüm tahminlere oranıdır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP} \quad (1)$$

Duyarlılık, pozitif durumların ne kadar başarılı tahmin edildiğini gösterir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Kesinlik, pozitif olarak tahmin edilen bir durumdaki başarıyı gösteren durumdur.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

F-skoru, duyarlılık ve kesinliğin harmonik ortalamasıdır.

$$F = 2 \times \frac{\text{duyarlılık} \times \text{kesinlik}}{\text{duyarlılık} + \text{kesinlik}} = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FP + FN} \quad (4)$$

ResNet-18 ile test sonucunda oluşan karışıklık matrisi:

| Tahmin | Gerçek değer | |
|-------------------|-----------------|-------------------|
| | Ray kırığı (rc) | Yüzey kusuru (sd) |
| Ray kırığı (rc) | 17 | 1 |
| Yüzey kusuru (sd) | 0 | 58 |

Şekil 8. ResNet-18 ile test sonucu oluşan karışıklık matrisi

ResNet-50 ile test sonucunda oluşan karışıklık matrisi:

| Tahmin | Gerçek değer | |
|-------------------|-----------------|-------------------|
| | Ray kırığı (rc) | Yüzey kusuru (sd) |
| Ray kırığı (rc) | 18 | 0 |
| Yüzey kusuru (sd) | 1 | 57 |

Şekil 9. ResNet-50 ile test sonucu oluşan karışıklık matrisi

ResNet-101 ile test sonucunda oluşan karışıklık matrisi:

| Tahmin | Gerçek değer | |
|-------------------|-----------------|------------------|
| | Ray kırığı (rc) | Yüzey kusur (sd) |
| Ray kırığı (rc) | 18 | 0 |
| Yüzey kusuru (sd) | 0 | 58 |

Şekil 10. ResNet-101 ile test sonucu oluşan karışıklık matrisi

Elde edilen bu sonuçlara göre sınıflandırma performans metrikleri ise şu şekilde oluşmaktadır:

Tablo 1. Önerilen ResNet mimarilerine göre sistemin performans metrikleri

| | ResNet-18 | ResNet-50 | ResNet-101 |
|------------|-----------|-----------|------------|
| Doğruluk | 0,9868 | 0,9868 | 1,0000 |
| Duyarlılık | 1,0000 | 0,9473 | 1,0000 |
| Kesinlik | 0,9444 | 1,0000 | 1,0000 |
| F-skoru | 0,9444 | 0,9473 | 1,0000 |

Karışıklık matrisleri ve performans metrikleri incelendiğinde, en iyi sınıflandırma başarısının ResNet-101 ağı ile eğitilen durumda gerçekleştiği görülmektedir. ResNet-101 ile %100 başarılı sınıflandırma gerçekleştirilirken diğer iki mimaride de %98'in üzerinde bir sınıflandırma başarısına ulaşılmıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada ray yüzey kusuru ve ray kırığı sınıflandırma problemi günümüzde pek çok alanda öncü yenilikler getiren derin öğrenme yöntemlerinden olan artık ağ yaklaşımı ile çözülmeye çalışılmıştır. Önerilen üç farklı artık ağ mimarisi de oldukça yüksek sınıflandırma başarısı göstermiştir. Sınıflandırma başarısı daha fazla katman barındıran ResNet-101 modeline %100'e kadar çıkmış, diğer iki mimaride de %98'in üzerinde bir başarılı sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Raylı sistem işletmeciliğinin güvenliği ve güvenilirliği için kestirimci bakım faaliyetlerinin olmazsa olmazı olan görsel muayene süreçlerinde uzman personelin karar verme mekanizmasında derin öğrenme metotları ile yapılan hata sınıflandırma işlemleri büyük avantajları beraberinde getirmektedir. Hem uzman personelin nihai kararı vermesine yardımcı olduğu gibi hem de karar verme süreçlerini hızlandırarak eğer gerekiyorsa ilgili bakım onarım faaliyetinin bir an önce gerçekleştirilebilmesi için zaman kazandırmaktadır. Bu çalışma birbirine karışma ihtimali fazla olan ve ayrıca ray kırığı probleminin öncülü olabilecek ciddi ray yüzey kusurlarının başlangıç aşamasında tespiti ve doğru sınıflandırıldığı düşünüldüğünde bakım onarım faaliyetlerine ciddi katkı sunabileceği muhakkaktır. Dahası, bu çalışma farklı ray hata tiplerini sınıflandıracak ve ayrıca ray bağlantı elemanlarında oluşabilecek deformasyon ve kayıpları da tespit edecek şekilde genişletilebilecek niteliktedir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 22ADP036 no'lu proje ile desteklenmiştir. TCDD Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi İşletme Müdürlüğü (DATEM)'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] L. Kou, "A review of research on detection and evaluation of the rail surface defects.", *Acta Polytech. Hungarica* vol. 19 no. 3, pp. 167-186, 2022.
- [2] Z. Popović, V. Radović, L. Lazarević, V. Vukadinović, & G. Tepić, "Rail inspection of RCF defects.", *Metalurgija*, vol. 52 no. 4, pp. 537-540, 2013.
- [3] A. Falamarzi, S. Moridpour, & M. Nazem, "A review on existing sensors and devices for inspecting railway infrastructure.", *Jurnal Kejuruteraan*, vol. 31 no.1, pp. 1-10, 2019.
- [4] "Rayların Gözle Muayenesine Ait 106 No'lu Genel Emir", TCDD 106 Nolu Genel Emir, 2012.
- [5] V. W. Anelli *et al.*, "Deep learning-based adaptive image compression system for a real-world scenario." *2020 IEEE Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)*, 2020.
- [6] "Piri Reis Yüksek Hızlı Test Treni Raporu", TCDD, Ankara, 2017.
- [7] M.A. Sevim, A.C. Çelt, S. Kabar, and Ö. Akgünlü "Demiryollarında raylara uygulanan tahribatsız muayene yöntemleri," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 60-74, Jan. 2020.

- [8] A. Çelik, "Demiryolu ray ve kusurlarını tespit etmek için geliştirilen iki yeni yöntem," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 12, pp. 52-63, July. 2020. doi: 10.47072/demiryolu.737624
- [9] H. Yılmaz Sönmez, & Z. Öztürk, "Effects of traffic loads and track parameters on rail wear: A case study for Yenikapı–Ataturk Airport Light Rail Transit Line." *Urban Rail Transit*, vol. 6 no. 4, pp. 244-264, 2020.
- [10] "Rail Defects Handbook: Some Rail Defects, their Characteristics, Causes and Control", RC 2400 Issue A, Revision 0, Australian Rail Track Corporation, 2006.
- [11] K. He, *et al.*, "Deep residual learning for image recognition.", *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016.
- [12] X. Song, K. Chen, & Z. Cao, "ResNet-based image classification of railway shelling defect.", *Proceedings of 39th Chinese Control Conference* pp. 6589-6593, 2020.
- [13] D. Yao, Q. Sun, J. Yang, H. Liu, & J. Zhang, "Railway fastener fault diagnosis based on generative adversarial network and residual network model.", *Shock and vibration*, pp.1-15, 2020.
- [14] D. Wang, H. Su, G. Chen, D. Xu, L. Wang, & X. Zhao, "Defect Detection Method of Railway Fastener Based on SPP-improved ResNet", *IEE CAA Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS)*, 2021.
- [15] Z. Zheng, H. Qi, L. Zhuang, & Z. Zhang, "Automated rail surface crack analytics using deep data-driven models and transfer learning.", *Sustainable Cities and Society*, no. 70, 2021.
- [16] M. Sevi, İ. Aydın, E. Akın, "Detection of rail surface defects based on ensemble learning of YOLOv5," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 115-132, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1205483
- [17] M. Sarıtaş, Y.S. Taşpınar, İ. Çınar & M. Köklü, "Railway Track Fault Detection with ResNet Deep Learning Models.", *International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'23)*, pp. 66-72, 2023.
- [18] S.S. Kırat, İ. Aydın, "Açıklanabilir yapay zekâ tabanlı denetimsiz öğrenme ile ray kusur tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 1-13, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1231751
- [19] G. Karaduman, E. Akın, B. Binay, M. Dilekli, "Katener sistemlerindeki izolator kusurlarının derin öğrenme ile tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 185-195, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1114665

Özgeçmiş



Murat BAŞARAN

Lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde 2005 yılında tamamlamıştır. Yüksek lisans ve doktora eğitimlerini Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde sırasıyla 2009 ve 2016 yıllarında tamamlamıştır. Eskişehir Teknik Üniversitesi Ulaştırma Meslek Yüksek Okulu Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: muratb@eskisehir.edu.tr



Ömür AKBAYIR

Lise eğitimini Demiryolu Meslek Lisesinde, lisans ve yüksek lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nde, doktora eğitimini Gazi Üniversitesi'nde tamamlamıştır. 1999-2015 yıllarında TCDD'de Teknisyen ve Mühendis olarak, 2015-2018 yıllarında Anadolu Üniversitesi'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmıştır. 2018 yılından bu yana Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde çalışmakta olup Doç. Dr. unvanını 2022 yılında almıştır.

E-Posta: omurakbayir@eskisehir.edu.tr

**Mehmet FİDAN**

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Yüksek lisans ve doktora eğitimini Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksek Okulu Raylı Sistemler Elektrik-Elektronik Programında doktor öğretim üyesi olarak çalışmakta ve yine aynı alanda akademik çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: mfidan@eskisehir.edu.tr

**Mine SERTSÖZ**

1984 tarihinde Bilecik'in Pazaryeri ilçesinde doğdu. Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliğinden mezun oldu. Yüksek Lisansını Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde, Doktora eğitimini ise Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde tamamladı. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksek Okulu Raylı Sistemler Elektrik Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmakta ve yine aynı alanda akademik çalışmalarına devam etmektedir. Evli ve iki çocuk annesidir.

E-Posta: msertsoz@eskisehir.edu.tr

**Muhammet ÖZTÜRK**

Lisans eğitimini Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde 2018 yılında tamamlamıştır. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

E-Posta: muhammet.8494@gmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Murat BAŞARAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Yazılım. Ömür AKBAYIR: Verilerin temini, Sonuçların yorumlanması. Mehmet FİDAN: Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Mine SERTSÖZ: Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Muhammet ÖZTÜRK: Görselleştirme, Taslak hazırlama.



Cer Transformatörlerinde Boşta Çalışma Kayıplarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hesaplanması

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE¹, Oluş SÖNMEZ¹, Yunus Berat DEMİROL^{*2}, Elif SAKALLIOĞLU², Bora ALBOYACI³

¹ Sönmez Transformatör San. ve Tic. A.Ş., Kocaeli, Türkiye

² Genetek Güç Enerji Ltd. Şti., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, Türkiye

³ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

* yunusberat.demirol@genetek.com.tr

(Alınış/Received: 23.11.2023, Kabul/Accepted: 29.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Elektrikli lokomotiflerde kullanılmakta olan cer transformatörleri tren sisteminde hareket gücü için gerekli olan gerilim dönüşümünü gerçekleştirmektedir. Trenlerde kritik öneme sahip olan bu elemanların tasarımı aşamasında dikkat edilmesi ve üretimden önce hesaplanması gerekli olan parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler transformatörün kısa devre empedansı, sargıların doğru akım direncine bağlı olarak oluşan kayıplar, sargılarda oluşan girdap akımı kayıpları, transformatörün harmonikli akımlar ile yüklenmesi durumunda oluşan kayıplar, inrush akımı, kazan kayıpları, boşta çalışma kayıpları, kısa devre kuvvetleri, kapasitans değerleri, elektrik alan dağılımları olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin tasarım aşamasında hesaplanması sürdürülebilirlik ve güvenilirlik için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada örnek bir cer transformatöründe boşta çalışma kayıpları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Hesaplamalar gerçekleştirilirken cer sisteminde izin verilen maksimum ve nominal gerilim seviyeleri değerlendirilmeye alınmıştır. Daha sonra analiz sonuçları, üretilen cer transformatörü üzerinde gerçekleştirilen test çalışmaları ile doğrulanmıştır. Bu kapsamda, cer transformatörlerinin tasarımında hesaplanması gerekli olan parametrelerden biri olan boşta çalışma akımı ve boşta çalışma kaybı hakkında bilgi verilip hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamaları tasarım aşamasında gerçekleştirilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Cer transformatörü, Sonlu elemanlar analizi, Boşta çalışma kaybı, Boşta çalışma akımı, Maxwell denklemleri

Calculation of No-Load Losses in Traction Transformers with Finite Element Method

Abstract: Traction transformers used in electric locomotives perform the voltage conversion required for traction power in the train system. Some parameters need to be considered during the design phase of these elements, which are critical in trains and need to be calculated before production. These parameters can be listed as short circuit impedance of the transformer, losses due to direct current resistance of the windings, eddy current losses in the windings, losses occurring when the transformer is loaded with harmonic currents, inrush current, tank losses, no-load losses, short circuit forces, and capacitance values. Calculating these parameters at the design stage is critical for sustainability and reliability. In this study, no-load losses in a sample traction transformer calculated with the finite element method. While performing the calculations, the maximum and nominal voltage levels allowed in the traction system were considered. After, the analysis results were confirmed with the test results performed on the produced traction transformer. In this context, information was given, and calculations were made about the no-load current and no-load loss, which are one of the parameters that need to be calculated in the design of traction transformers. The importance of performing these calculations at the design stage is emphasized.

Keywords: Traction transformer, Finite element analysis, No-load loss, No-load current, Maxwell's equations

Atıf için/Cite as: S. Çürükova Kale, O. Sönmez, Y.B. Demirool, E. Sakallıoğlu, B. Alboyacı, "Cer transformatörlerinde boşta çalışma kayıplarının sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 171-183, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1395174

1. Giriş

Raylı sistemlerde kullanılmakta olan elektrikli lokomotiflerin hareket gücü için çeşitli elektriksel ekipmanlar kullanılmaktadır. Bu ekipmanların tasarım ve işletme parametreleri sistemlerin sağlıklı çalışması için önemli olmaktadır. Elektrikli lokomotifler pantograf elemanı ile yüksek gerilim hattına bağlanmaktadır. Pantograftan gelen elektrik enerjisi yüksek gerilim kablosu ile lokomotifin üstünde veya altında konumlandırılmış olan cer transformatörüne gelmektedir. Bu aşamada cer transformatörünün yüksek gerilim buşingine kablo başlığı ile bağlantı yapılmaktadır. Daha sonra cer transformatörü uygun gerilim dönüşümünü gerçekleştirip transformatörün sekonder çıkışları konvertör elemanlarına gitmektedir [1]. Konvertör elemanları ise uygun dalga formunda gerilim oluşturup cer motorlarını veya yardımcı sistemleri beslemektedir. Bu sayede hareket gücü ve yardımcı ekipmanların çalışması için gerekli olan güç elde edilmektedir. Bu aşamalarda her bir sistemin kendi içerisinde dikkatle hesaplanması gerekli olan elektriksel parametreler bulunmaktadır. Pantograf elemanında elektrik alan dağılımları ve mekanik hasarlar [2], yüksek gerilim kablolarında izolasyon sorunları, kablo başlıklarında kısmi boşalmalar [3], transformatörlerde aşırı ısınmalar, konvertörlerde yüksek harmonik sorunları gibi problemler görülebilmektedir. Bundan dolayı bu ekipmanların tasarımı aşamasında işletme parametrelerine uygunluğunun hesaplanması ve değerlendirilmeye alınması gerekmektedir. Bu, sistem güvenilirliği ve sürdürülebilirlik için kritik öneme sahiptir.

Literatürde cer transformatörlerinde hesaplanması gerekli olan elektriksel parametrelerin incelendiği [4], elektrikli lokomotiflerde kullanılmakta olan bara ve transformatörlerin oluşturduğu manyetik alanların incelendiği [5], Metro AC cer güç dağıtım sistemlerinde yük paylaşımının modellendiği [6], demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde katener sistem tasarımlarının [7], topraklama ve temas gerilimlerinin incelendiği [8], pantograf boynuz hatalarının derin öğrenme ve görüntü işleme teknikleri ile tespit edildiği [2], metro hattında araç kapasitesinin artırılmasının orta gerilim ve cer sistemleri üzerine etkilerinin incelendiği [9], raylı ulaşım sisteminde tahrik amaçlı katı hal transformatörü kullanımının incelendiği [10], elektrikli demiryolu hatlarında kompanzasyon sisteminin incelendiği [11], dizel elektrikli lokomotiflerde cer sistemlerinin gelişimi üzerine bir incelemenin gerçekleştirildiği [12] çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Elektrikli trenlerde kullanılmakta olan cer transformatörlerinin tasarım parametreleri kritik önem taşımaktadır. Cer transformatörleri tasarlanırken kısa devre empedansı, kazan kayıpları, sargı eddy kayıpları, inrush akımı, boşta çalışma kayıpları, kısa devre kuvvetleri gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Literatürde alternatif akım sistemine bağlı olan transformatörlerde yüksek frekanslı harmoniklerin filtrelenmesi için cer transformatörleri ile LCL filtreleme uygulamasının incelendiği [13], [14], cer transformatörlerinde analitik olarak empedans hesaplamalarının gerçekleştirildiği [15], cer transformatörlerinin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [16], AC demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde EMC incelemelerinin gerçekleştirildiği [17] çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Cer transformatörlerinde boşta çalışma durumunun incelendiği çalışmaların literatürde sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada örnek bir cer transformatörünün farklı işletme gerilimlerine göre boşta çalışma kayıpları ve boşta çalışma akımları incelenmiştir. Bu amaç ile Ansys Electronic Suite sonlu elemanlar yazılımı ile modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak cer transformatörlerinde boşta çalışma durumunda oluşan elektriksel parametreler değerlendirilmiş ve analizlerin gerekliliği vurgulanmıştır.

Tren üreticileri için lokomotiflerde kullanılan cer transformatörlerinin elektriksel parametreleri sistemin diğer elemanlarını da etkilediğinden dolayı önemli olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen hesaplamalar da transformatörün elektriksel parametrelerinin hesabı kısmında katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, tasarım aşamasında boşta çalışma durumu için kayıp ve akım

değerlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabileceği gösterilmiştir ve bu alanda literatüre katkı sağlanmıştır.

1.1. Demiryolu sistemlerinde gerilim seviyeleri

Demiryolu sistemlerinde bölgelere göre farklı frekans ve gerilim seviyeleri kullanılmaktadır. Farklı sistem frekansları için gerilim seviyeleri Tablo 1. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 1. Farklı sistem frekansları için demiryolu elektrik sistemi gerilimleri [18]

| Sistem frekansı (Hz) | En düşük kalıcı olmayan gerilim (U _{min2}) - (V) | En düşük kalıcı gerilim (U _{min1}) - (V) | Nominal gerilim (V) | En yüksek kalıcı gerilim (U _{max1}) - (V) | En yüksek kalıcı olmayan gerilim (U _{max2}) - (V) |
|----------------------|--|--|---------------------|---|---|
| 16,7 | 11000 | 12000 | 15000 | 17250 | 18000 |
| 50 | 17500 | 19000 | 25000 | 27500 | 29000 |

BS EN 50163 standardına göre, gerilimin U_{min1} ile U_{min2} arasında olduğu süre 2 dakikayı geçmemelidir. Gerilimin U_{max1} ile U_{max2} arasında olduğu süre 5 dakikayı geçmemelidir. Normal şartlarda gerilim U_{min1} ile U_{max1} arasında olmalıdır. Buna göre, 25 kV nominal gerilim seviyesi için tasarlanan cer transformatörleri 19 kV ile 27,5 kV arasındaki gerilimler ile işletilmeye uygun olmalıdır. 15 kV nominal gerilim seviyesi için tasarlanan cer transformatörleri ise 12 kV ile 17,25 kV arasındaki gerilimler ile işletilmeye uygun olmalıdır. Transformatör tasarımında nüve indüksiyonu ve buna bağlı olarak boşa çalışma kaybı ile boşa çalışma akımı gerilim seviyesine göre değişecektir. Tasarım aşamasında değişken gerilimler değerlendirilmeye alınmadığında transformatörde ısınma sorunları oluşabilmektedir.

1.2. Cer transformatörleri için elektriksel parametrelerin üretim toleransları

Cer transformatörlerinin sağlaması gerekli olan elektriksel parametrelerin üretim toleransları bulunmaktadır. Transformatör tasarlanıp üretildikten sonra gerçekleştirilen test sonuçları bu sınırların içerisinde kalmalıdır. Bu toleranslar Tablo 2. üzerinde gösterilmiştir. Buna göre verilen tolerans değerleri, nominal değerlerden sapmayı göstermektedir. Örnek olarak, toplam kayıpların 10 kW olarak hesaplandığı bir transformatör için üretim sonrasında kayıp değerinin 11 kW olarak ölçülmesi kabul edilebilir, 11kW üzeri ise kabul edilemez bir durumdur. Empedans için ise, örnek olarak %20 değeri hesaplanan bir trafo için üretim sonrasında %18-%22 arasında ölçülmesi uygun olmaktadır.

Tablo 2. Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin üretim toleransları [19]

| Özellik | Tolerans |
|--------------------------|----------|
| Sargı direnci | ≤10% |
| Toplam kayıplar | +10% |
| Komponent kayıpları | +15% |
| Gerilim dönüştürme oranı | ±0,5% |
| Empedans | ±10% |
| Boşa çalışma akımı | +30% |

Cer transformatörlerinin elektriksel parametrelerinin üretim toleransları içerisinde kalması önemli olmaktadır. Bundan dolayı belirtilen elektriksel parametrelerin üretimden önce hesaplanması gerekmektedir. Boşa çalışma akımı da bu parametrelerden biridir.

1.3. Transformatörlerde nüve indüksiyonu, boşa çalışma kayıpları ve akımları

Cer transformatörlerinin lokomotiflerdeki kullanım amacı, katener sistemden alınan gerilimin uygun oranda düşürülmesi ve konvertör elemanının beslenmesidir. Transformatör elemanının alçak gerilim ve yüksek gerilim sargılarındaki sarım sayılarına göre bir dönüştürme oranı

oluşmaktadır. Bu olay Faraday yasasına dayanmaktadır. Faraday yasasına göre değişken bir manyetik alan içerisinde bulunan iletkenin uçlarında bir gerilim indüklenmektedir. Yüksek gerilim tarafından uygulanan gerilimin oluşturduğu akı nüve içinde kapalı bir yol izlemekte ve alçak gerilim sargısını kesitlemektedir. Bu esnada alçak gerilim sargısında bir gerilim indüklenmektedir. Bu esnada nüve üzerindeki akıdan dolayı bir indüksiyon oluşmaktadır. Bu indüksiyonun uygun seviyede olması gerekmektedir.

Boşta çalışma kayıplarına sebep olan en önemli fizik olayı eddy kayıplarıdır. Nüve içerisinde zamanla değişen akı, laminasyonlar üzerinde bir gerilim indüklemektedir ve bu gerilim laminasyonların kendisi üzerinden kısa devre olmaktadır. Laminasyon kalınlığı azaldıkça oluşacak eddy kaybı da azalmaktadır. Eddy kayıplarının oluşturduğu bu kayıp, boşta çalışma kaybı olarak adlandırılmaktadır. Bu kayıplar, nüve malzemesi üreticileri tarafından sağlanan B-P eğrileri ile transformatörler için hesaplanabilmektedir. B-P eğrileri ağırlık başına oluşacak olan kayıp için verilmektedir. Bu sayede transformatör çekirdek tiplerine göre kayıp hesaplamaları yapılabilir. Transformatörlerde boşta çalışma akımlarının iki bileşeni bulunmaktadır. Bunlardan birisi, çekirdek kayıplarını oluşturan aktif bileşen, diğeri ise transformatör çekirdeğinin mıknatıslanmasını sağlayan reaktif bileşen olarak tanımlanmaktadır.

1.4. Transformatör çekirdeklerinde kullanılan malzemeler

Transformatörlerin nüve imalatında en yaygın şekilde kullanılan malzemeler M grubu olarak adlandırılan yönlendirilmiş nüve malzemeleridir. AISI (American Iron and Steel Institute)'e göre M2, M3, M4, M5 ve M6 olarak sınıflandırılan bu malzemelerde yer alan sayısal ifade kayıp düzeyini göstermektedir. H grubu malzemeler (H0, H1, H2) ise M grubu malzemelere göre daha yüksek permeabilite değerine sahiptir ve daha düşük kayıp değerleri sunar. H grubu malzeme kullanımı ile M grubuna kıyasla %10'a kadar daha düşük kayıp değerleri elde etmek mümkündür. H-DR grubu malzemeler (H0-DR, H1-DR, H2-DR) ise H grubu malzemelere lazer işlemi uygulanarak hücresel yapılarının iyileştirilmesi ile üretilir. Bu sayede eddy kayıplarının azaltılması sağlanır. Tablo 3. üzerinde 50Hz frekansta ve 1,5T indüksiyon değeri için M, H ve H0 grubu malzemelerin kayıp yoğunlukları gösterilmektedir. Literatürdeki araştırmalar daha ince laminasyon kullanımı ve lazer uygulamasıyla beraber iyileştirilmiş malzeme kullanımının nüve kayıplarını %35'e varan oranda azaltılabildiğini göstermektedir.

Tablo 3. Farklı nüve malzemelerinin elektriksel özellikleri

| Malzeme tipi | M3 | M4 | M5 | M6 | H0 | H1 | H2 | H0-DR | H1-DR | H2-DR |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Laminasyon kalınlığı(mm) | 0,23 | 0,27 | 0,30 | 0,35 | 0,23 | 0,27 | 0,30 | 0,23 | 0,27 | 0,30 |
| Kayıp yoğunluğu (W/kg) | 0,67 | 0,77 | 0,86 | 0,97 | 0,60 | 0,70 | 0,74 | 0,57 | 0,65 | 0,70 |

2. Metot

Transformatörlerde boşta çalışma kaybı ve boşta çalışma akımı hem analitik hem de nümerik yöntemler ile tasarım aşamasında hesaplanabilir. Bu bölümde hesaplama yöntemleri gösterilmiştir.

2.1. Analitik yaklaşım

Transformatörün temel tasarım parametreleri arasındaki ilişki Denklem 1. ile ifade edilmektedir.

$$E = 4.44 * N * B_m * f * A \quad (1)$$

eşitliği ile yazılmaktadır. Bu eşitlikte; B_m maksimum akı yoğunluğu (T), N sarım sayısı, f frekans (Hz) ve A nüve kesit alanını (m^2) ifade etmektedir. Buna göre, sarım sayısının sabit olması durumunda nüve kesit alanı ile akı yoğunluğu ters orantılı olarak değişmektedir. Sinüs formunda gerilim ile uyarma durumunda nüve kayıpları Denklem 2. ile ifade edilmektedir.

$$P_{total-coreloss} = P_h + P_e + P_i \quad (2)$$

biçiminde yazılmaktadır. Eşitliğin sağ tarafındaki üç parametre sırasıyla histerezis kaybı, eddy akımı kaybı ve ilave kayıpları temsil etmektedir. Bu parametrelerin her biri nüve indüksiyonu ve frekansa bağlı bir fonksiyon şeklinde Denklem 3. ile Denklem 5. arasında ifade edilmektedir [20].

$$P_h = k_h f B^n \quad (3)$$

$$P_e = k_e f^2 B^2 \quad (4)$$

$$P_i = k_i f^{1.5} B^{1.5} \quad (5)$$

Bu eşitliklerde k_h histerezis kaybı katsayısı, k_e eddy kaybı katsayısı ve k_i is ilave kayıp katsayısıdır. Burada n Steinmetz katsayısı olarak adlandırılmakta olup literatürde 1,6 ile 2 arasında kabul edilmektedir. Literatürde yer alan araştırmalar nüve indüksiyonunda meydana gelen %1 oranında artışın güç kayıplarının yaklaşık %2 oranında artmasına sebep olduğunu ortaya koymaktadır. Histerezis kaybı, eddy kaybı ve ilave kayıp katsayıları sırasıyla Denklem 6. ile Denklem 8. arasında tanımlanmıştır.

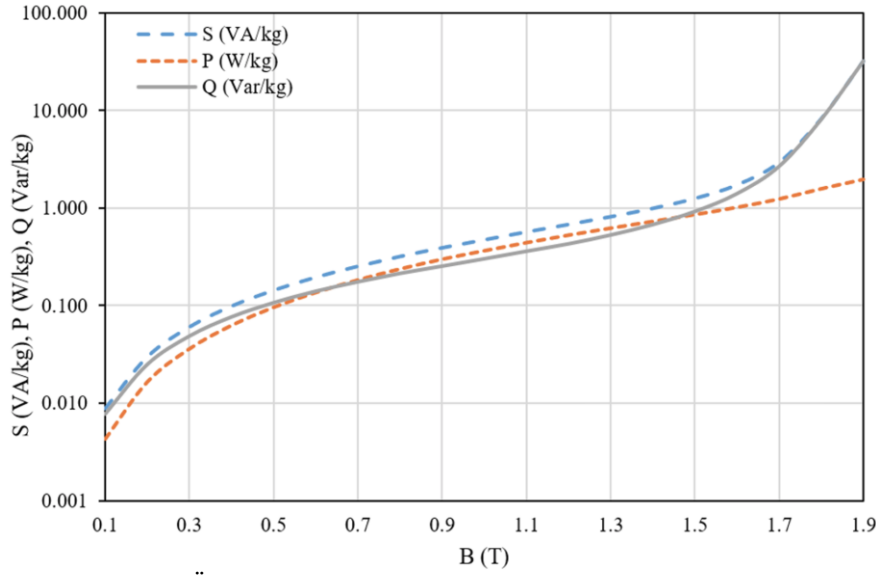
$$k_h = \frac{\pi}{\rho} \frac{H_{irr}}{B_p} \quad (6)$$

$$k_e = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6 \rho} \quad (7)$$

$$k_i = 7.87 \sqrt{\sigma G V_0 S} \quad (8)$$

olarak yazılmaktadır. Bu eşitliklerde H_{irr} malzemenin histerezis eğrisinde $B=0$ noktasına karşılık gelen pozitif alan şiddeti değeri, σ is elektriksel iletkenlik, d is laminasyon kalınlığı, ρ malzemenin kütle yoğunluğu, S laminasyon kesit alanı, G bir sabit değer ve V_0 malzemenin mikro yapısına bağlı olarak yazılan bir başka sabit değerdir. Denklem 3. ile Denklem 8. arasında görüldüğü üzere, nüve kayıpları nüve üretiminde kullanılan malzemenin fiziksel ve elektromanyetik özelliklerinin yanı sıra frekans ve indüksiyon değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple, transformatörlerde nüve kayıplarını azaltmak için nüve üretiminde kullanılan malzemenin özelliklerinin yanı sıra transformatörün tasarım büyüklükleri de önem taşımaktadır [21].

Transformatörlerde boşta çalışma akımı ve kaybını belirleyen temel parametrelerden biri çekirdek malzemesidir. Çekirdek malzemesinin tipine göre kayıp yoğunluğu ve mıknatıslanma akımı seviyesi değişmektedir. Şekil 1. üzerinde M5 tipi bir çekirdek malzemesi için B-S (VA/kg), B-P (W/kg) ve B-Q (VAr/kg) eğrileri gösterilmiştir. Bu eğriler nüve malzemenin indüksiyon değişimine göre kullanacağı gücü tanımlamaktadır. Aktif güç B-P eğrisinden bulunmaktadır ve kayıpları oluşturmaktadır. Reaktif güç ise B-Q eğrisinden bulunmaktadır ve malzemenin mıknatıslanması için gerekli olan reaktif gücü ifade etmektedir. Aktif ve reaktif bileşenin karekök içinde karelerinin toplamı görünür gücü vermektedir ve toplam akım hesaplanırken görünür güçten akıma geçilmesi gerekmektedir.



Şekil 1. Örnek bir M5 tipi malzemenin elektriksel parametreleri

Buna göre çekirdek kaybı malzeme üreticisi tarafından sağlanan B-P eğrisi yardımıyla Denklem 9. ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{Boşta kayıp: } w * K_b * W \quad (9)$$

Benzer şekilde boşta çalışma reaktif gücü de bulunabilir. Bu formülde, w üretici tarafından sağlanan B-P eğrisinden ilgili nüve indüksiyonu için hesaplanan watt/kg cinsinden kayıp değeri, K_b yapısal faktör katsayısı, W transformatör nüvesinin (çekirdeğinin) ağırlığıdır. Yapısal faktör Denklem 10. ile hesaplanmaktadır [22]:

$$\text{Yapısal faktör} = \frac{\text{Transformatör çekirdek kaybı } \left(\frac{\text{watt}}{\text{kg}}\right)}{\text{Malzeme için Epstein çekirdek kaybı } \left(\frac{\text{watt}}{\text{kg}}\right)} \quad (10)$$

2.2. Sonlu elemanlar yöntemi

Nümerik yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi ile elektrik, makine, inşaat, kimya mühendisliği gibi alanlarda çeşitli analiz çalışmaları yapılabilir. Örnek olarak [23] çalışmasında yüksek hızlı hatlarda granüler alt balast yerine asfalt tabaka kullanımının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi incelenmiştir. [24] çalışmasında tekerlek ve ray etkileşiminin çeliklerin yorulma hasar direnci üzerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. [25] çalışmasında metro vagonu dizaynı üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. [26] çalışmasında demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Bunların yanında sonlu elemanlar yöntemi ile güç sistemi ekipmanlarında elektriksel parametreler hesaplanabilmektedir ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilmektedir. Literatürde kablo başlıklarında oluşan arızaların incelendiği [3], izolatörlerde oluşan elektrik alan dağılımlarının değerlendirildiği [27], korona halkası dizayn parametrelerinin incelendiği [28], yüksek gerilim yeraltı kablolarında sistem tasarım parametrelerinin incelendiği [29], kablo ve busbar sistemlerinin karşılaştırıldığı [30], busbar sistemlerinde farklı dizayn parametrelerinin performanslarının değerlendirildiği [31], dağıtım transformatörlerinde kullanılan nüve malzeme

materyallerinin performanslarının değerlendirildiği [32], Elektrikli araçların kablosuz güç aktarım sistemi ile şarj edilmesi için kullanılan farklı transformatör modellerinin değerlendirildiği [33], elektrik motorlarının tasarımına yönelik incelemelerin gerçekleştirildiği [34] çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Elektriksel analizler için sonlu elemanlar yöntemi ilgili model geometrisi üzerinde sonlu sayıda ağ elemanı oluşturularak, bu ağ elemanlarının her birinin üzerinde Maxwell denklemlerini (Denklem 11. - Denklem 14.) çözerek sonuç elde etmektedir [22]. Model üzerinde oluşturulan ağ yapısı ise Şekil 2. üzerinde gösterilmiştir.

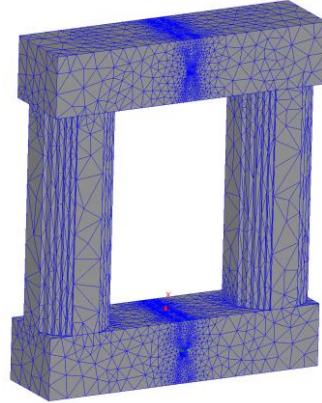
$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (13)$$

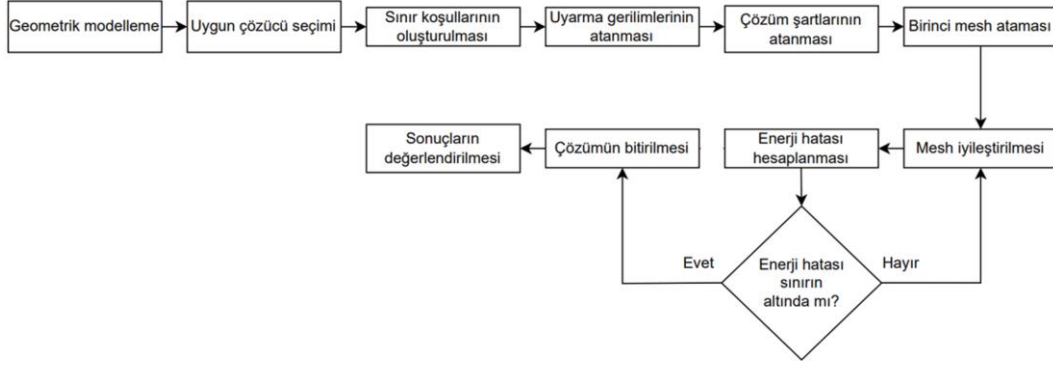
$$\nabla \cdot D = \rho \quad (14)$$

Burada, H manyetik alan şiddeti vektörü (A/m), J akım yoğunluğu vektörü (A/m²), D elektrik akı yoğunluğu vektörü (C/m²), t zaman (s), E elektrik alan şiddeti vektörü (V/m), B manyetik alan yoğunluğu vektörü, ρ yük yoğunluğu (C/m³) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2. Cer transformatörü çekirdeği üzerinde oluşturulan ağ yapısı

Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme çalışmalarında uygulanması gerekli olan adımlar ve ayarlanması gerekli olan parametreler bulunmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılmakta olan akış şeması Şekil 3. üzerine gösterilmiştir. Analiz çalışmalarında Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Program içerisinde enerji sınır hatası %1 olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme çalışmaları diğer transformatör tipleri (dağıtım, konverter, güç...) için de gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılmakta olan akış şeması

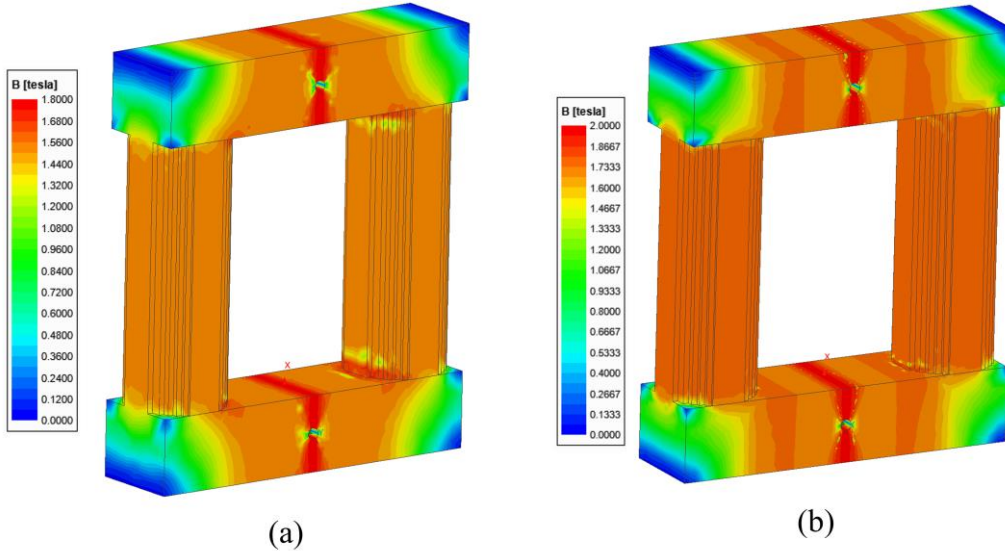
3. Bulgular

Gerçekleştirilen analiz çalışmaları kapsamında örnek bir cer transformatörünün 25 kV ve 29 kV uyarma gerilimleri ile oluşan çekirdek kayıpları ve boştaki çalışma akımları hesaplanmıştır. Hesaplamaların gerçekleştirildiği tek fazlı cer transformatörü parametreleri Tablo 4. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 4. Transformör parametreleri

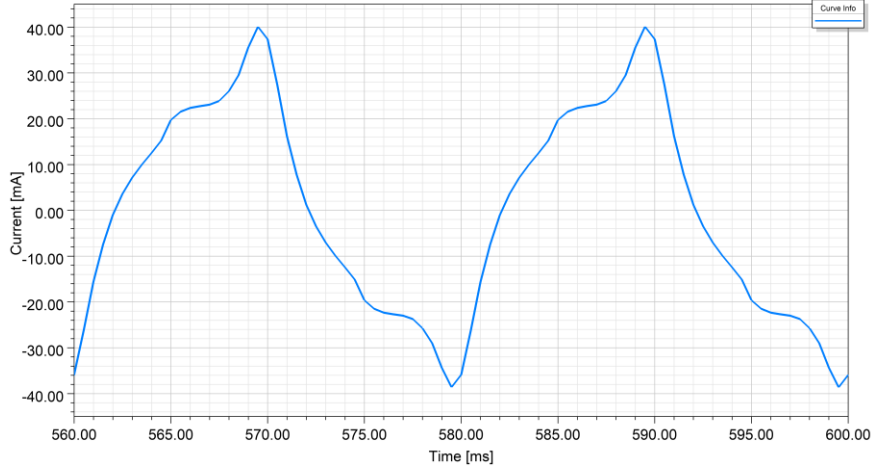
| Sargı İsmi | Güç (kVA) | Gerilim (kV) | Anma akımı (A) |
|----------------|-----------|--------------|----------------|
| Yüksek gerilim | 650 | 25 | 26 |
| Cer-1 | 300 | 0,5 | 600 |
| Cer-2 | 30 | 0,5 | 600 |
| Filtre | 50 | 0,64 | 78,125 |

Gerçekleştirilen analizler sonucunda çekirdek üzerinde oluşan indüksiyon seviyeleri Şekil 4. üzerinde gösterilmiştir.

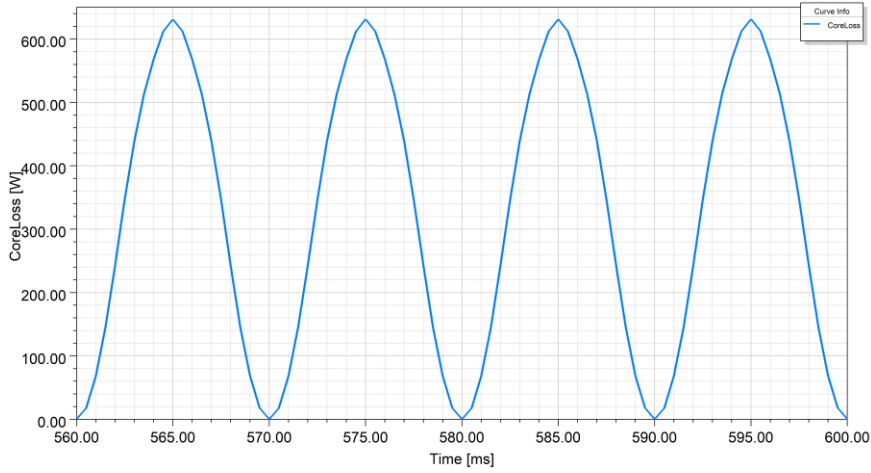


Şekil 4. Cer transformatörü çekirdeği üzerinde oluşan indüksiyon dağılımı (a) 25 kV uyarma durumu (b) 29 kV uyarma durumu

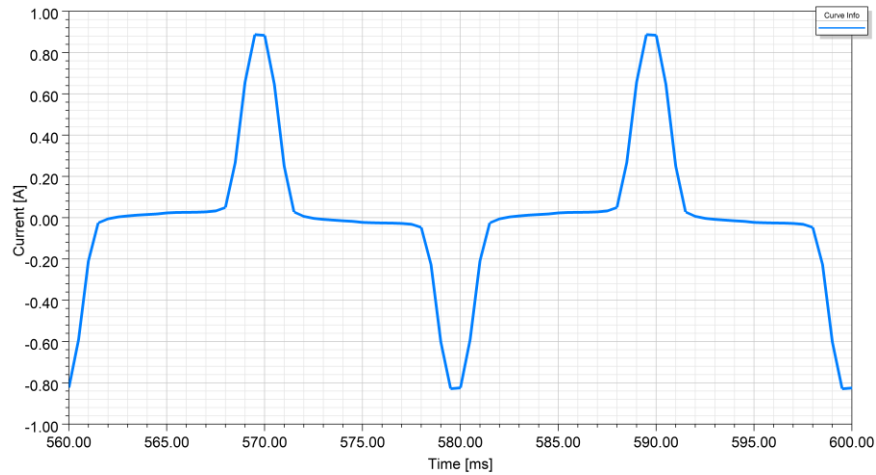
Gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda 25 kV gerilim seviyesi için akım dalga formu Şekil 5. üzerinde, çekirdek kayıplarının dalga formu ise Şekil 6. üzerinde gösterilmiştir. 29 kV uyarma durumu için ise akım dalga formu Şekil 7. üzerinde, çekirdek kayıplarının dalga formu ise Şekil 8. üzerinde gösterilmiştir.



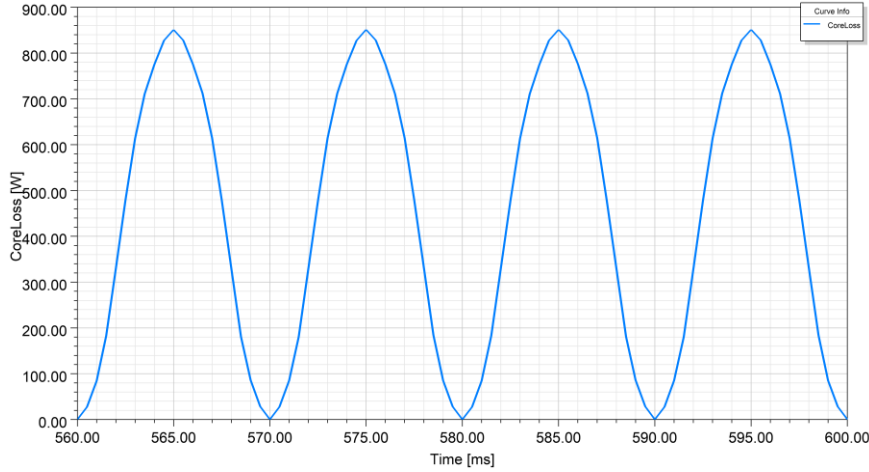
Şekil 5. 25 kV uyarma durumunda oluşan akımın dalga formu



Şekil 6. 25 kV uyarma durumunda oluşan çekirdek kaybının dalga formu



Şekil 7. 29 kV uyarma durumunda oluşan akımın dalga formu



Şekil 8. 29 kV uyarma durumunda oluşan çekirdek kaybının dalga formu

Gerçekleştirilen analiz ve test sonuçları Tablo 5. üzerinde karşılaştırılmıştır. Test sonucu için genişletilmiş ölçüm belirsizliği standart belirsizliğin genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.

Tablo 5. Gerçekleştirilen analiz ve test sonuçlarının karşılaştırılması

| Durum | Boşta çalışma akımı (mA) | Boşta çalışma kaybı (W) |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 25 kV uyarma- Test | 23,8 | 324 |
| 25 kV uyarma- Analiz | 22,28 | 334 |
| 29 kV uyarma- Analiz | 329 | 457 |
| 25 kV uyarma- Teorik | 20,71 | 335 |
| 29 kV uyarma- Teorik | 102 | 567 |

Sonuçlar incelendiğinde boşta çalışma akımı için analiz ve test sonucu arasında %6,38, boşta çalışma kaybı için analiz ve test sonucu arasında %3.08 fark olduğu görülmektedir. Buna göre sonuçların oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. [19]'a göre boşta çalışma akımı için tasarım ve test sonucu arasında %30'a kadar farka izin verilmektedir. 25 kV ve 29 kV uyarma durumları karşılaştırıldığında ise 29 kV durumu için boşta çalışma akımının 25 kV durumunun 14,76 katı, boşta çalışma kaybının ise 1,37 katı olduğu görülmektedir. Teorik hesaplar ile analiz sonuçları karşılaştırıldığında ise 25 kV için değerlerin tutarlı olduğu görülmekteyken 29 kV için teorik ve analiz sonuçlarının arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Bu durum nüvenin doyum noktalarında çalışması durumundaki davranışından kaynaklanmaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında örnek bir cer transformatörü için boşta çalışma kayıpları ve boşta çalışma akımı farklı gerilimler ile işletme durumunda sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Bunun yanında 25 kV temel gerilim seviyesinde transformatör üzerinde laboratuvar testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. 29 kV işletme gerilimi için boşta çalışma akımının 14,76 katına çıktığı, boşta çalışma kaybının ise 1,37 katına çıktığı görülmektedir. Bu değerlerin transformatörde ısınmaya sebebiyet vermemesi gerekmektedir. Bundan dolayı cer transformatörlerinin tasarımı aşamasında bu parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi sürdürülebilirlik ve güvenilirlik için kritik öneme sahiptir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan transformatör modellerinin hazırlanması aşamasında sağladığı katkılarından dolayı Sönmez Transformator Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] N. Polater and P. Tricoli, "Technical review of traction drive systems for light railways," *Energies*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/en15093187
- [2] M. Ö. Baştürk, V. Yüksel, Y. E. Tetik, M. Yılmaz, M. Güner, ve T. Kaya, "Pantograf boynuz hatalarının derin öğrenme ve görüntü işleme teknikleri ile tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 0, no. 16, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1132123
- [3] B. Alboyacı, M. A. Çınar, Y. B. Demirool, and A. Ince, "Evaluation of the effect of structural defects in the heat-shrink cable terminal on electric field distribution," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 132, no. 105920, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105920
- [4] S. Çürükova, Y. B. Demirool, O. Sönmez, M. A. Çınar, ve B. Alboyacı, "Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 66–78, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1110515
- [5] S. Çürükova Kale, Y. B. Demirool, O. Sönmez, M. A. Çınar, ve B. Alboyacı, "Elektrikli lokomotif sistemlerinde cer transformatörü ve baraların oluşturduğu manyetik alanların sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 17, pp. 54–65, 2023, [Online]. Available: 10.47072/demiryolu.1175771
- [6] T. Ölmez ve B. Kilic, "Metro AC cer güç dağıtım sistemlerinde yük paylaşımının modellenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 12, 2020, doi: 10.47072/demiryolu.680510
- [7] Ş. Kuşdoğan ve Ö. Doğruer, "Demiryolu elektrifikasyonunda katener sistem tasarımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.871106
- [8] N. Güzel ve M. Tutucu, "Demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde topraklama ve temas gerilimi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 122–129, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.936613
- [9] Z. Yener ve Ö. Kalenderli, "Bir metro hattında araç kapasitesinin artırılmasının orta gerilim ve cer sistemleri üzerine etkileri," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1296406
- [10] U. E. Doğru ve Ö. Kalenderli, "Raylı ulaşım sistemlerinde tahrik amaçlı katı hal transformatörü kullanımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 10, pp. 63–74, 2019
- [11] Ö. Doğruer, Ş. Kuşdoğan, ve N. Yörükören, "Elektrikli demiryolu hatlarında kompanzasyon sistemi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 9, pp. 28–37, 2019
- [12] H. Deveci, "Dizel elektrikli lokomotiflerde cer sistemlerinin gelişimi üzerine bir inceleme," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 52–59, 2020
- [13] Y. Liu et al., "A novel harmonic suppression traction transformer with integrated filtering inductors for railway systems," *Energies*, vol. 13, no. 2, 2020, doi: 10.3390/en13020473
- [14] J. Xiang, J. Xu, Q. Wu, Z. Shuai, N. Tong, and Y. Liu, "Traction transformer integrated LCL filtering method for high-frequency harmonic and resonance suppression in AC train," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 148, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108922
- [15] J. El Hayek and T. J. Sobczyk, "Analytic one-dimensional design method for railways traction transformers," in *IEMDC 2003 - IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2003, vol. 3, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210690
- [16] I. Sitar, Z. Janic, and B. Cucic, "External magnetic field density of main traction transformer for EMU," *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 716–725, 2012, doi: 10.1108/03321641211200680
- [17] Z. Fei, T. Konefal, and R. Armstrong, "AC railway electrification systems-An EMC perspective," *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 8, no. 4, pp. 62–69, 2019, doi: 10.1109/MEMC.2019.8985603.
- [18] Railway applications - Supply voltages of traction system, BS EN 50163-2004+A2:2020
- [19] Railway applications - Traction transformers and inductors on board rolling Stock, IEC 60310:2016
- [20] M. A. Cinar, "Investigation of the economical and technical design feasibility of Si-Fe graded distribution transformers according to EN50588-1," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 295–300, 2020
- [21] M. A. Çınar, B. Alboyacı, and M. Sengul, "Comparison of power loss and magnetic flux distribution in octagonal wound transformer core configurations," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 1290–1295, 2014
- [22] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer engineering design, technology, and diagnostics*. CRC Press, 2004
- [23] C. Gürer, T. Akıllı Törer, ve K. Aslantaş, "Yüksek hızlı hatlarda granüler alt balast yerine asfalt tabaka kullanımının sonlu elemanlarla modellenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.867120

- [24] Y. Sarıkavak, “Tekerlek ray etkileşimi, perlitik ve bey nitik çeliklerin yorulma hasar direnci üzerine bir sonlu elemanlar analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.934471
- [25] M. E. Arı and İ. Esen, “Design of a metro train and structural analysis of the metro vehicle body by finite element method,” *Railw. Eng.*, vol. 1, no. 15, pp. 30–45, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1018663
- [26] A. Ünal, N. Akkuş, and S. T. Kandil, “Demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1027982
- [27] B. Alboyacı, M. A. Çınar, Y. B. Demiroğlu, and M. Uzar, “Reducing the failures with adding glass insulators to composite insulators of 400 kV transmission line at high altitude,” *Eng. Fail. Anal.*, p. 106678, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106678
- [28] M. Uzar, Y. B. Demiroğlu, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, “Investigation of the Effect of Corona Ring Design Parameters on Electric Field Distribution by Finite Element Method,” *Turk J Electr Power Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2023, [Online]. Available: <https://tepesjournal.org/en/investigation-of-the-effect-of-corona-ring-design-parameters-on-electric-field-distribution-by-finite-element-method-1679>
- [29] Y. B. Demiroğlu and Ö. Kalenderli, “Investigation of effect of laying and bonding parameters of high-voltage underground cables on thermal and electrical performances by multiphysics FEM analysis,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 227, p. 109987, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109987>
- [30] Y. B. Demiroğlu, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, “Evaluation of cable and busbar system in multiconductor distribution systems in terms of current and magnetic field distributions,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, no. 7, pp. 3119–3132, 2021, doi: 10.3906/ELK-2103-108
- [31] B. Alboyacı, M. A. Çınar, and Y. B. Demiroğlu, “Influence of busbar trunking system design on thermal performance operating with non-sinusoidal currents,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, no. 108815, pp. 1–9, 2023
- [32] Y. Özüpak ve M. S. Mamiş, “Dağıtım Transformatörlerinin Nüvesinde Kullanılan Farklı Materyallerin Sac Kombinasyonlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Alan Analizi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, no. 4(1), 2019
- [33] Y. Özüpak, “Elektrikli araçların kablosuz güç aktarım sistemi ile şarj edilmesi için kullanılan farklı transformatör modellerinin sonlu elemanlar yöntemi ile tasarımı ve analizi”, *GUMMFD*, c. 39, sy. 2, ss. 1113–1122, 2023, doi: 10.17341/gazimmfd.1202033
- [34] Y. Özüpak ve M. Çınar, “Design Of The Permanent Magnet Synchronous Motor Used In Electric Vehicles With The Help Of The Particle Swarm Algorithm and Ansys-Maxwell”, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 10, sy. 20, ss. 141–155, 2023, doi: 10.54365/adyumbd.1315079

Özgeçmiş



Serenay ÇÜRÜKOVA KALE

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi’nde 2013 yılında tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2015-2017 yılları arasında aynı üniversitede ‘Transformatörlerin Kazan Duvarlarında Meydana Gelen Kayıpların Azaltılması için En Uygun Şönt Eleman Boyutunun Belirlenmesi’ konulu tez çalışması ile tamamlamıştır. 2013 yılından beri Sönmez Transformatör Sanayi ve Ticaret A.Ş. ‘de tasarım müdürü olarak görev yapmaktadır. İlgi alanına giren çalışma konuları, transformatörler ve bunlara dair hesapların geliştirilmesidir. E-Posta: s.curukova@sonmeztrafo.com.tr



Oluş SÖNMEZ

Elektrik mühendisliği alanında lisans eğitimini 2009 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi'nde, yüksek lisans eğitimini ise 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamladı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine devam etmektedir. Transformator ve reaktör tasarımı, elektriksel ve termal modellenmesi ve benzetimi konu başlıklarında araştırmalar gerçekleştirmektedir.

E-Posta: osonmez@sonmeztrafo.com.tr



Yunus Berat DEMİROL

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi'nde 2020 yılında tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir. 2020 yılından beri Genetek Güç Enerji şirketinde elektrik mühendisi olarak transformatorler başta olmak üzere güç sistemi ekipmanlarının sonlu elemanlar analizi ile elektriksel parametrelerinin hesaplanması alanında çalışmaktadır.

E-Posta: yunusberat.demirol@genetek.com.tr



Elif SAKALLIOĞLU

Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde 2022 yılında tamamlamıştır ve yüksek lisans eğitimine Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde devam etmektedir. 2022 yılından itibaren Genetek Güç Enerji firmasında elektrik mühendisi olarak elektromanyetik ekibinde görev almaktadır. Güç sistemi ekipmanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile elektromanyetik analizlerini gerçekleştirmektedir.

E-Posta: elif.sakallioğlu@genetek.com.tr



Bora ALBOYACI

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini 1995 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi'nde, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini ise sırasıyla 1995 ve 1998 yıllarında Kocaeli Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Halen aynı üniversitede Elektrik Tesisleri ABD'da öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2008-2010 yılları arasında Milli Güç Kalitesi Projesi'nde ODTÜ'de doktora sonrası araştırmacı olarak görev yapmıştır. 2012 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Teknoparkta bulunan GENETEK Güç & Enerji Ltd. Şti.'nde Ar-Ge Müdürlüğü görevini yürütmektedir. Uzmanlık alanları enerji dağıtım sistemleri, güç kalitesi ve manyetik dizayn uygulamalarıdır.

E-Posta: alboyaci@kocaeli.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemi Performansının Farklı Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Hatice Gül ÖNDER*¹, Furkan AKDEMİR²

¹ Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Tapu Kadastro Yüksekokulu, Emlak ve Emlak Yönetimi Bölümü, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Ankara, Türkiye

*gul.onder@hbv.edu.tr

(Alınış/Received: 24.11.2023, Kabul/Accepted: 29.12.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Kent içi raylı ulaşım yatırımları, arazileri erişebilirlik bağıyla birbirine bağlayan ve değerli kent arazisini tüketen bir arazi kullanım kararıdır. Yatırımların büyük bütçeler gerektirmesinden kaynaklı olarak hem ekonomik hem de çevresel perspektifte yerel otoriteler birçok kaynağı rasyonel bir tutum içinde harcamak durumundadır. Bu nedenle, kent içi raylı ulaşım yatırımlarının ve verimliliklerinin periyodik olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bu kontrolü sağlayabilecek ve mevcut performans durumunu anlamak için bir yöntem önerisi yapılmaktadır. Çalışmada, kent içi raylı toplu ulaşım sistemi değerlendirilirken kullanılan performans göstergeleri, güncel literatür incelenerek hazırlanmıştır. Daha sonra söz konusu göstergeler, halihazırda Ankara ve İstanbul'da faaliyet gösteren kentsel raylı sistem performansının niceliksel değerlerinin bulunması amacıyla çok ölçütlü karar verme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Literatür kapsamında yapılan incelemeye göre, toplam hat uzunluğu, filo büyüklüğü, ortalama istasyon mesafesi, istasyon sayısı, maksimum yolcu kapasitesi, minimum frekans, yolculuk mesafesi, yolculuk süresi, ücret, ticari hız, araç için yolcu kapasitesi ve çalışma saatlerinin başlıca değerlendirme kriterleri olduğu tespit edilmiştir. Gri ilişkisel analiz, ARAS, COPRAS, Entropi tekniklerine göre, kent içi raylı sistem ve ulaşım sektöründe çalışan kişiler ile uygulama yapılmıştır. Entropi yöntemi uzman görüşüne alternatif oluşturması açısından değerlendirilirken diğer yöntemler çok ölçütlü karar verme problemi açısından daha fazla çeşitlilikte ideal raylı sistemin performansının test edilmesi ve ideallik durumunun sağlanması için kullanılmaktadır. Teknikler bazında yapılan karşılaştırma ile çalışma konusu olan raylı sistem hatları performans açısından değerlendirilmiştir. İncelenen 14 şehir içi toplu taşıma hattı arasında Ankara'da bulunan hatların her zaman en iyi performans gösteren ilk 5 hat arasında yer aldığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çok ölçütlü karar verme, Gri ilişkisel analiz, Kent içi toplu taşıma

Comparative Evaluation of Urban Rail Public Transportation System Performance with Different Multi-Criteria Decision-Making Techniques

Abstract: Urban rail transportation investments are a land use decision that connects lands with accessibility and consumes valuable urban land. Since investments require large budgets, local authorities have to spend many resources in a rational manner, both from an economic and environmental perspective. In this study, a method is proposed to provide this control and to understand the current performance status. se indicators were used in Multi-Criteria Decision Methods techniques to find quantitative values of the performance of the urban rail system currently operating in Ankara and Istanbul. From the literature, it has been determined that total line distance, fleet size, average station distance, number of stations, maximum passenger capacity, minimum frequency, travel distance, travel time, fare, commercial speed, passenger capacity for the vehicle, and operating hours are the main evaluation criteria. According to gray relational analysis, ARAS, COPRAS, Entropy techniques, the application was made with people working in the urban rail system and transportation sector. While the Entropy method is evaluated as an alternative to expert opinion, other methods are used to test the performance of a wider variety of ideal rail systems and ensure ideality in terms of multi-criteria decision-making problems. With the comparison made on the basis of techniques, the rail system lines that are the subject of the study were evaluated in terms of performance.

Atıf için/Cite as: H.G. Önder, F. Akdemir, "Kent içi raylı toplu taşıma sistemi performansının farklı çok ölçütlü karar verme teknikleri ile karşılaştırmalı değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 184-196, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1395294

Among the 14 urban public transport lines examined, it was determined that the lines in Ankara are always among the top 5 performing lines.

Keywords: Multi criteria decision making, Gray relational analysis, Urban public transport

1. Giriş

Ulaşım kavramı, insan, mal ve arazi kullanımını arasındaki fiziksel mekân bağlantısını sağlayan kentsel sistemin önemli bileşenlerinden biridir [1]. İnsanlar mevcut veya tahmin edilen potansiyeller doğrultusunda kentsel araziye çeşitli işlevler yüklemektedir [2]. Bu mekânlar işlevlerine uygun olarak kent insanının yaşamına yönelik sosyal, ekonomik, kültürel vb. özelliklere sahiptir. Zaman zaman gerçekleşen insan faaliyetleri sonucu, mekânlar arasında insan ve malların dolaşımı ve hareketi meydana gelmektedir. Gelişen teknolojiler sayesinde ulaşım, kentsel alanda mekânsal etkileşim için daha etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu durumun en yaygın örneklerinden biri, günümüzde pek çok insanın yaşadığı kentte, toplu taşıma hizmet sistemlerinin ulaşım talebine cevap verecek şekilde yapılandırılması olarak ortaya çıkmaktadır. [3]. Teknolojideki gelişmelerin ışığında, birim zamanda daha fazla insan ve malın bir noktadan başka bir noktaya taşınmasına yönelik, alternatif olarak yeni toplu taşıma sistemi arayışları gelişmeye devam etmektedir [4].

Bir yerin işlevi gereği daha fazla insan için çekim noktası haline gelmesi, bölge ve yakın çevresine yönelik birim zaman başına seyahat talebini artırmaktadır. Bazı kişiler ulaşım araçlarını yaygın olarak kullanarak bu cazibesi yüksek bölgelere ulaşabilmekte, bazı kişiler ise kullanımı daha rahat, esnek ve hızlı olan özel araçlarıyla ulaşım gerçekleştirmektedir [5].

Bir toplu taşıma sisteminin ulaşabildiği yerlere gitmek isteyen kişilerin toplu taşıma faaliyetlerini birlikte yürütmesi, şehir içi toplu taşıma olarak tanımlanabilir [6]. Kent içi toplu ulaşım yatırımları birim zamanda daha fazla seyahat talebine yönelik hareket sağlamaktadır. Bu hizmetin maksimum verimi elde edebilmesi için ileri teknoloji gerektiren bir sistem tasarımı içerisinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu hususlardan dolayı toplu taşıma sistemleri, bireysel araç kullanımı gibi özel ulaşım alternatif olarak teknolojik açıdan daha karmaşık ve çok maliyetli bir yatırım konumundadır. İnsanların mekanlar arasında hareket etmesini sağlayan kentsel toplu taşıma yatırımları, bahsedilen özellikleri nedeniyle yönetim otoriteleri aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir [7]. Diğer taraftan özel araçlar bir toplumda herkesin ekonomik olarak karşılayabileceği bir ulaşım aracı değildir [8]. Dolayısıyla daha fazla kişiye ekonomik açıdan da makul bir ulaşım hizmeti sunabilen, sosyal ve çevresel açıdan özel araçlara göre pek çok faydaya sahip olan toplu taşıma sistemleri, kentsel sistemin vazgeçilmezidir.

Birim zamanda daha fazla yolcunun yer değiştirmesinde etkili olan şehir içi toplu taşıma sistemleri farklı türlere ayrılmaktadır. Kent içi ulaşım sistemleri genel olarak esneklik, fiyat, konfor, kapasite, enerji tüketimi, yatırım ve işletme maliyetleri, emisyonlar ve kaza riski açısından farklı özelliklere sahip araç ve bileşenlerin organizasyonundan oluşmaktadır. Bunların en bilinen örnekleri arasında lastik tekerlekli toplu taşıma sistemleri ve raylı toplu taşıma sistemleri yer almaktadır. Raylı toplu taşıma sistemi esnek olmayan bir güzergahta ilerleyen, kaza riski daha az olan, yolculuk süresi sabit, güvenli, konforlu, çevre dostu, kapasitesi yüksek, kişi başı enerji tüketimi ve emisyon üretimi düşük, ulaşımı kolay, gelişmiş bir sistemdir [9]. Kent içi raylı sistemler, bölgeyi ve yakın çevresini ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan etkileyebilecek bir ulaşım hizmetidir. Hizmetin nitelik ve nicelik yönü kent içi raylı sistemlerin performans açısından birbirinden farklılaşmasını sağlamaktadır. Kent içi raylı sistemin çevreye olan mekânsal etkileri dış boyutları; kullanıcı olarak insanlar üzerindeki etkileri ise iç boyutları olarak ifade edilebilir. Kent içi raylı sistemlerin iç boyutları, hizmet açısından teknik nitelikleriyle iç içedir. Örneğin, daha yüksek kapasiteli bir raylı sistem daha fazla ulaşım talebini karşılayacak, oturan yolcular için daha yüksek kapasiteli bir raylı sistem ise daha konforlu bir ulaşım hizmeti sunacaktır.

Günümüzde kent içi raylı toplu taşıma sistemleri teknolojik gelişmelerden etkilenerek ulaşım bağlamında alternatiflerin sağlandığı alanlardan biri olarak gelişmeye devam etmektedir. Çeşitliliği oluşturduğu bilinen bu unsurlardan en önemlileri tramvay, hafif raylı sistem ve metro yatırımları, kent içi ulaşımın iyileştirilmesinde önemli alternatiflerdendir [9]. Kent içi raylı sistemler çok boyutlu olduğundan, performans kıyaslaması yaparken, çok kriterli unsurları kullanacak yaklaşımlarla değerlendirilmelidir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında hem uzman görüşüne dayalı hem de kriterin önem sırasına göre sıralama yapabilen Gri İlişkisel Analiz, Entropi, ARAS, COPRAS gibi çok kriterli değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada bu yöntemler aracılığıyla kentsel raylı sistemlerin performansı ve kriterlerin önem derecesi incelenmektedir.

Kent içi raylı sistemlerin sunduğu ulaşım hizmetinin çok yönlü faydalara sahip olması, performansının ölçülmesi açısından onu önemli bir araştırma konusu haline getirmektedir. Literatürde kent içi raylı sistemin sunduğu hizmetin performansına ilişkin benzer ölçüm çalışmaları Tablo 1’de detaylıca incelenmiştir.

Tablo 1. Kent İçi Raylı Sistem Performansını Değerlendiren Çalışma Örnekleri

| Çalışma Adı | Servis Performans Ölçütü |
|--|----------------------------|
| Kent İçi Ulaşım Sistemlerine İlişkin Tercihlerin ve Tercihlere Etki Eden Faktörlerin Analitik Hiyerarşi Prosesi Yöntemi ile Değerlendirilmesi [10] | Sistem Hızı |
| | Erişim |
| | Ücret |
| | Çevresel Hassasiyet |
| | Kaza Olması Olasılığı |
| Kent İçi Raylı Ulaşım Performansını Değerlendirmede Swara ve Aras Yöntemleri ile Bir Model Önerisi [11] | Servis Sıklığı |
| | Toplam Hat Uzunluğu |
| | Filo |
| | Ortalama İstasyon Mesafesi |
| | İstasyon Sayısı |
| Quality Attributes of Public Transport That Attract Car Users: A Research Review [12] | Maksimum Yolcu Kapasitesi |
| | Servis Sıklığı |
| | Güvenirlilik |
| | Ücret |
| | Araç Yaşı |
| Evaluation of Public Transport Performance in the Jombang District [13] | Sistem Hızı |
| | Servis Sıklığı |
| | Yolculuk Süresi |
| | Araç Sayısı |
| | Kapasite |
| Evaluating Public Transit Benefits and Costs [14] | Hat Uzunluğu |
| | Zirve Saat Yolcusu |
| | Bakım Maliyeti |
| | İşletme Saati |
| | İşletme Frekansı |
| A Multiple Criteria Approach for the Evaluation of the Rail Transit Networks in Istanbul [21] | Araç İşletme Maliyeti |
| | Toplam Yolculuk Süresi |
| | Kaza Maliyeti |
| | Bakım İşletme Maliyeti |
| | İşletme Frekansı |
| An Integrated Decision Support Model for Evaluating Public Transport Quality [22] (Toplu Taşıma Sistemleri Üzerine) | Yolculuk Süresi |
| | Bekleme Süresi |
| | Konfor |
| | Sistem Hızı |
| | |

Kent içi raylı sistemler, ulaşım ile ilgili sorunların çözümünde önemli bir alternatif olsa da bu alternatifin sağladığı hizmetin performans açısından değerlendirilmesi, sistemin etkinliğinin ve verimliliğinin anlaşılması ihtiyacı zaman zaman ortaya çıkmaktadır. Bu gereklilik, sistemin hem hizmet sağlayıcı hem de tüketici üzerinde sosyal, ekonomik ve çevresel etkilerinin olması gerçeğine dayanmaktadır. Kent içi raylı sistemin çok boyutlu olması, söz konusu değerlendirme için çok kriterli problemleri çözebilecek tekniklerin kullanılmasını gerektirmektedir. Yapılan araştırmalar, toplu taşıma sistemleri için çok kriterli problemin çözümünü sağlayan tekniklerin hem planlama aşamasında hem de projenin performansının ölçülmesinde kullanılmasını araştırmacılara, uygulayıcılara ve karar vericilere fikir verebileceğini göstermektedir. Kent içi raylı sistem koridor planlama yaklaşımının çok kriterli karar verme yöntemleri ile geliştirilmesi, çalışması buna örnek olarak verilebilir [15] [25] [26]. Tabloda yer alan kriterler çalışma için temel referans noktalarının bir kümesidir. Metodoloji bölümünde bu kümede yer alan ve raylı sistemler bazında verisi elde edilebilen kriterler değerlendirilmiştir.

Görüldüğü üzere kent içi raylı sistemlerin performansını ortaya koyan hususlar birbirinden farklı sayısal birimlere yöneliktir. Frekans konusunda zaman odak noktası iken bakım maliyetinde ekonomik rakamlar, yolcu kapasitesinde ise yolcu sayısı birimi baz alınmaktadır. Bundan dolayı farklı birimleri karar vermede karşılaştırma yapmak için sayısal bir değere indirgeme kabiliyetine sahip metotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda literatürde olduğu şekliyle çok ölçütlü değerlendirme metotları bu çalışmada da kullanılmaktadır. Raylı sistemler günlük işletme aktivitelerinden dolayı örneğin her gün aynı miktarda yolcu taşınmamaktadır. Belirsiz yanları olan karar verme problemi çözümü için bu çalışmada Gri İlişkisel Analiz bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Uzman görüşü durumuna alternatif olarak Entropi yönteminin objektif kriter ağırlığı değerlendirebilmesi durumundan faydalanılmıştır. Çalışmada ideal olan raylı sistem durumu ile bir kıyas yapabilmek için ARAS yöntemi kullanılmıştır. Havayollarında kalite ölçme amaçlı kullanılan COPRAS yönteminin farklı bir ulaşım sektöründe nasıl bir tepki vereceğini görmek için ise deneysel bir kullanımı değerlendirilmiştir. Metodolojik çeşitlilikte genel olarak fazla yöntem kullanılması en iyi sistemin bulunmasının bir diğer sağlamasını yapmak içindir.

Çalışmanın literatüre katkısı ampirik perspektiftedir. Raylı sistemlerin değerlendirmesinde yatırımın yapılabilir olarak görülmesi açısından önemli bir yere sahip olan yolculuk sayısı değişkeninin haricinde hizmeti etkileyen diğer kriterlerinde hizmet için farklı düzeylerde önem arz ettiği durumu deneysel olarak test edilmektedir. Bunun haricinde daha önce raylı sistemler kapsamında değerlendirilmeyen çok ölçütlü karar verme teknikleri bir yenilik olarak bu çalışmada kullanılmaktadır. Bu noktada bir diğer yenilik olarak birçok ölçütlü değerlendirmenin sonuç değeri, farklı çok ölçütlü değerlendirme teknikleri bir araya getirilerek uzman görüşü – sayısal değerler – optimal durum arası sağlama yapmaya yarayan yeni bir yaklaşım sentezlenmektedir.

Tercihlerin ve tercihleri etkileyen faktörlerin analitik hiyerarşi süreç yöntemi ile değerlendirilmesi çalışması benzer çok ölçütlü değerlendirme örneklerindedir [16]. Türkiye'deki Kent İçi Raylı Sistemlerin Veri Zarf Analizi ile Performanslarının Karşılaştırılması buna örnek olarak verilebilecek diğer bir çalışmadır [17].

2. Metot

Bu çalışmada kent içi raylı sistemler üzerinde durulmasının en önemli nedenleri, ekonomik, sosyal, çevresel açıdan kent yaşamına çok boyutlu etkileri olmasıdır. Kent içi raylı ulaşım yatırımları halen modern çağda oldukça pahalı olduğundan, bunların izlenmesi, değerlendirilmesi ve kentsel yaşam kalitesine katkı sağlayıp sağlamadığının anlaşılması gerekmektedir. Bu sistemlerin dinamiklerini anlamak önemlidir çünkü modern dünyada kaynaklar tam anlamıyla sınırlıdır ve her geçen gün daha da azalmaktadır. Bu nedenle kentsel otoritelerin, kentsel ulaşım sistemlerine, özellikle de raylı sistem altyapısına sahip olanlara ilişkin önemli kavramları anlamaları gerekmektedir. Kent içi raylı sistemlerin dinamiklerini, bileşenlerini anlamak,

ölçüsünü kavramak ve değerlendirmek için çok ölçütlü yöntemler alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu yöntemler çok ölçütlü veya çok kriterli karar verme yöntemleri olarak bilinirler. Çok ölçütlü karar verme yöntemleri, problemin çok boyutlu olduğu durumlarda dikkate alınmakta ve literatürde, çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin problemlerin çözümünde etkili araçlar olduğu belirtilmektedir [17]. Bu çalışmada Ankara ve İstanbul'daki bazı kentsel raylı sistemlerin hizmet performansının çözümü için uygun çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin kullanılmasına odaklanılmıştır. Sistemlerin performanslarını farklı açılardan anlamak için Gri İlişkisel Analiz, Entropy, ARAS, COPRAS kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan çok ölçütlü karar verme yöntemine ait değerleri hesaplamak için kriterlerin ağırlıklarına ihtiyaç vardır. Bu çalışma için 3 farklı kriter ağırlığı yöntemi bulunmaktadır. Birincisi bu çalışmanın alan uzmanlarının görüşlerine bağlıdır. İkincisi, her kriterin eşit ağırlığa sahip olduğu şeklindedir ve üçüncüsü Entropi - uzman görüşünün sentezine dayalıdır. Sonuç olarak çalışmada, kriterlerin önemi literatürden faydalanılarak yorumlanmakta ve halihazırda İstanbul'da ve Ankara'da faaliyet gösteren mevcut raylı sistemlerin performans ölçümü yapılmaktadır.

Yöntemlerin kullanılabilmesi için halihazırda kent içi raylı ulaşım sistemi sektöründe çalışan mimar, mühendis, şehir plancısı gibi meslek insanlarına, bu konuyla ilgili bir kamu kurumunda görev yapan yöneticilere veya bu konuda akademik çalışmalar yapan akademisyenlere tekniklerin gerektirdiği kapsamda uygulama yapılarak ağırlıklar tespit edilmiştir. Söz konusu tespit yapılması için toplamda 15 uzmandan Tablo 2'de yer alan kriterler arasında toplam 100 puanı kendilerince önem verdiği düzeyde paylaşması gerektiği hususu belirtilmiş olup, yapılan paylaşımın akabinde elde edilen göreceli puan değerleri yöntemlerin gerektirdiği şekilde işleme alınmıştır.

Yöntemlere göre kriterlerin matematiksel prensibinin ifadesi şu şekildedir.

Tablo 2. Model Prensipleri [18]

| Gri İlişkisel Analiz | ARAS | COPRAS |
|---|--|---|
| $\Gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{0i}(j)$ | $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ | $d_{ij} = x_{ij} * w_j$ |
| Gri ilişkisel derecenin büyüklüğü hesaplanır. | Kriter ağırlıkları 0 ile 1 arasında olmalı, ağırlık toplamı bir olmalıdır. | Ağırlık değeri karar matrisi elemanları ile çarpılır. |
| OECD ülkeleri için refah ölçümü: Gri ilişkisel analiz uygulaması [23] çalışmasından Gri İlişkisel Analiz ve Entropi metodunun işlem detayı görülebilir. | Kent İçi Raylı Ulaşım Performansını Değerlendirmede Swara ve Aras Yöntemleri ile Bir Model Önerisi [11] çalışmasından ARAS metodunun işlem detayı görülebilir. | AHP temelli MULTIMOORA ve COPRAS yöntemi ile Türkiye Kömür İşletmeleri'nin performans değerlendirmesi çalışmasından [24] COPRAS metodunun işlem detayı görülebilir. |

Çalışma kapsamında, raylı sistemlerin performans kriterlerinin hangi düzeyde ve hangi önemde etki ettiği tespit edilmektedir. Kent içi raylı ulaşım sisteminin hizmet performans düzeyinin ne olduğu sorusuna cevap aranmaktadır. Bu soruların çok boyutlu yapısından dolayı anlaşılması ve kesin bir çözüm bulunması zordur. Kent içi raylı ulaşım, onu kullanan ve işleten kişiler açısından farklı bir perspektife sahiptir. Örneğin yolcular genellikle her yere olabildiğince hızlı, konforlu ve zamanında gitme eğilimindedirler. Ancak işletme açısından bu durumda kaynaklar sınırlı olduğundan zorluk yaşanabilir.

Bir şehrin her köşesine ulaşım için raylı sistemlerin olması kulağa hoş gelse de, işletme açısından bu sistemlerin yüksek performans seviyesinde tutulmasında zorluk yaşanabilir. Kent içi raylı sistem bileşenlerinin işletilmesinde hem kullanıcı hem işletici açısından optimal bir denge seviyesi olmalıdır, ancak bu eşik seviyeleri nasıl bilinebilir? Çok ölçütlü karar verme yöntemleri bu çalışmanın çözümü için uygundur. Birçok kritere sahip problemlerle çözülebilecek yöntemler, daha önceki çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da kullanılmıştır. Bu çalışmada kolaylık olması açısından kent içi raylı ulaşım sistemlerinin kodu ve özellikleri tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo 3. Hizmet Değerlendirme Kriterleri

| Kriter Kodu | Anlamı |
|-------------|---|
| A | Hat Uzunlukları (Metre) [10] |
| B | Filo Büyüklüğü (Araç Sayısı) [11] |
| C | Ortalama İstasyon Mesafesi (Metre) [11] |
| D | İstasyon Sayısı (Adet) [11] |
| E | Maksimum Yolcu Kapasitesi (Yolcu/Saat/Yön) [14] |
| F | Ortalama Sıklık (Dakika) [10,12,13,14] |
| G | Yolculuk Süresi (Dakika) [14] |
| H | Dizi Kapasitesi (kişi) [14] |

Tabloda görüldüğü üzere hizmet değerlendirme kriteri kümesi literatürden elde edilen belirli miktardaki kriterin oluşturduğu bir diğer alt kümedir. Raylı sistemler bazında bu kriterlere ait sayısal veriler temin edilebildiğinden çalışma bu kriterler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kriterlerin yanında kriterlerin referans noktalarına yer verilmektedir.

3. Bulgular

Tablolardan da görüleceği üzere çalışma kapsamında 5'i Ankara'dan, 9'u İstanbul'dan olmak üzere 14 farklı raylı sistem hattı bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan dört farklı çok ölçütlü karar verme yöntemi bulunmaktadır. Bunlar, Gri İlişkisel Analiz, Entropi, ARAS, COPRAS şeklinde sıralanabilir. Gri İlişkisel Analiz, problemin bulanık tarafı olduğunda etkilidir. Bu çalışmada kişilerden toplanan verilerde ancak gerçekte günlük aktivitelerden dolayı bazı farklılıklar olabilir. Örneğin yolculuk süresi 10 dakika gibi görünse de normal gün içerisinde bazı işletim hataları vb. nedenlerle değişiklik gösterebilir. Dolayısıyla bu kriterin mutlak değerini bulmak zordur.

Tablo 4. Çalışma Alanı Raylı Toplu Taşıma Hatları [19, 20]

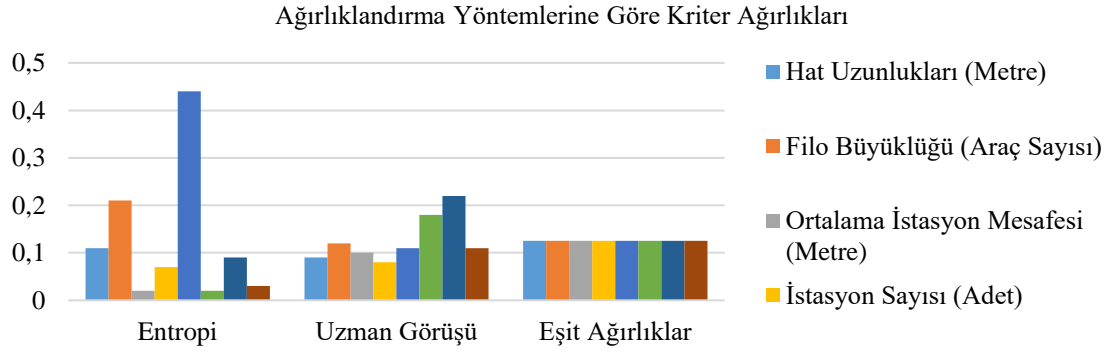
| Şehirler | Hat İsmi (Kod ile) | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----------|-------------------------------------|-------|-----|------|----|-------|-----|----|------|
| Ankara | AA1 Ankaray Aşti-Dikimevi | 8527 | 33 | 783 | 11 | 27000 | 10 | 18 | 924 |
| | AM1 Kızılay Batıkent Metrosu | 14661 | 108 | 1283 | 12 | 70000 | 8,3 | 20 | 1500 |
| | AM2 Kızılay Çayyolu Metrosu | 16590 | 275 | 1508 | 11 | 66000 | 8,3 | 25 | 1500 |
| | AM3 Batıkent Sincan Metrosu | 15629 | 264 | 1255 | 11 | 72000 | 8,3 | 22 | 1764 |
| | AM4 Keçiören Atatürk Kültür Merkezi | 9220 | 144 | 1024 | 9 | 66000 | 8,5 | 16 | 1500 |
| İstanbul | IM1A Yenikapı - Atatürk Havalimanı | 20032 | 105 | 1113 | 18 | 2367 | 6,4 | 35 | 1542 |

| | | | | | | | | |
|---|-------|-----|------|----|-------|-----|----|------|
| IM1B Yenikapı-Otogar-Atatürk Havalimanı ve Otogar-Kirazlı | 14741 | 105 | 1134 | 13 | 2381 | 6,4 | 25 | 1542 |
| IM2 Yenikapı-Seyrantepe-Hacıosman Metro Hattı | 23490 | 180 | 1468 | 16 | 2283 | 8,5 | 32 | 950 |
| IM3 Kirazlı-Başakşehir/Metrokent Metro Hattı | 16000 | 80 | 1778 | 9 | 70000 | 5 | 20 | 966 |
| IM4 Kadıköy Sabiha Gökçen Havalimanı | 33500 | 144 | 1457 | 23 | 70000 | 5 | 52 | 1032 |
| IM5 Üsküdar-Çekmeköy Metro Hattı | 20000 | 126 | 1250 | 16 | 603 | 6 | 32 | 1622 |
| IM6 Levent-Boğaziçi Ü./Hisarüstü Metro Hattı | 3300 | 12 | 825 | 4 | 128 | 7 | 7 | 950 |
| IM7 Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Hattı | 18000 | 80 | 1200 | 15 | 70000 | 6 | 32 | 2160 |
| IM9 Bahariye-Olimpiyat Metro Hattı | 6000 | 12 | 1200 | 5 | 5784 | 5 | 10 | 966 |

Gri İlişkisel Analiz esnektir ve belirsiz yanları olan bu tür sorunları çözebilir. Bu çalışmada Gri İlişkisel Analizin kullanılmasının nedenlerinden biri de bu husustan kaynaklanmaktadır. Entropi bu çalışmada kullanılan diğer bir yöntemdir. Entropi, objektif kriter ağırlıkları sağlayabilecek uygun bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Performans düzeyleirni anlamak için daha fazla perspektif elde etmek amacıyla, daha fazla alternatif ağırlık oluşturmak için de kullanılır. ARAS, bu çalışmada kullanılan diğer yöntem olup, ARAS için özellikle, alan uzmanlarının görüşlerinin, optimum alternatifin fayda fonksiyonu ile karşılaştırılabilmesi ve her alternatifin ideal alternatifle karşılaştırılmasını sağlaması açısından önemi büyüktür. COPRAS, kelimenin tam anlamıyla havayollarının hizmet performansını ölçmek için kullanılmaktadır [17]. Dolayısıyla farklı bir çalışma örneğinde bir yöntemin kullanılması bu alanda yeni bir deneyim olacaktır. Çalışmada çok ölçütlü karar verme senaryoları ve kriter ağırlıkları tabloda görüldüğü gibi kullanılmıştır.

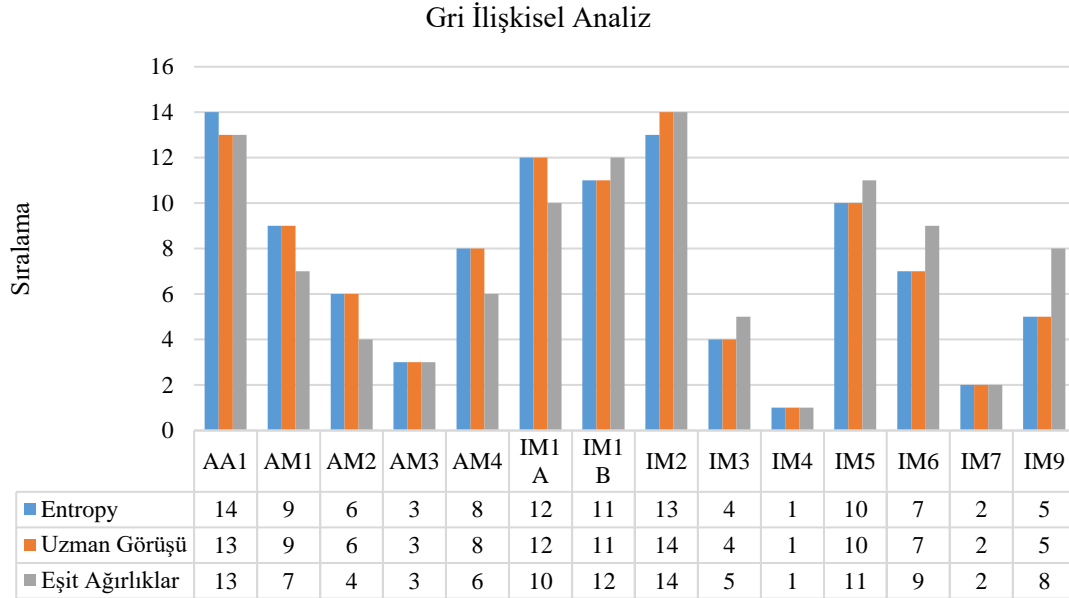
Tablo 5. Ağırlıklandırmanın Yöntemlere Göre Detayı [19,20].

| Çok Ölçütlü Karar Verme Metodu | Ağırlık Belirleme Metodu | | |
|--|--------------------------|--------------|-----------------|
| Gri İlişkisel Analiz | 1-Entropi | | |
| ARAS | 2-Uzman Görüşü | | |
| COPRAS | 3-Eşit Ağırlıklar | | |
| Kriterler | Ağırlıklar | | |
| | Entropi | Uzman Görüşü | Eşit Ağırlıklar |
| Hat Uzunlukları (Metre) | 0,11 | 0,09 | 0,125 |
| Filo Büyüklüğü (Araç Sayısı) | 0,21 | 0,12 | 0,125 |
| Ortalama İstasyon Mesafesi (Metre) | 0,02 | 0,10 | 0,125 |
| İstasyon Sayısı (Adet) | 0,07 | 0,08 | 0,125 |
| Maksimum Yolcu Kapasitesi (Yolcu-Saat – Yön) | 0,44 | 0,11 | 0,125 |
| Ortalama Sıklık (Dakika) | 0,02 | 0,18 | 0,125 |
| Yolculuk Süresi (Dakika) | 0,09 | 0,22 | 0,125 |
| Dizi Kapasitesi (kişi) | 0,03 | 0,11 | 0,125 |



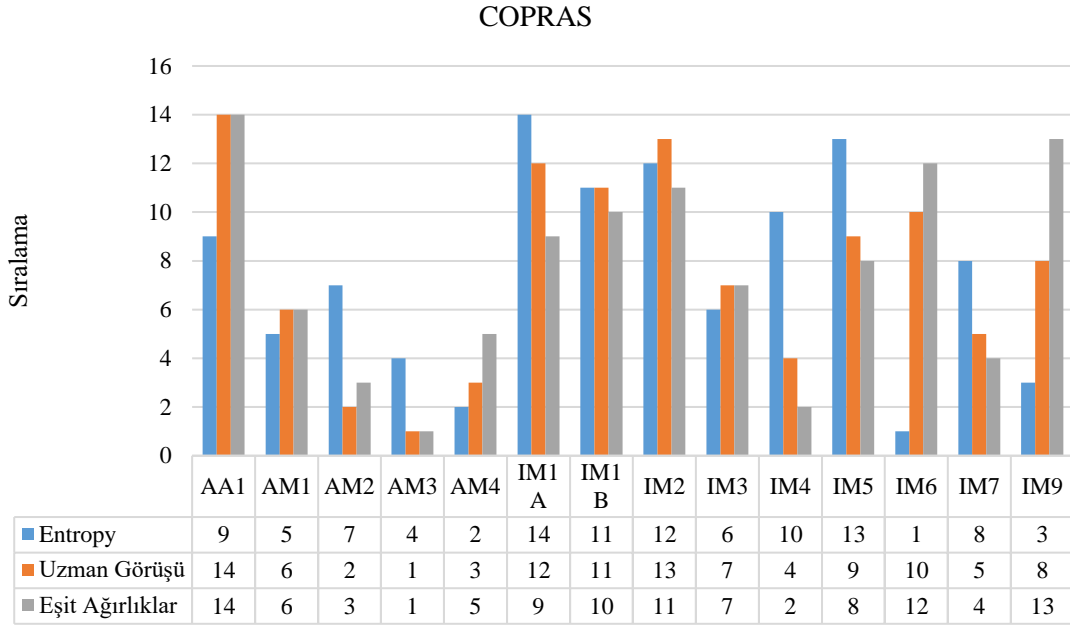
Şekil 1. Ağırlıklandırma yöntemlerine göre kriter ağırlıkları

Çok ölçütlü karar verme yöntemlerin kullanımından sonra her sıralamanın sonucu, aşağıda yer alan Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4’deki grafiklerde gösterildiği gibidir.



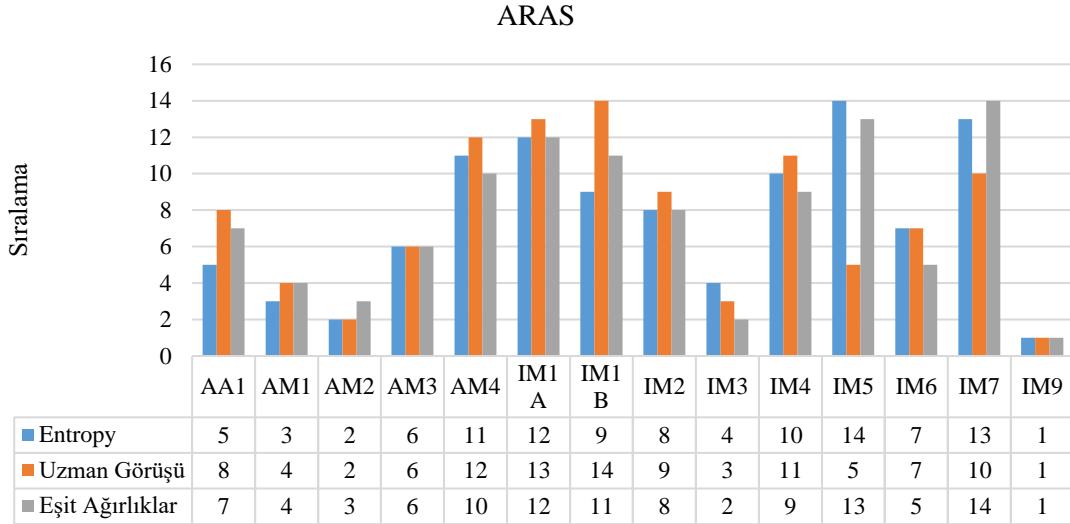
Şekil 2. Gri ilişkisel analiz çözümlemesi sonucu

Çalışmanın gri ilişkisel analiz metoduna göre gerçekleştirilen kısmında en gelişmiş sistemin IM4 kodlu metronun olduğu görülmektedir. Gelişmişlik açısından bu metroyu sırasıyla IM7 kodlu ve AM3 kodlu metrolar takip etmektedir.



Şekil 3. COPRAS çözümlemesi sonucu

Doğrudan verilen hizmetlerin kalitesinin değerlendirildiği bir yöntem olan COPRAS'a göre uzmanların görüşü kapsamında en iyi fayda sağlayan ve hizmet veren metro sistemlerinin Ankara'da işletildiği dikkat çekmektedir. İstanbul'da yer alan metrolar ise sıralamada daha sonraki pozisyonlarda yer almaktadır. Uzman görüşüne göre COPRAS metodu kapsamında en iyi hizmet veren ilk 3 metro Ankara'da yer almaktadır.



Şekil 4. ARAS çözümlemesi sonucu

ARAS metodunda alternatiflerin ideal çözüme göreceli uzaklıkları değerlendirilmektedir. Bu kapsamda her türlü değerlendirme şeklinde IM9 kodlu raylı sistem ideal sisteme en yakın çözüm önerisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun haricinde, uzman görüşüne göre değerlendirildiğinde, Ankara raylı sistemlerinin ortalamasının üstünde bir performans sergilediği görülmektedir. Özellikle IMA1-IMA2 raylı sistemleri her türlü senaryoda son sıralarda yer almaktadır.

Yukarıda belirtilen üç şekilden de anlaşılacağı üzere, Ankara'daki kent içi ulaşım hatları genel olarak tüm sistemler arasında en iyi performansa sahip ilk 5'te yer almakta olup bu bağlamda sorun yaşayan tek hat AA1 (Ankaray Hattı)'dır.

Tablo 6. Çözümleme Özetleri

| Sistemler | Gri İlişki Analizi | | | COPRAS | | | ARAS | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|---------|--------------|--------------|---------|--------------|--------------|
| | Entropi | Uzman Görüşü | Eşit Ağırlık | Entropi | Uzman Görüşü | Eşit Ağırlık | Entropi | Uzman Görüşü | Eşit Ağırlık |
| AA1 | 14 | 13 | 13 | 9 | 14 | 14 | 5 | 8 | 7 |
| AM1 | 9 | 9 | 7 | 5 | 6 | 6 | 3 | 4 | 4 |
| AM2 | 6 | 6 | 4 | 7 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| AM3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 6 | 6 | 6 |
| AM4 | 8 | 8 | 6 | 2 | 3 | 5 | 11 | 12 | 10 |
| IM1A | 12 | 12 | 10 | 14 | 12 | 9 | 12 | 13 | 12 |
| IM1B | 11 | 11 | 12 | 11 | 11 | 10 | 9 | 14 | 11 |
| IM2 | 13 | 14 | 14 | 12 | 13 | 11 | 8 | 9 | 8 |
| IM3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 4 | 3 | 2 |
| IM4 | 1 | 1 | 1 | 10 | 4 | 2 | 10 | 11 | 9 |
| IM5 | 10 | 10 | 11 | 13 | 9 | 8 | 14 | 5 | 13 |
| IM6 | 7 | 7 | 9 | 1 | 10 | 12 | 7 | 7 | 5 |
| IM7 | 2 | 2 | 2 | 8 | 5 | 4 | 13 | 10 | 14 |
| IM9 | 5 | 5 | 8 | 3 | 8 | 13 | 1 | 1 | 1 |

4. Sonuç

Bu çalışmada 3 farklı çok ölçütlü karar verme yaklaşımı kullanılmış olup, her yaklaşımın 3 farklı kriter ağırlığı yaklaşımı tespit edilmiştir. Bu çalışmada incelenen 14 farklı şehir içi ulaşım hattı bulunmaktadır. Entropinin kriter ağırlığı bağlamı sıralamasında en önemli üç kriter maksimum yolcu kapasitesi, filo büyüklüğü ve hat mesafesidir. Alan uzman görüşü kriterlerinin en önemli kriterleri sırasıyla yolculuk süresi, sıklığı, filo büyüklüğüdür. Hesaplama sonuçlarından da anlaşılacağı üzere genel olarak 1. ve 2. en iyi hatların İstanbul'da olduğu gözlemlenmektedir. Ancak genel olarak Ankara hatları bu çalışmada incelenen kent içi toplu taşıma hatları arasında her zaman en iyi performans gösteren ilk 5 hat arasında yer almıştır. Önceki çalışmalarda olduğu gibi Ankaray da en kötü performans sonuçlarına sahip olmuştur. Beklenmedik bir şekilde İstanbul hatlarının performansı daha düşük çıkmıştır.

Çalışmada birçok kriter unsuru tespit edilmiş olmasına rağmen sadece belirli miktarda kritere ilişkin veri bulunabilmesi çalışmanın önemli bir sınırlılığıdır. Bir diğer sınırlılık hususu ise çalışmaya yönelik çok fazla sayıda uzmana ulaşamamıştır.

Gelecek çalışmalarda daha çok sayıda şehir içi raylı sistemlere odaklanılabilir. Bu çalışmada sadece Ankara, İstanbul şehir içi toplu taşıma hatları ele alınmıştır. Ancak sonraki çalışmalar farklı türdeki kentsel raylı ulaşım sistemlerine ayrıca odaklanılabilir. Kent içi toplu ulaşımın tüm Türkiye'ye yayıldığı bir noktaya gelindiğinde şehir bazında bir kıyaslama ile şehir içi ulaşım planlaması perspektifinde, yaşam kalitesi tespit edilebilir. Günümüzde farklı çok ölçütlü değerlendirme çalışmaları da bulunmaktadır aynı veya benzer bir çalışma, daha fazla alan uzmanı görüşü alınarak tekrarlanabilir.

Çalışmada göreceli olarak daha düşük performansa sahip olan sistemlerin filo büyüklüğünü arttırması diğer kriterler açısından da olumlu sonuçlar alabilmek için en önemli gelişme sağlanması gereken alandır. Bunun haricinde yolculuk frekansı konusunu önemlidir. Genel olarak ifade edilebilir ki bu çalışmaya göre servis açısından en mükemmel sistem en hızlı olandır.

Bu çalışmada görülmektedir ki yatırımların yapılmasında ve hizmet performansı değerlendirmede önemli bir eşik ve kriter olan yolculuk sayısı kriteri performans değerlendirmede her zaman baş aktör olamamaktadır. Bu çalışmayla birlikte performans değerlendirme açısından başka kriterlerinde söz konusu kriteri geçebildiği görülebilmektedir. Bu yüzden bilinmelidir ki raylı sistem yatırımları çok boyutlu hizmetler olup performans değerlendirmesi yaparken tüm boyutlar bir arada değerlendirilmelidir. Bu çalışmada gelecek çalışmalar için değerlendirilebilecek birçok ölçüt olduğu yeni yapılacak çalışmalarda bu ölçütlerin değerlendirilebileceği açısından ışık tutulmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında uzman görüşü bildiren kişilere katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynakça

- [1] E. J. Miller, "Accessibility: Measurement and application in transportation planning." *Transport Reviews*, 38(5), 551-555, 2018
- [2] A. Colsaet, Y. Laurans, H. Levrel, "What drives land take and urban land expansion? A systematic review." *Land Use Policy*, 79, 339-349, 2018
- [3] A. Bokhari, F. Sharifi, "Public transport and subjective well-being in the just city: A scoping review." *Journal of Transport & Health*, 25, 101372, 2022
- [4] M. E. Angelaki, T. Karvounidis, C. Douligieris, "Mobile Applications and Projects for Sustainable Urban Public Transportation: a Selective Review." *In 24th Pan-Hellenic Conference on Informatics* pp. 156-161, (2020, November)
- [5] A. N. H. Ibrahim, M. N. Borhan, "The interrelationship between perceived quality, Perceived value and user satisfaction towards behavioral intention in public transportation: A review of the evidence." *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(5), 2048, 2020
- [6] C. J. Padron, "Valuation of Social Capital in Public Transportation and Sustainable Mobility in Venezuela A Systematic Review of the Literature." *Revista de Estudios Andaluces*, 238-240, 2021
- [7] A. N. H. Ibrahim, M. N. Borhan, A. Ismail, "Rail-based Public Transport Service Quality and User Satisfaction—A Literature Review." *Promet-Traffic&Transportation*, 32(3), 423-435, 2020
- [8] J. Zukowska, A. Gobis, P. Krajewski, A. Morawiak, R. Okraszewska, C. B. Woods, E. G. Bengoechea, "Which transport policies increase physical activity of the whole of society? A systematic review." *Journal of Transport & Health*, 27, 101488, 2022
- [9] H.G. Önder, F. Akdemir, "Ulaşım Modlarının Çeşitliliği Bağlamında Erişebilirlik Analizi: Ankara Metropolü İçin Yeni Bir Yaklaşım", *Kent Akademisi*, Volume, 14, Issue 1, Pages, 102-121, 2021
- [10] Ö.F. Görçün, "Kent İçi Ulaşım Sistemlerine İlişkin Tercihlerin ve Tercihlere Etki Eden Faktörlerin Analitik Hiyerarşi Prosesi Yöntemi İle Değerlendirilmesi", *Kent Akademisi*, 11 (33), Issue 1, 2018
- [11] R. Ertugut, N. Koç Ustalı, "Kent İçi Raylı Ulaşım Performansını Değerlendirmede SWARA ve ARAS Yöntemleri ile Bir Model Önerisi", *Verimlilik Dergisi*, (3), 35-53, 2021
- [12] L. Redman, M. Friman, T. Gärling, T. Hartig, "Quality attributes of public transport that attract car users: A research review." *Transport policy*, 25, 119-127, 2013

- [13] N. N. Hayati, A. Hasanuddin, R. M. Mubarak, "Evaluation Of Public Transport Performance in The Jombang District," *Presented At: The 16th International Symposium of Indonesian Inter University Transportation Studies Forum*, 2013
- [14] T. Litman, "Evaluating public transit benefits and costs". Victoria, BC, Canada: Victoria Transport Policy Institute, 2015
- [15] C. Kırılangoğlu, "Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Kent İçi Raylı Sistem Koridor Planlaması." *Coğrafya Dergisi*, (33), 53-71, 2016
- [16] G. Akman, A. Alkan, "Tedarik Zinciri Yönetiminde Bulanık AHP yöntemi kullanılarak tedarikçilerin performansının ölçülmesi: Otomotiv Yan Sanayiinde bir uygulama." *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(9), 23-46, 2006
- [17] Masoumi, M. ve Öcalır-Akünel, E. V. "Türkiye'deki kent içi raylı ulaşım sistemlerinin performanslarının Veri Zarflama Analizi ile karşılaştırılması." *Politeknik dergisi*, 21(4), 971-975, 2018
- [18] E. Ayçin, *Çok Kriterli Karar Verme Bilgisayar Uygulamalı Çözümler*, Nobel Yayınevi, Ankara, 2020
- [19] Ankara Metropolitan Municipality, General Directorate of EGO. "Technical Statistics of Rail Systems" 2022. [Çevrimiçi] Erişim: <https://www.ego.gov.tr/tr/sayfa/1075/rayli-sistem/> [Erişim: 4 Aralık 2022]
- [20] İstanbul Metropolitan Municipality, Metro İstanbul A.Ş. "Hatlarımız" 2022. [Çevrimiçi] Erişim: <https://www.metro.istanbul/> [Erişim: 4 Aralık 2022]
- [21] H. Gerçek, B. Karpak, T. Kılınçaslan, "A multiple criteria approach for the evaluation of the rail transit networks in Istanbul", *Transportation*, 31, 203-228, 2004
- [22] S. Moslem, A. Alkharabsheh, K. Ismael, ve S. Duleba, "An integrated decision support model for evaluating public transport quality." *Applied Sciences*, 10(12), 4158, 2020
- [23] H. Türe, "OECD ülkeleri için refah ölçümü: Gri ilişkisel analiz uygulaması." *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(2), 310-327, 2019
- [24] E. Aksoy, Ömürbek, N. ve Karaatlı, M. "AHP temelli MULTIMOORA ve COPRAS yöntemi ile Türkiye Kömür İşletmeleri'nin performans değerlendirilmesi". *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33(4), 1-28, 2015
- [25] F. Akdemir, "Yüksek Hızlı Demiryolu Yatırımlarının Bölgesel Kalkınma Etkisinin ARAS Yöntemiyle Değerlendirilmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 18, ss. 14-25, Temmuz 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1220471
- [26] H. Ulvi, B. H. Kutlu, F. Akdemir, "Gelişmekte Olan Ülkelerde Raylı Sistem Yatırım Kararlarını Etkileyen Ölçütlerin Belirlenmesi: AB ve Türkiye Özelinde Bir Araştırma", *Demiryolu Mühendisliği*, 2019(9):91-108

Özgeçmiş



Hatice Gül ÖNDER

1986 yılında doğmuştur. Lisans ve yüksek lisansını Selçuk Üniversitesi Şehir ve Bölge Planlama Bölümünde, doktorasını Gazi Üniversitesi Şehir ve Bölge Planlama Bölümünde tamamlamıştır. Doçentliğini 2022 tarihinde, Mimarlık, Planlama ve Tasarım alanında almıştır. Uzmanlık alanları: ulaşım planlaması, akıllı şehirler ve ulaşım sistemleri, gayrimenkul ve emlak yönetimi ve şehir planlamasıdır. Halen, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Tapu Kadastro Yüksekokulu, Emlak ve Emlak Yönetimi Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: gul.onder@hbv.edu.tr

**Furkan AKDEMİR**

1994 Yılında Ankara'da doğmuştur. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Şehir ve Bölge Planlama Bölümünde Doktora eğitimine devam etmektedir. Ankara Büyükşehir Belediyesi EGO Genel Müdürlüğü Ulaşım Planlama ve Raylı Sistem Dairesi Başkanlığında Yüksek Şehir Plancısı olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları, ulaşım planlama, kent içi raylı sistemler ve ulaşım modellemesidir.

E-Posta: furkan.akdemir@ego.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Furkan AKDEMİR: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Görselleştirme, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Hatice Gül ÖNDER: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Kontrol.



R350HT Ray Termit Kaynağı Kusur Oluşumunun Araştırılması

Adem ARI^{*1}, Bilge DEMİR², Attila KESKİN³

¹ Ankara Bilim Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü Bölümü, Ankara, Türkiye

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

³ TCDD Datem İşletme Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

*adem.ari@ankarabilim.edu.tr

(Alınış/Received: 15.11.2023, Kabul/Accepted: 29.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Çalışmamızda kullanılan R350HT mantarı sertleştirilmiş 60E1 profil 120 cm uzunluğundaki raylara Sow5 termit kitleriyle yapılan kaynağa uygulanan eğme testleri başarılı olduğu için diğer testlere geçilmiş, Skv elite yöntemiyle yapılan kaynaklar eğme testinden geçemediği için bu yöntemle yapılan kaynaklar başarısız sayılmış, diğer testler uygulanmamıştır. Kırılan kaynaklı raylar üzerinde birtakım testler uygulanıp, daha önceki yapılan çalışmalardan da faydalanarak kırılmaya yol açan kusurların oluşumuna neden olan parametreler hakkındaki gri alanlar netleştirilmek amacıyla araştırılmıştır. Alüminotermite kaynak parametrelerinin kaynak kusurunun üzerindeki etkisini incelemek için, daha önce geliştirilmiş kaynak kusuru oluşum şeması, bir dizi ısı transferi simülasyonundan oluşan bir ısı transfer modeli kullanılmıştır. Ray termit kaynak uygulamaları için, büzülme boşluğu oluşumunun önüne geçilebileceği ancak nüfuziyet azlığı (soğuk bindirme) ve merkez hattı kusurlarının meydana gelme olasılığının yüksek olduğu kanaatine varılmıştır. Bu çalışmayla ön ısıtma süresinin veya sıvı sıcaklığının artırılmasının, soğuk bindirme ve merkez hattı kusurlarının gelişimini baskımlarken aynı zamanda ray mantarında yan etki olarak mikro gözeneklilik kusuruna yol açma ihtimalini artırma eğiliminde olduğu görülmüştür. Farklı bir yaklaşımla, ön ısıtma süresini veya sıvı sıcaklığını arttırmak yerine, standartlarda belirtilen 25 mm'lik kaynak aralığının artırılmasıyla (35-38mm) aynı etkinin elde edilebileceği bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: R350HT alüminotermite kaynağı, Mikro yapı, Termit kusurları, Mikro gözeneklilik

Investigation of R350HT Rail Termite Welding Defect Formation

Abstract: Since the bending tests applied to the welds made with Sow5 termite kits on the R350HT head hardened 60E1 profile 120 cm long rails used in our study were successful, other tests were started. Since the welds made with Skv elite method failed the bending test, the welds made with this method were considered unsuccessful and other tests were not applied. A number of tests were performed on the broken welded rails and the gray areas about the parameters that cause the formation of defects leading to fracture were investigated in order to clarify the gray areas by making use of previous studies. A previously developed weld defect formation scheme, a heat transfer model consisting of a series of heat transfer simulations, was used to study the influence of the aluminotermite welding parameters on the weld defect. It was concluded that for rail termite welding applications, shrinkage cavity formation can be avoided, but the probability of occurrence of under penetration (cold lap) and centerline defects is high. This study showed that increasing the preheating time or liquid temperature tends to suppress the development of cold lap and centerline defects, while at the same time increasing the probability of causing microporosity defects in the rail head as a side effect. With a different approach, it has been found that the same effect can be achieved by increasing the welding spacing of 25 mm specified in the standards (35-38mm), instead of increasing the preheating time or liquid temperature.

Key words: R350HT aluminotermite welding, Microstructure, Termite defects, Micro cleanliness

Atıf için/Cite as: A. Arı, B. Demir, A. Keskin, "R350HT ray termit kaynağı kusur oluşumunun araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 197-213, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1391129

1. Giriş

Termit kaynağı, metal oksit tozu ile alüminyum tozu arasında oluşan alüminotermik reaksiyon sonucu, ergitilen metalin kaynak edilecek parçaların alın yüzeylerine dökülerek birleştirilmesini sağlayan bir döküm ergitme esaslı kaynak yöntemidir. Yıllar yılı termit kaynaklarının kalitesini artırmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda esas olarak alaşım sertleştirmesine [1], kaynak sonrası meydana gelen ısıl işlemlere [2, 3], kaynak sırasında uygulanan prosedürlere [4-6] ve kaynak sonrasında oluşan kaynağın uç geometrisine [7, 8] odaklanılmıştır. Alüminotermik kaynaklarının yorulma performansına etki eden gözenekliliğin rolünü araştırmak için birkaç çalışma da yapılmıştır [9, 10]. Kaynak kusurlarının termit ray kaynaklarının servis performansını kontrol ettiği bilinen bir gerçek olmasına rağmen, termit kaynak kusurlarının oluşum mekanizmalarını anlamak içinde çok az araştırma yapılmıştır. Termit kaynaklarında kaynak parametrelerinin kaynak hatası gelişimi üzerindeki etkisine ilişkin daha önce ülkemizde yapılmış Türkçe bir araştırma bulunmamaktadır [11]. Yurt dışında ise yok denecek kadar azdır. Bu makalenin amacı, termit kaynaklarını ve ayrı bir makalede tanıtılan bir ısı transferi modelini kullanarak, kaynak kusur oluşumu ile termit kaynağının mevcut termal şartları arasındaki korelasyonları kurmaktır [12]. Kaynak parametrelerinin etkisinin genel olarak anlaşılmasını sağlamak için bu çalışmanın sonuçları, kaynak parametrelerinin seçimine rehberlik etmek amacıyla kusur oluşum aşamaları şeklinde özetlenmiştir.

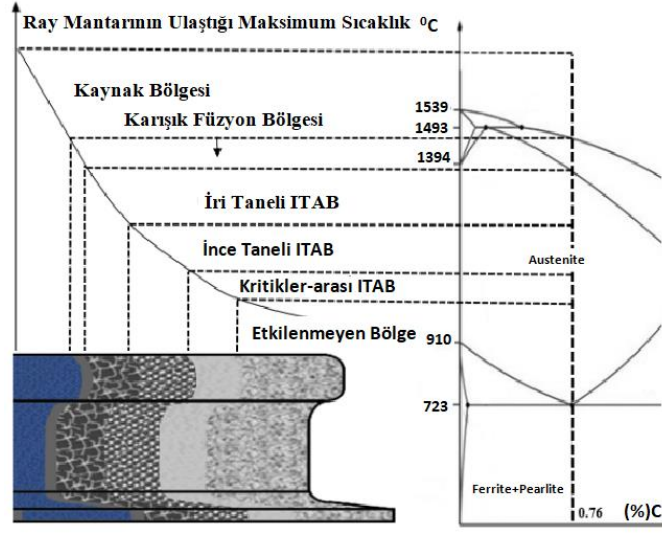
2. Kaynak Parametrelerinin Kusur Oluşumu Üzerindeki Etkisi

Yerel gerilimin artması ve dolayısıyla kaynak yorulma ömrünün azalmasıyla kaynak kusurları, kaynak yorulma ömrü üzerinde benzer bir etkiye sahip olsa da kaynak sırasındaki meydana geliş nedenleri oldukça farklı olabilir. Bazı kaynak kusurları, termit kaynak metalindeki cüruf gibi yabancı cisimlerden veya kaynak kalıbı ile ray yüzeyi arasındaki uygun olmayan eşleşmeden kaynaklanır. Bu kaynak hataları kaynak sırasındaki termal koşullara bağlı değildir ve bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Schroeder ve Poirier [4], Cyre [7] ve Ross [8] tarafından yapılan önceki araştırmalar bu kusurların oluşumu hakkında fikir vermektedir. Bu makale, oluşum mekanizmaları güçlü bir termal temellere sahip olan dört kaynak kusuru olan;

1. Yetersiz nüfuziyet (Soğuk bindirme)
2. Büzülme boşluğu
3. Kaçık merkez hattı kusur kümesi
4. Mikro gözeneklilik ve porozite 'ye

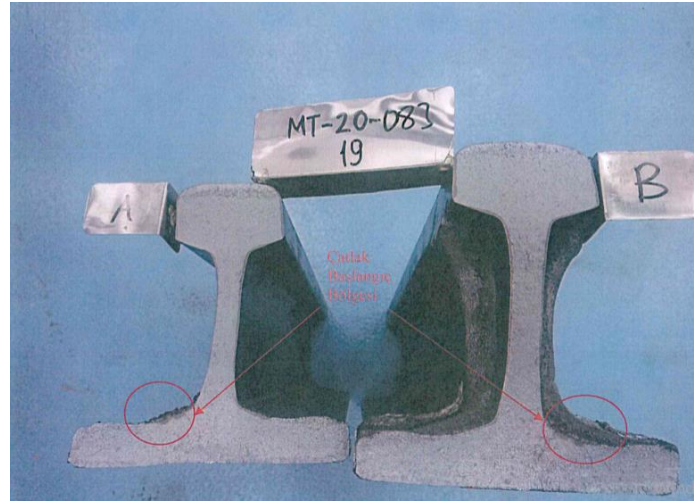
yoğunlaşmaktadır. Hem simüle edilen termit kaynakları hem de termal analizler kullanılarak bu kaynak kusurlarının oluşum koşulları belirlenecek ve kaynak parametrelerinin oluşumuna ne derece etkisi olduğu analiz edilecektir.

Nüfuziyet azlığı çoğunlukla ray tabanındaki kaynak uçlarında bulunabilir ve kaynak metali ile ray uçlarının yüzeyi arasındaki yetersiz erimeden kaynaklanır. Erimiş kaynak metali malzemesi, kalıbın üzerindeki potada yaklaşık 2050°C'lik bir sıcaklığa sahiptir, ancak kalıbın kanallarından aşağıya ve daha sonra kaynak aralığına doğru akarken hala akışkan haldeyken bir yandan da soğumaya devam eder. Şekil 1 [13], demir-karbon faz diyagramı ile birleştirilmiş bir termit kaynaklı rayın simetrik olan iki parçasından biri olan sağ taraftaki ana bölgeleri şematik olarak göstermektedir. Soğuk bindirme kusurunun olası ciddi sonucu, yorulma döngüsüne tabi tutulmuş bir termit kaynağındaki soğuk bindirme kusurunun sebep olduğu yorulma mikro çatlağından kaynaklanmaktadır. Kaynak kalıbı ile ray yüzeyi arasındaki uygun olmayan eşleşmenin neden olduğu yetersiz kaynaşmanın aksine, kaynak kalıbının ray yüzeyine uygun şekilde takıldığı yerlerde bile soğuk bindirme kusurları meydana gelebilir. Katılma sırasında soğuk bindirme kusuru daha net olarak belirginleşir.



Şekil 1. Demir-karbon faz diyagramı ile birleştirilmiş bir termit kaynağının ana bölgeleri

Termit kaynak düzeninin yandan görünümü, ray ucunun kalıp bileziğinin ötesine geçtiğini ve kaynak kalıbının içine doğru çıktığını göstermektedir. Ray ucunun bu kısmına 'çıkıntı' adı verilir ve kaynak boşluğuna sıvı çelik verildiğinde erimiş metale maruz kalır. Şekil 2'de 5.000.000 çevrim uygulanan ve 2.088.826 çevrimde soğuk bindirme kusurunun sebep olduğu çatlak nedeniyle kırılmış termit kaynaklı ray görülmektedir.



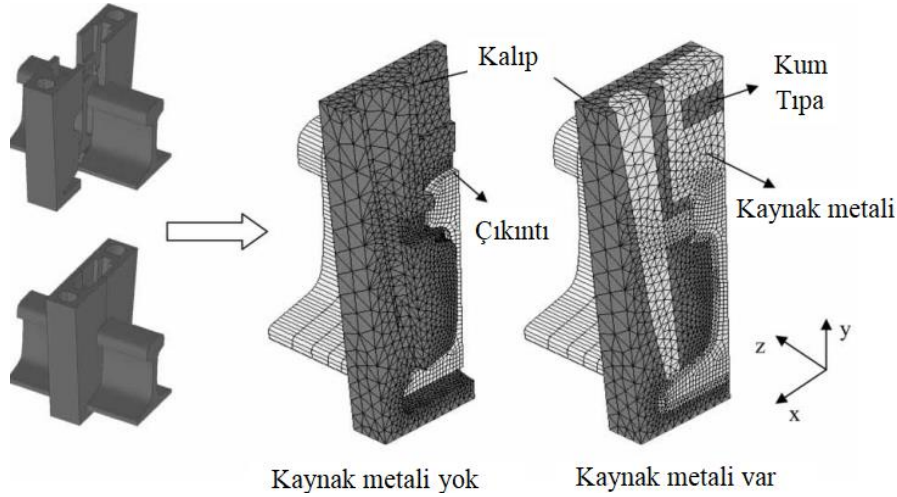
Şekil 2. Ray tabanındaki soğuk bindirme kusuru ve bunun neden olduğu çatlak başlangıcı

Sıvı metalle karşılaştıktan sonra belirli bir hacimdeki ray ucu erir ve katı-sıvı ara yüzü rayın içine doğru en sıcak bölge olan orta kısımdan hareket eder. Sıvı metalin nüfuz ettiği ray ucunun derinliği 'geri erime' olarak tanımlanır. Geri erime derinliği dışarı çıkma derinliğinden daha küçükse, ray tabanının altında küçük üçgen şekilli bir sıvı metal oluşur. Sıvı metalin bu kısmı güçlü kalıp soğutmasına maruz kalır ve ısı gradyanının yönü esas olarak kaynak metalinden kalıba doğrudur. Böylece sıvı metalin çıkıntılı yüzeye nüfuzu düşen ısı nedeniyle minimum düzeyde olur ve kaynak ucu alanı döküldükten sonra hızla katılaşır. Çıkıntı yüzeyinde herhangi bir katılaşma varsa, yetersiz bir kaynaşma yani soğuk bindirme meydana gelebilir. Buna karşılık, eğer geri erime dışarı çıkmadan daha derinse, ısı gradyanının yönü esas olarak rayın merkezinden raya doğru olacağı için yetersiz füzyon meydana gelmez. Bu mekanizmaya dayanarak, geri erime derinliği, yetersiz nüfuziyet oluşumunun olasılığını karakterize etmek için bir parametre olarak kullanılabilir. Soğuk bindirme oluşması için varsayılan koşul, düşen sıvı sıcaklığının neden

olduğu geri erime derinliğinin dışarı çıkma derinliğinden daha az olduğu durumlarda gerçekleştiği şeklindedir.

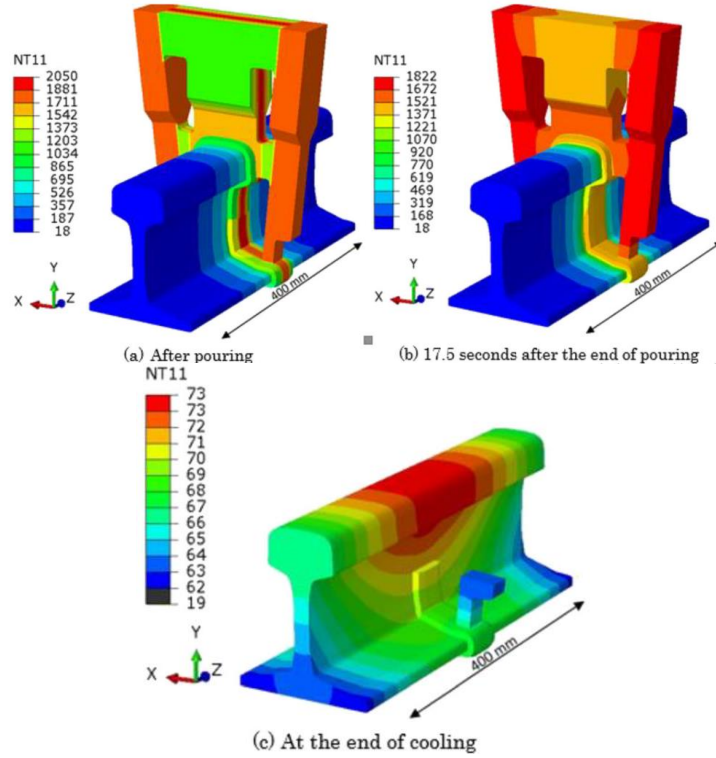
3. Kaynak Koşullarının Nüfuziyet Azlığı Oluşumu Üzerindeki Etkisi

Uzunlamasına ve enine merkezi düzlemlerdeki ayna simetrisi nedeniyle, Şekil 3'te görüldüğü gibi kaynağın yalnızca dörtte birinin modellenmesi yeterli olmuştur [12]. Modelde simüle edilen kaynak metal miktarı, kaynak boşluğunun hacmidir. Isı transfer modelinin geometrisi, SkV standart termit kaynağına ve R350HT 60E1 profil raya dayanmaktadır. Isı transferi simülasyonları için ray çeliği (7,87 g/cm³) ve kum kalıbı (1,6 g/cm³) için sabit yoğunluklar varsayılmıştır. Bu çalışmada 25, 38 ve 50 mm olmak üzere üç kaynak aralığı boyutu kullanılmıştır. Kaynak kalıbı genişliği, 25 mm kaynak aralığı için 39,4 mm, 38 mm kaynak aralığı için 52,1 mm ve 50 mm kaynak aralığı için 64,8 mm'dir. Dökümden ray mantarı yüzeyinin 10 mm altındaki kaynak merkezinin katılaşmasına kadar geçen süre olarak tanımlanan katılaşma süresi, söz konusu termit kaynağında termal koşulların gelişme hızının bir göstergesidir.



Şekil 3. Simülasyonlarda kullanılan kaynak metelli ve kaynak metalsiz model

Referans [12]'deki laboratuvar termit kaynaklarından elde edilen ortalama ısı girişi profili, ön ısıtma aşaması sırasında ray ucuna uygulanmıştır. En yüksek sıvı sıcaklığı her zaman ray mantarında, en düşük sıvı sıcaklığı ise ray tabanında bulunmuştur. Ray tabanındaki daha düşük sıvı sıcaklığı, besleme yolu boyunca sıvı metal ile kalıp duvarı arasındaki ısı alışverişine bağlanabilir. Sonuç olarak sıvı metalde dökme sonrasında ray tabanından ray mantarına doğru artan bir sıcaklık gradyanı oluşur. Şekil 4'te gösterilen bu simülasyon seti için ön ısıtmanın sonu ile katılaşmanın başlangıcı arasındaki süre olan 60 saniyelik bir işlem süresi ve kaynak havuzunda homojen bir sıvı sıcaklığı dağılımı varsayılmıştır [14]. Bu simülasyonlarda incelenen kaynak parametreleri ve bunların aralıkları Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 4. (a) Döküm başladığında hesaplanan sıcaklık dağılımı, (b) dökümden 17,5 saniye sonra ve (c) dökümden birkaç dakika sonra

Ray taban yüzeyinin 1 mm altındaki katılaşma izotermi farklı zamanlarda çizilmiştir. Orijinal ray ucundan en uzaktaki izotermal hat, füzyon hattı olarak kabul edilmiştir. Geri erime derinliği (d), füzyon hattından orijinal ray ucuna kadar ölçülmüş ve bu dışarı çıkma derinliği, soğuk bindirme oluşumunu önlemek için kritik geri erime derinliği (d_c) olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1. Soğuk bindirme oluşumu için dikkate alınan kaynak parametreleri

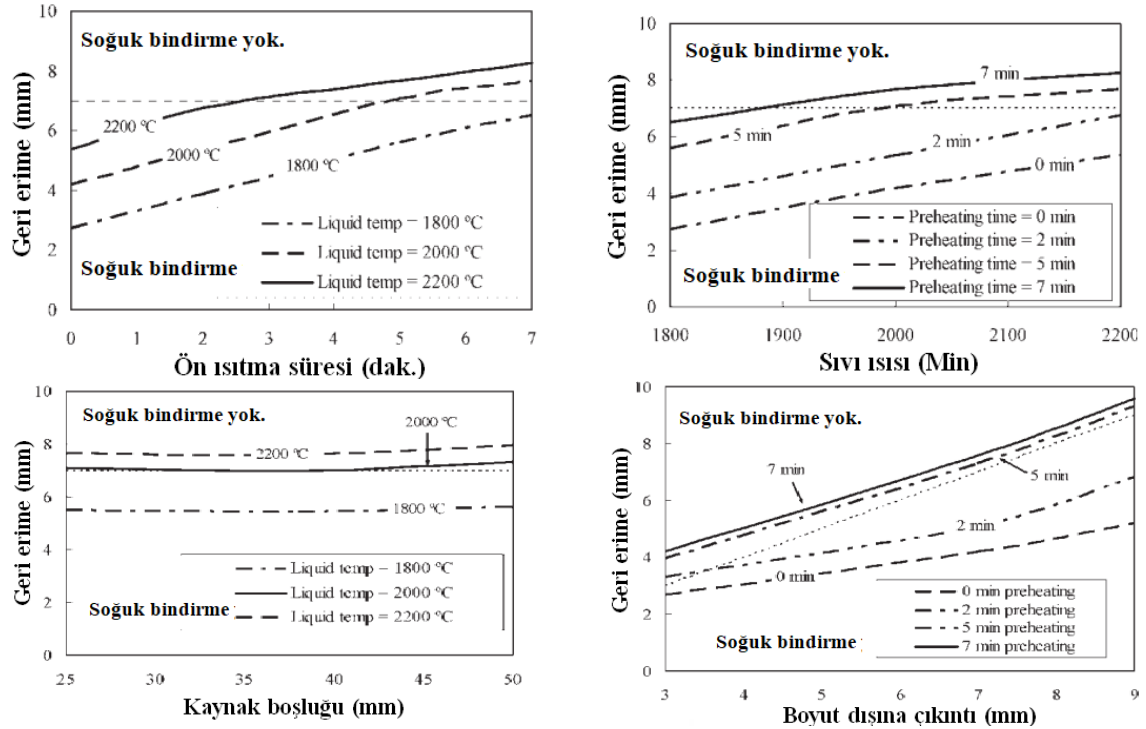
| Kaynak Parametreleri | Aralık |
|------------------------|-----------|
| Sıvı sıcaklığı (0C) | 1800–2200 |
| Ön ısıtma süresi (dak) | 0–7 |
| Kaynak aralığı (mm) | 25–50 |
| Çıkıntı mesafesi (mm) | 3–9 |

3.1. Ön ısıtma süresi ve sıvı sıcaklığının etkisi

Şekil 5a, 25 mm kaynak aralığı ve 7 mm çıkıntı için simülasyon sonuçlarını göstermektedir. d_c'nin kritik değeri şekilde yatay kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bu çizginin üzerinde, sıvı sıcaklığı soğuk bindirme oluşumunu önleyecektir. Bunun altında bir ısıda yetersiz nüfuziyet oluşması muhtemeldir. Şekil 5a'da, ön ısıtma süresindeki artışla birlikte geri erime derinliğinin arttığı görülebilmektedir. 2200⁰C ve 2000⁰C sıvı sıcaklıkları için kritik ön ısıtma süreleri sırasıyla 2,5 ve 4,7 dakikadır. 1800⁰C sıvı sıcaklığı için kritik ön ısıtma süresi 7 dakikanın üzerindedir. Benzer şekilde, sıvı sıcaklığındaki bir artış aynı zamanda ray taban ucunun erimesini de artırabilir ve dolayısıyla soğuk bindirme oluşumu olasılığını azaltabilir. Şekil 5a, eğer sıvı sıcaklığı arttırılırsa, yeterli bir geri erime sağlamak için daha kısa bir ön ısıtma süresine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Şekil 5b ayrıca sıvı sıcaklığının kritik değerlerini göstermektedir. 5 ve 7 dakikalık ön ısıtma için sıvı sıcaklıklarına ilişkin minimum gereksinimler sırasıyla 1980⁰C ve 1880⁰C'dir. 0-2 dakikalık ön ısıtma için minimum sıvı sıcaklıkları 2200⁰C'den büyük olmalıdır.

3.2. Kaynak aralığının fazla çıkıntı oluşumuna etkisi

Geri erime derinliği kaynak aralığı genişliğine göre önemli ölçüde değişmez. Şekil 5c'de geri erime derinliğinin kaynak aralığına göre değişimi minimum düzeydedir. Yalnızca yüksek sıvı sıcaklığı için ray ucundaki erimede hafif bir artış görülebilir. Geri erimenin kaynak aralığına olan bu oldukça zayıf bağımlılığı, erimiş ray ucunun gizli ısı emiliminden kaynaklanmaktadır. Erime bölgesinin konumu, erime bölgesine giren ve çıkan ısı transferi arasındaki denge ile belirlenir. Kısa bir süre içinde daha geniş bir kaynak aralığı raydaki sıcaklık gradyanını önemli ölçüde değiştiremez.



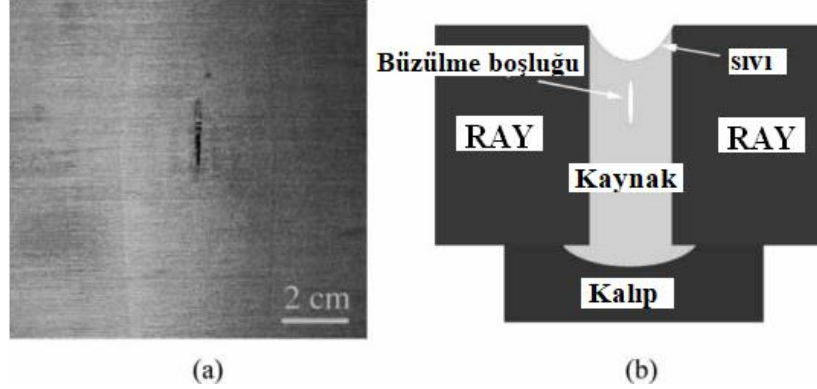
Şekil 5. Kaynak parametrelerinin geri erime derinliği (a) ön ısıtma süresi, (b) sıvı sıcaklığı, (c) kaynak aralığı ve (d) çıkıntı boyutu, üzerindeki etkisi

Bu nedenle kaynak aralığının soğuk bindirme oluşumu üzerinde zayıf bir etkisi vardır. Kaynak aralığının yanı sıra termit kaynağı sırasında değiştirilebilecek bir diğer geometrik parametre de çıkıntıdır. Dışarıya çıkıntının artırılmasıyla daha fazla ray yüzeyi alanı sıvı metale maruz kalır; bu nedenle geri erime derinliği artar. Ancak geri erime derinliğindeki (d) bu artış, soğuk bindirme oluşumunu engellemez çünkü kritik geri erime derinliği (d_c) de artar. Şekil 5d, dışarıya çıkıntı ile d_c artış oranının d 'yi aştığını göstermektedir. Bu, çıkıntı boyutunun artırılmasıyla üretilen daha büyük geri erime derinliğinin, soğuk bindirme oluşumunu hiçbir şekilde engellemediği anlamına gelir. Tersine, daha küçük bir çıkıntı, yetersiz nüfuziyet den kaçınmak için daha uygundur. Dışarıya çıkıntı boyutunun azaltılmasıyla, soğuma oluşumunu önlemek için hem ön ısıtma süresi hem de sıvı sıcaklığına ilişkin minimum gereksinimler büyük ölçüde azaltılabilir.

4. Büzülme Boşluğu Oluşum Aşamaları

Büzülme boşluğu başka bir ciddi kaynak kusurudur ve sıklıkla termit kaynaklarının ray boyun bölgesinde bulunur. Şekil 6, ray boyun alanında bir büzülme boşluğunu ve onun oluşum mekanizmasını göstermektedir. Isıl genişleme ve faz dönüşümleri nedeniyle kaynak metalinin hacmi soğuma sırasında sürekli değişir. Sıvı metalin termal genişleme katsayısı katı metalinkinden

önemli ölçüde yüksektir. Bu nedenle, soğuma sırasında kaynak metalinin hacim azalması, yüksek sıcaklık bölgesinde, düşük sıcaklık bölgesine göre daha fazladır. Katılma noktasında mikro yapı değişikliği nedeniyle kaynak metalinde küçük bir ek hacim daralması da meydana gelir. Hem faz dönüşümünün hem de sıcaklığın azalmasının neden olduğu hacim küçülmesi, kaynak metali içinde bir büzülme kuvvetine yol açar. Katılmanın son aşamasında, Şekil 6b’de görüldüğü gibi sıvı metalin etrafı zaten katılmış malzeme ile çevrelenirse, hacim azalmasını telafi etmek için bu bölgeye hiçbir ilave sıvı akmayacaktır.



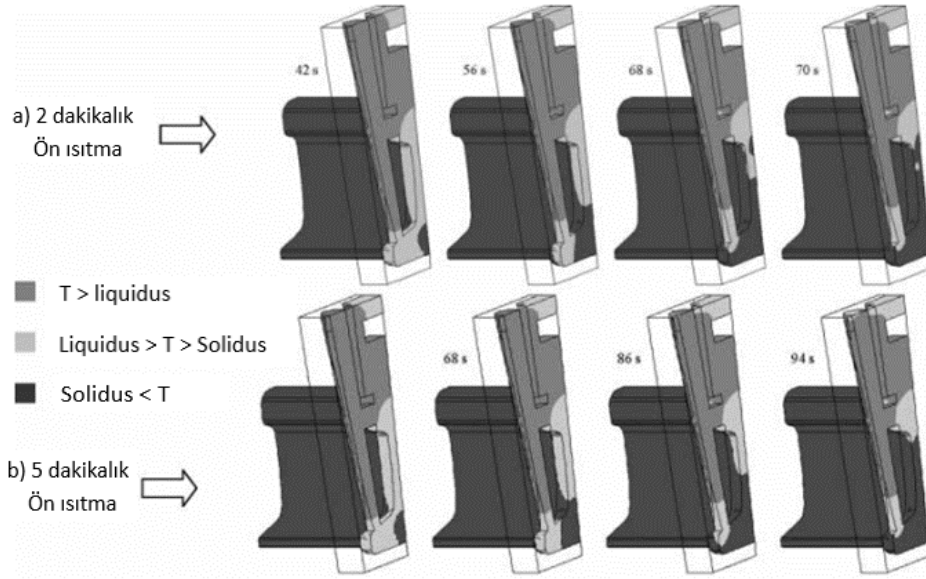
Şekil 6. (a) R350HT termit kaynağının ray ayağındaki büzülme boşluğu ve (b) büzülme boşluğu oluşumunun şematik gösterimi

Sonuç olarak, çekme kuvveti kaynakta bir büzülme boşluğunun oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, katılmanın son aşamasında izole edilmiş bir sıvı bölgesinin gelişimi, büzülme boşluğu oluşumu için kritik koşuldur.

Üç kaynak parametresinin etkisini incelemek için bir dizi termal simülasyon gerçekleştirilmiştir:

4. Ön ısıtma süresi,
5. Ortalama sıvı sıcaklığı ve
6. Kaynak aralığı.

Bu simülasyonlarda, çıkıntı boyutu 7 mm olarak sabitlenmiş ve yukarı doğru sıvı sıcaklığı profilleri, ray tabanından ray mantarına doğru sıvı sıcaklığı artışı olduğu varsayılmıştır. Diğer tüm kaynak parametreleri bölüm 2,1’de belirtilenlerle aynıdır. Katılma sırasında ray boyun bölgesinde izole edilmiş bir sıvı bölgesinin varlığı, bir büzülme boşluğunun oluşup oluşmayacağını belirlemek için kullanılmıştır. Şekil 7, 2050⁰C’de aynı ortalama sıvı sıcaklığına ve 25 mm kaynak aralığına sahip iki simülasyonu göstermektedir; sadece ön ısıtma süresi farklıdır. Kaynak metalinde üç sıcaklık bölgesi ($T < \text{katılma}$, $\text{katılma} < T < \text{sıvılaştırma}$, $T > \text{sıvılaştırma}$) farklı tonlarla ayırt edilir. Katılma sırasında katı-sıvı ara yüzü ray ucundan kaynak merkezine ve ray tabanından ray mantarına doğru hareket eder. Sıvı izotermal yüzeyi kaynak bölümünden ilk önce geçer, katılma izotermal yüzeyi ise geride kalır. Şekil 7’ a için ön ısıtma süresi 2 dakikadır. Sağlam yüzey kaynak kesitini geçtiğinde ray boynunda hafif gölgeli nokta olarak görülen izole edilmiş bir sıvı bölgesi belirir.



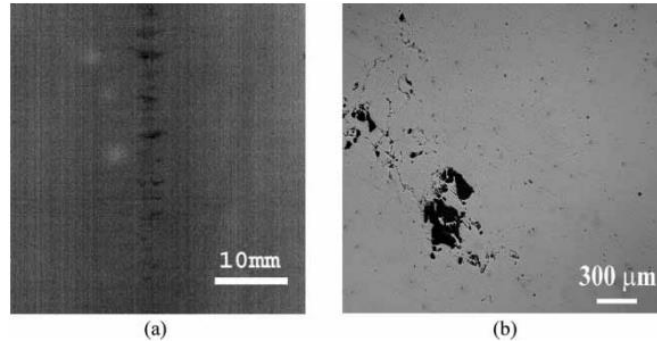
Şekil 7. Ön ısıtma süresinin büzülme boşluğu oluşumu üzerindeki etkisi (ortalama sıvı sıcaklığı = 2050°C, kaynak aralığı = 25 mm)

Ray boynunda izole edilmiş sıvı bölgesi (hafif gölgeli nokta) görünür. Ön ısıtma süresi Şekil 7b'deki gibi 5 dakikaya çıkarılırsa, simülasyon sonucunda izole edilen sıvı bölge kaybolur. Bu karşılaştırma, ön ısıtma süresindeki artışın termit kaynaklarında büzülme boşluğunun gelişmesini engellemeye yardımcı olduğunu göstermektedir. Benzer simülasyonlar 1900°C ila 2150°C arasındaki farklı sıvı sıcaklıklarında gerçekleştirilirken diğer tüm kaynak parametreleri sabit tutulmuştur. Sonuçlar, 1900°C den daha düşük sıvı sıcaklığının sıvı besleme yolunun çok daha çabuk kapanmasına neden olduğunu ve 5 dakikalık ön ısıtma süresi durumunda izole bir sıvı bölgesinin ortaya çıktığını göstermektedir. Ancak 2150°C den daha yüksek bir sıvı sıcaklığı için, ön ısıtma yapılsa bile izole edilmiş bir sıvı bölgesi bulunmaz. Dolayısıyla sıvı sıcaklığının artırılması büzülme boşluğu oluşumunun önlenmesine de yardımcı olabilir. Kaynak aralığının izole bir sıvı bölgesinin oluşumu üzerindeki etkisi sıvı sıcaklığına benzerdir. 38 veya 50 mm den daha büyük bir kaynak aralığı ile 2050°C sıvı sıcaklığına yönelik simülasyonlarda izole edilmiş sıvı bölgesi bulunmaz ve ön ısıtma yapılmaz. 1900°C sıvı sıcaklığı ile yapılan simülasyonlarda, kaynak aralığı 38 mm ise izole bir sıvı bölgesi mevcut olup, kaynak aralığı 50 mm'ye çıkarıldığında kaybolmaktadır. Daha büyük bir kaynak aralığının, büzülme boşluğunun gelişimini ortadan kaldırmaya yardımcı olduğu ve ön ısıtma süresi ve ortalama sıvı sıcaklığına ilişkin minimum gereksinimleri önemli ölçüde azaltabileceği düşünülmektedir. Kaynak koşullarının büzülme boşluğu oluşumu üzerindeki etkisini özetlemek gerekirse, daha yüksek bir sıvı sıcaklığı, daha uzun bir ön ısıtma süresi ve daha geniş bir kaynak aralığı, katılma bölgesinin dikey hareketini destekleyebilir ve kaynak merkezinde katılma bölgesinin yatay hareketini baskılayabilir; bu nedenle termit kaynaklarında büzülme boşluklarının gelişmesini önlemeye yardımcı olabilir.

5. Merkez Hattı Kusuru Oluşum Basamakları

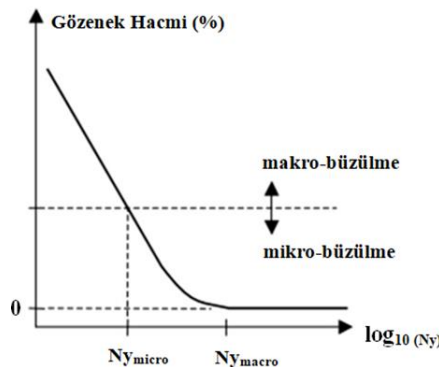
Kaynak kusurları, termit kaynaklarının radyografilerinde kaynak merkez hattı ile Şekil 8a'da görülebilir. Bu kusurlu bölgenin Şekil 8b'de görülen optik mikrogramında bu merkez hattı kusurlarının, daha önce tartışılan gözle görülen büzülme boşluğundan çok daha küçük olan büzülme tipi kusurların, birikmesi olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda merkez hattı kusurunun ray boynunda daha belirgin olduğu ve ray tabanında daha hafif olduğu da görülmüştür. Fiziki termit kaynaklarında ray mantarı bölgesinde merkez hattı kusuruna rastlanmamıştır.

Büzülme boşluğuna benzer şekilde, merkez hattı kusur kümesinin oluşumu hacimsel küçülmeden ve katılma sırasında yumuşak bölgedeki sıvı basıncı düşüşünden kaynaklanır.



Şekil 8. (a) X-ışını radyografi görüntüsü ve (b) kaynak merkez hattı boyunca kusur kümesinin optik mikrogramı

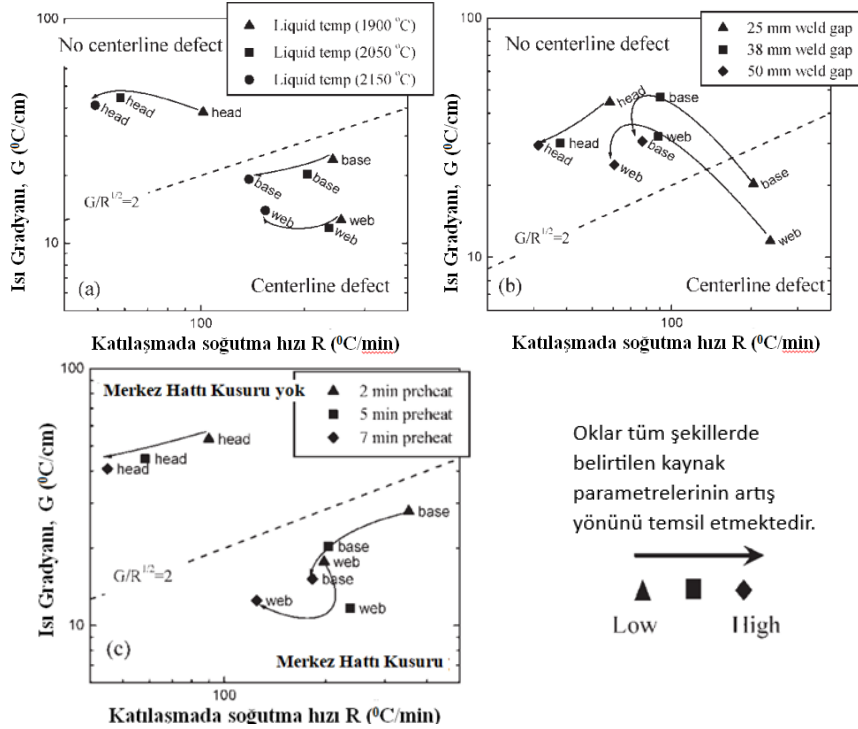
Bununla birlikte, büzülme boşluğu oluşumunun aksine, merkez hattı kusurunun oluşması için katılma sırasında gözle görülebilir izole edilmiş sıvı bölgesine gerek yoktur. Katılma sırasında gaz oluşumunun yardımıyla dendrit yapısı boyunca sıvı akışının neden olduğu basınç düşüşü, merkez hattı kusur kümesinin artmasına neden olacaktır [15]. Dökümhane pratiğinde, yerel sıcaklık gradyanının (G), soğuma hızının (R) ve katılma hızının (V) bu tür kusurların oluşmasında önemli olduğu uzun zamandır bilinmektedir [16]. Bu termal parametreleri merkez hattı kusur oluşumuyla ilişkilendirmek için birçok çalışma yapılmıştır [17-19]. Elde edilen korelasyonlar çoğunlukla ampiriktir ve farklı materyallerde çeşitli derecelerde başarıya sahiptir. Bunlar arasında, Niyama'nın değiştirilmiş sıcaklık gradyanı kriteri, çelik dökümler için, özellikle de döküm merkez hattı ile büzülme gözeneklerinin tahmin edilmesi açısından kanıtlanmıştır [20]. Döküm simülasyon yazılım paketlerinin ortak çıktısı olarak yerel bir termal parametre olan Niyama kriteri, çelik dökümlerdeki büzülme gözeneklilik kusurlarını tahmin etmek için sıklıkla kullanılır. Ampirik bir kriter olarak, Niyama'nın değiştirilmiş sıcaklık gradyanının kritik değeri malzemeye duyarlıdır ve termit çeliği için belirlenmesi gerekir. Döküm simülasyon sonuçlarından boyutsuz bir Niyama kriter değeri elde edildikten sonra, karşılık gelen büzülme gözenek hacmi oranı, yalnızca katı kısım-sıcaklık eğrisi ve alaşımın toplam katılma büzülmesi bilinenler belirlenebilir. Niyama'nın analizinin grafiksel gösterimi Şekil 9'da verilmiştir [21]; Sabit $G/\rho R = 2^{\circ}C^{1/2} \text{ min}^{1/2} \text{ cm}$ çizgisi kusurun olmadığı ve kusurlu bölgenin ortasından geçer, bu nedenle termit kaynaklarında merkez hattı kusurunun oluşumunu belirlemek için kritik değer olarak seçilir.



Şekil 9. Büzülme gözeneklilik hacmi ile Niyama kriteri arasındaki ilişki

5.1. Kaynak koşullarının merkez hattı kusur oluşumu üzerindeki etkisi

Kaynak parametrelerinin merkez hattı kusur oluşumu üzerindeki etkisini incelemek amacıyla üç kaynak parametresi, sıvı sıcaklığı, kaynak aralığı ve ön ısıtma süresi üzerinde durulmuştur. Sıcaklık gradyanı ve soğuma hızı, katılma sıcaklığında değerlendirilmiştir. Hesaplanan G (sıcaklık gradyanı) ve R (soğuma hızı), Şekil 10'da gösterilmektedir ve merkez hattı kusur bölgesi, merkez hattı arızası olmayan bölgeden $G/R^{1/2} = 2$ ($^{\circ}\text{C}^{1/2} \text{ min}^{1/2} \text{ cm}$) düz çizgisiyle ayrılmıştır. Şekil 10'daki oklar belirtilen kaynak parametrelerinin artış yönünü temsil etmektedir. Ortalama sıvı sıcaklığının etkisini gösteren Şekil 10a incelendiğinde sıvı sıcaklığının merkez hattı kusuru oluşumu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Sıvı sıcaklığının artmasıyla R azalır ve G aynı kalır. Bu nedenle Niyama'nın parametresi ($G/R^{1/2}$) temelde değişmez. Kaynak durumu, sıvı sıcaklığının artmasıyla birlikte sabit $G/R^{1/2}$ çizgisine neredeyse paralel olarak hareket eder. Benzer şekilde ön ısıtma süresindeki artışın da Şekil 10c'de görüldüğü gibi parametre üzerinde güçlü bir etkisi yoktur. Merkez hattı kusur oluşumu için en etkili kaynak parametresi Şekil 10b'de görüldüğü gibi kaynak aralığıdır. Kaynak aralığının 25 mm'den 38 mm'ye çıkarılmasıyla R azalır ancak aynı zamanda ray tabanındaki ve gövdedeki G önemli ölçüde artar. Kaynak aralığındaki 38 mm'den 50 mm'ye daha fazla bir artış, merkez hattı kusur oluşumunun önlenmesi açısından ek bir fayda sağlamaz.



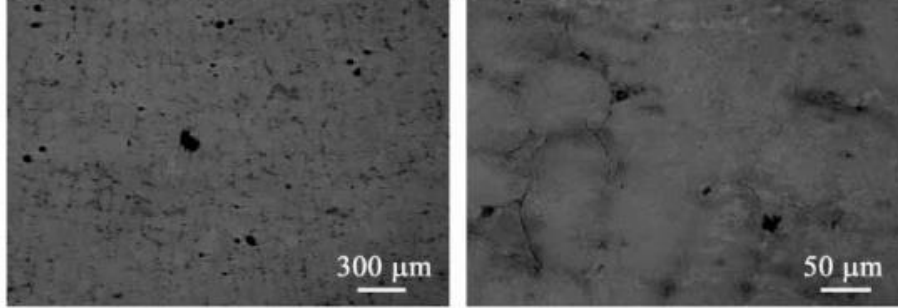
Şekil 10. Kaynak parametrelerinin merkez hattı kusur oluşumu üzerindeki etkisi (a) sıvı sıcaklığının etkisi, (b) kaynak aralığının etkisi ve (c) ön ısıtma süresinin etkisi

6. Dağıtılmış Mikro Gözeneklilik

Dağıtılmış mikro gözeneklilik, kaynak metalinde sıklıkla gözlemlenen, eşit şekilde dağılmış küçük gözenekleri ifade eder. Mikro gözeneklerin boyutu birkaç mikrondan neredeyse yüz mikrona kadar değişir. Hem küresel hem de düzensiz şekilli mikro gözenekler bulunabilir ve bunlar genellikle Şekil 11'de gösterildiği gibi interdendrit bölgelerde bulunur. Mikro gözenekliliğin oluşumu hem soğutma sırasında gaz oluşumunu hem de katılma ve sıvılaştırma arasındaki sıcaklık olan yumuşak bölge içindeki sıvı basıncı düşüşünü içerir. Hidrojen içeren Al-

Cu alaşımındaki dendritler arası gözenekliliğin kapsamlı bir analizinde Poirier ve ark. [22] interdendrit gözeneginin oluşum koşulunun şu şekilde olduğunu göstermiştir:

$$P_G - P_L = 4Y/(F_1\lambda_1^3) \quad (1)$$



Şekil 11. Dendrit bölgelerindeki küresel ve düzensiz şekilli mikro gözenekler

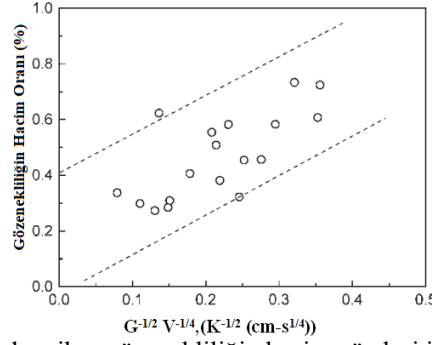
Burada P_G gözenek içindeki gaz basıncıdır, P_L yumuşak bölge içindeki sıvı basıncıdır, Y gaz ve sıvı arasındaki yüzey gerilimidir, f_L interdendrit sıvının hacim oranıdır ve λ_1 birincil dendrit kol aralığıdır. Dendrit kol mesafesi ne kadar büyük olursa dendritler arası gözeneklerin gelişmesinin o kadar kolay olacağı görülebilir. Poirier, gaz fazının sıvı ve katı fazın aşırı doymuş gazını içerdiğini varsayarak, dendritler arası gözeneklerin hacim oranının ötektik sıcaklıkta gözenekler içindeki gaz basıncının (P_G^E) azalan bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir [22].

$$\text{Vol\%} = \left\{ 1 + \left(\frac{1-f_E}{\rho_s} + \frac{f_E}{\rho_{LE}} \right) \frac{MP_G^E}{RT_E\Phi} \right\}^{-1} \quad (2)$$

Burada f_E ötektik sıcaklık aralığıdır, ρ_s ve ρ_{LE} ötektik sıcaklıkta katı ve sıvı ötektiğın kütle yoğunluğu, M gazın moleküler ağırlığı, R gaz sabiti, T_E ötektik sıcaklık ve f ötektik sıcaklıkta alaşımdaki gaz fazının fraksiyonudur. Dendritler arası gözenekleri oluşturmak için gerekli gaz basıncı dendrit kol aralığı ile azaldıkça, gözeneklerin hacim yüzdesi dendrit kol aralığı ile artar, yani dendrit kol aralığı ne kadar büyükse, gözeneklilik oranı o kadar yüksek olur. Mikro gözeneklilik ve termit kaynak durumu arasında bir korelasyon elde etmek için dendrit kol mesafesinin katılma durumuna bağlı olması gerekir. Kurz ve Fisher'e göre [23], birincil dendrit kol mesafesi artan sıcaklık gradyanı ve katılma hızı (V) ile azalır ve şu şekilde tanımlanabilir:

$$\lambda_1 \propto G^{-0,5} V^{-0,25} \quad (3)$$

Bu nedenle, mikro gözenekliliğın hacim oranı, termit kaynaklarının katılma sırasındaki termal durumu ile ilişkilendirilebilir. Bu analizin ışığında mikro gözenekliliğın hacim oranı ile termal koşullar arasındaki ilişki, sonuç olarak, aynı konumlarda ölçülen mikro gözenekliliğın hacim oranları, Şekil 12'de gösterildiği gibi mikro gözeneklilik içeriğinin dendrit kolu aralığı ile artan eğilimi açıktır. Bununla birlikte, sıcaklık gradyanındaki ve katılma oranındaki azalmayla birlikte termit kaynaklarında daha fazla dağıtılmış mikro gözenekliliğın beklendiği sonucuna varılabilir.



Şekil 12. Termit kaynaklarında mikro gözenekliliğin hacim yüzdesi ile termal parametre $G^{-0.5}V^{-0.25}$

Termit kaynaklarında kullanılan kaynak koşulu aralığı içinde, $G^{-0.5}V^{-0.25}$ parametresi ile gözenekliliğin hacim farklılıklarının artan eğilimi doğrusaldır ve Şekil 12'deki verilere uygun bir eğri, termit kaynaklarında mikro gözenekliliğin öneminin tahmin edilmesine ait ilişkiyi sağlamaktadır

7. Kaynak Hata Oluşum İhtimalleri

Termit ray kaynaklarının kalitesini artırmak için, kaynak kusurlarının oluşumunu ve sıklığını en aza indirecek şekilde kaynak parametrelerinin optimize edilmesi gerekir. Kaynak kusurlarının oluşmasına neden olan kaynak parametrelerinin değerlerini gösteren genel bilgilerin olması faydalı olacaktır. Bu bölümde, bu çalışmada ele alınan çeşitli kaynak kusurları için kritik koşullar irdelenmiştir. Bunlara dayanarak ray termit kaynaklarının güvenilirliğini artıracak yöntemler önerilecektir.

7.1. Dikkate alınan kaynak parametreleri ve kaynak hataları

Kaynak hatası gelişimi üzerinde etkili olan ve uygulamada kontrol edilebilen yalnızca üç kaynak parametresi vardır

- Kaynak aralığı
- Sıvı sıcaklığı
- Ön ısıtma süresi.

Bu bölümdeki tüm hesaplamalar için 7 mm'lik çıkıntı boyutu ve 60 saniyelik döküm süresi göz önünde tutulmuştur. Önceki bölümlerde ele alınan dört kaynak hatası burada da ele alınmaktadır:

- Ray tabanındaki soğuk bindirme,
- Ray boynundaki büzülme boşluğu,
- Ray tabanı ve boynundaki merkez hattı kusur kümesi
- Ray mantarındaki mikro gözeneklilik

Her ne kadar mikro gözeneklilik ray mantarı dışındaki yerlerde de oluşabilse de, bu mikro süreksizliklerin varlığı, Carpenter ve arkadaşları ile Barsom tarafından gösterildiği gibi yorulma çatlak büyümesini önemli ölçüde etkilememektedir [24,25]. Yalnızca ray mantarı gibi daha ciddi kaynak kusurlarının bulunmadığı alanda mikro gözenekler kritik yorulma çatlaklarını artırır [18]. Bu nedenle sadece ray mantarındaki mikro gözenekler dikkate alınmalıdır.

7.2. Kaynak kusuru oluşum basamakları

Yukarıdaki analizlere dayanarak, aşağıdaki parametreler ve bunlara ait değerlerden, kaynak kusurlarının oluşumunu veya önemini anlatmak için faydalanılmıştır.

Soğuk bindirme oluşumu: Geri erime derinliği, soğuk bindirme oluşumunu tanımlamak için kullanılır. Geri erime derinliği, <7 mm olduğunda, soğuk bindirme oluştuğu varsayılmıştır.

Büzülme boşluğu oluşumu: Katılma sırasında izole bir sıvı bölgenin varlığı, büzülme boşluğu oluşumunun bir belirtisi olarak kabul edilir. Birbirini takip eden iki termit arasındaki kaynak parametresi değerinin sadece bir kaynak değeri değiştirilerek büzülme boşluğu oluşumu için kritik koşul olduğu varsayılmaktadır.

Merkez hattı kusur oluşumu: Niyama'nın değiştirilmiş sıcaklık gradyanı ($G/R^{1/2}$), merkez hat kusur oluşumunu açıklamak için kullanılmıştır. Yerel termal gradyan olarak tanımlanan Niyama kriteri, soğutma hızının kareköküne bölünür. $G/\sqrt{R} = 2$ 'nin ($^{\circ}\text{C}^{1/2} \text{ min}^{1/2}/\text{cm}$) merkez hat kusurunun oluşması için kritik koşul olduğu varsayılır.

Mikro gözeneklilik oluşum sıklığı: Termit ray kaynaklarında mikro gözeneklilik kaçınılmaz bir sonuçtur. Böylece mikro gözeneklilik oluşumuna ilişkin kriteri belirlemek yerine, mikro gözenekliliğin yoğunluğu göz önünde tutulduğunda, kaynak parametreleri ile mikro gözenekliliğin oluşum sıklığı arasında bir korelasyon ilişkisi olduğu sonucuna varılabilir. Ray boynu ile ray tabanı arasında, merkez hattı kusurunun ray boynunda meydana gelme olasılığı daha yüksektir. Ara sıvı sıcaklığı veya ön ısıtma süresi ile ray boynundaki merkez hat kusuru oluşumunu önlemek daha kolaydır.

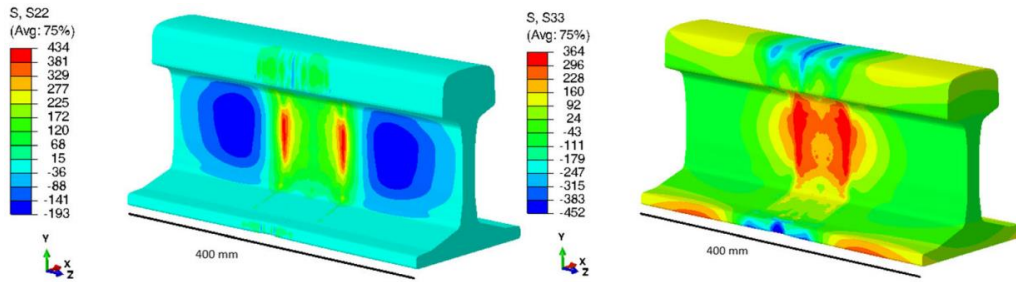
8. Tartışma

8.1. Kusur oluşum sınırları

Soğuk bindirme kusurlarının çok çeşitli kaynak parametreleri için oluşabileceği görülmektedir; ancak termit kaynaklarında soğuk bindirme kusurları çok sık görülmez. Bu çelişkinin iki nedeni olabilir. Birincisi, soğuk bindirme kusuru, kaynak kalıbı ile ray yüzeyi arasındaki hatalı eşleşmenin neden olduğu yetersiz bir füzyon hatası olan 'çıkıntı' kusuruna benzer [8]. Pratikte soğuk bindirme ile çıkıntı kusurunu birbirinden ayırmak zordur. İkincisi, analizde soğuk bindirme oluşumunun tahmini başlangıcı, kaynak aralığı genişliğinin tam olarak iki ray ucu arasındaki mesafe olduğu varsayılır. Sabit kaynak kalıbı ray genişliği göz önüne alındığında, çıkıntının boyutu kesindir. Ancak fiziki termit kaynaklarında kaynak aralığı, iki ray ucu arasına standart termit kaynağı için 25 mm olan sağlam bir ölçü mastarı yerleştirilerek hazırlanır. Kaynak aralığının ölçü bloğunun genişliğinden daha küçük olması mümkün değildir; bunun yerine gerçek kaynak aralığının daha büyük olması mümkündür. Sonuç olarak, çıkıntı mesafesi normalde 7 mm'den küçük olabilir ve dolayısıyla soğuk bindirme oluşumu minimize edilmiş olur. Ray ucunun yalnızca 5 veya 6 mm'lik yatay erimesine ihtiyaç duyulursa, soğuk bindirme oluşum bölgesinin sınırı, kusur oluşum haritasında önemli ölçüde sola doğru hareket edecektir. Bu nedenle, 7 mm'lik çıkıntı mesafesi varsayımı kullanılarak elde edilen bu termit kaynaklarda, soğuk bindirme oluşum olasılığı yüksek görülebilir. Kaynak parametresi alanından geçerken kullanılan artışlar ne kadar küçük tutulursa, kaynak hatası oluşum bölgeleri o kadar doğru bir şekilde belirlenebilir. Bu özellikle büzülme boşluğunun kritik durumu için geçerlidir. Bu büyük artışlar büzülme boşluğu oluşum bölgesinin hassasiyetini etkileyebilir. Bir büzülme boşluğunun ne zaman oluşabileceğini doğru bir şekilde belirlemek için, kaynak değişkenlerinin daha hassas artışlarını kullanan çok daha fazla kaynağa ihtiyaç vardır. Aslında, mikro gözenekliliğin hacim oranı, birincil dendrit kol aralığının karmaşık bir fonksiyonudur ve daha büyük dendrit kol aralığında doygun hale gelir [22]. Bir fiziki termit kaynağındaki gözenekliliğin gerçek hacim yüzdesi farklı olabilir.

8.2. Termit kaynaklarında kaynak kusurlarının bastırılması

Kusur alanları arasında, soğuk bindirme kusuru ve büzülme boşluğu benzer bir şekilde sahiptir. Sıvı sıcaklığının, ön ısıtma süresinin ve kaynak aralığının artırılması, soğuk bindirme ve büzülme boşluğunun ortadan kaldırılmasına yardımcı olabilir. Nüfuziyet azlığının ortadan kaldırılması için sıvı sıcaklığının ve ön ısıtma süresinin artırılması daha etkilidir. Buna karşılık, sıvı sıcaklığının ve kaynak aralığının artırılması, büzülme boşluğunun ortadan kaldırılmasında daha etkilidir. Büzülme boşluğu oluşumunun görülme ihtimali, tüm kaynaklarda soğuk bindirme kusurundan daha azdır. Böylece, soğuk bindirmeyi ortadan kaldıracak bir kaynak koşuluyla büzülme boşluklarının oluşması da önlenir, ancak soğuk bindirme kusurlarından kurtulmak kaynak parametrelerinde daha büyük bir artış gerektirecektir. Ray ucunun çıkıntısı standart termit kaynağı için <7 mm'den daha küçükse, soğuk bindirmenin ortadan kaldırılması için kritik koşullar büzülme boşluğunun giderilmesinden çok farklı olmayabilir. Aşağıdaki şekil 13'te kaynaktan hemen sonra enine ve boyuna oluşan ray ve kaynak metalinde oluşan gerilmeler görülmektedir. Boyunda hem dikey hem de uzunlamasına yönde büyük çekme gerilmeleri oluşur. 12 dakika ila 18 dakika arasındaki sıvıdan katı faza dönüşümlerindeki hacim değişiklikleri küçük gerilim değişimleri olarak gösterilirken, östenitten perlitte son faz dönüşümü hem dikey (S22) hem de boylamsal yönde daha büyük bir gerilim düşüşü sağlayacaktır [14]. Ayrıca östenitten perlitte son faz dönüşümünün 700°C sıcaklıkta başlayıp 660°C 'de bittiği gerçeği hatırdan çıkarılmamalıdır.



Şekil 13. Geleneksel UIC60 ray profili için ATW işleminden sonra hesaplanan dikey (S22), boylamasına (S33) artık gerilim alanı (MPa)

Merkez hattı kusur oluşumunun bastırılmasına yönelik kaynak koşulları daha karmaşıktır. Ray boynu için merkez hattı hatası, kaynak parametrelerinin orta aralığında meydana gelmez ancak ray tabanı için, merkez hattı kusurunun oluşumu çoğu zaman kaynak aralığından güçlü bir şekilde etkilenirken, sıvı sıcaklığından ve ön ısıtma süresinden daha zayıf bir şekilde etkilenebilir. Ray boynundaki merkez hattı kusur oluşumunun sınırı, ray tabanına göre daha büyük bir kaynak aralığında meydana gelir. Bu nedenle, ray boynundaki merkez hattı kusurunu ortadan kaldırmak için kaynak aralığı arttırılırsa ray tabanındaki herhangi bir merkez hattı kusurunun da önlenmesi mümkün olacaktır [26]. Ön ısıtma süresinde ve sıvı sıcaklığındaki küçük bir artış, ray boynunda merkez hattı kusurunun oluşmasını azaltacaktır; ön ısıtma süresinde ve sıvı sıcaklığındaki limitlerin üzerinde yapılan daha fazla artış, merkez hattı kusurunun oluşma eğilimini arttıracaktır. Bu geçiş noktası sıvı sıcaklığı için 2050°C , ön ısıtma süresi için 5 dakikadır. Ön ısıtma süresindeki ve sıvı sıcaklığındaki artışlar, sıvı sıcaklığı çok yüksek olmadığı sürece ray tabanındaki merkez hattı kusur oluşumunu önemli ölçüde etkilemeyecektir. Termit kaynaklarında mikro gözenekliliğin oluşması, dikkate alınan kaynak parametreleri aralıklarında kaçınılmazdır. Mikro gözeneklilik içeriğinin kaynak parametrelerine bağımlılığı, soğuk bindirme ve büzülme boşluğunun oluşma koşullarının tersidir. Sıvı sıcaklığı ne kadar yüksekse ve kaynak aralığı ne kadar genişse, mikro gözenekliliğin hacim yüzdesi de o kadar yüksek olur. Dolayısıyla, soğuk bindirme kusurlarının, büzülme boşluklarının ve merkez hattı kusurlarının ortadan kaldırılması, yan etki olarak mikro gözeneklilik içeriğinin arttırılması pahasına sağlanacaktır. Neyse ki bu artış önemli değildir. Termit kaynaklarındaki mikro gözeneklilik göz ardı edilirse, termit kaynaklarının kaynak kusurları, soğuk bindirme, büzülme boşluğu ve merkez hattı kusurları olmadan üretilmesi

mümkündür. Mevcut standart termit kaynak koşulları 25 mm kaynak aralığı, 5 dk ön ısıtma süresi ve 2050°C ortalama sıvı sıcaklığıdır. Böyle bir 'kusursuz' termit kaynağı üretmek için bile mikro gözeneklilik hala mevcut olacaktır, ön ısıtma süresi değiştirilmeden tutulmalı ve sıvı sıcaklığı 2100°C'ye ve kaynak aralığı 35 mm'ye yükseltilmelidir veya sıvı sıcaklığı değiştirilmeden ön ısıtma süresi 6,25 dakikaya ve kaynak aralığı 38 mm'ye çıkarılmalıdır. Her iki durumda da kaynak aralığı önemli ölçüde artar ve sıvı sıcaklığının veya ön ısıtma süresinin değiştirilmesi tek başına pek önemli sonuçlar veremez.

9. Sonuçlar

1. Mevcut standart ray termit kaynağı uygulamasıyla büzülme boşlukları önenebilir, ancak soğuk bindirme ve merkez hattı kusurunun oluşması görülebilir. Ön ısıtma süresinin ve sıvı sıcaklığının artmasıyla, soğuk bindirme ve merkez hattı kusurunun oluşma olasılığı azaltılabilir.

2. Termit kaynaklarında mikro gözeneklilik kusuru giderilemez. Soğuk bindirme ve merkez hattı kusurlarını önlemek için uygun olan kaynak koşulları oranında ön ısıtma süresinin ve sıvı sıcaklığının artırılmasının yan etkisi olarak daha büyük oranlarda mikro gözenekliliğe yol açması kaçınılmazdır.

3. Standart kaynak aralığı boyutunun artırılması, nüfuziyet azlığının sonucu görülen soğuk bindirme ve merkez hattı hatası oluşumunun önlenmesine yardımcı olur. Aslında termit kaynaklardaki soğuk bindirme ve merkez hattı kusurlarını ortadan kaldırmak için mevcut standart olan 25 mm'lik kaynak aralığının artırılması gerekmektedir. Ön ısıtma süresini veya sıvı sıcaklığını ayrı ayrı artırmak, kaynak aralığını artırmak kadar etkili değildir. Mevcut standart termit kaynak işlemiyle, ön ısıtma süresindeki 2-3 saniyelik bir artışla birlikte 38 mm'lik bir kaynak aralığı, büyük kaynak kusurlarından arınmış termit kaynakları elde etmek için en pratik yaklaşım olacaktır. Bundan sonraki çalışmalarda, bu sonuçlar ışığında uygun ortamlar hazırlanarak fiziki termit kaynakları yapılabilir, standart kaynak aralığı bu makaledeki aralıklarla değiştirilerek sonuçların örtüşüp örtüşmediği kontrol edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TCDD Demiryolu Teknoloji ve Araştırma Merkezinin (DATEM) katkıları ile yapılmıştır. Bu çalışmanın yapılması için resmi izin ve desteklerinden dolayı DATEM Araç Teknolojileri Müdürü ve DEMUHDER Başkanı Sayın Çetin TEKİN'e Laboratuvar ve deney çalışmalarında bize verdikleri destekten dolayı teşekkür ederiz. Ayrıca, TCDD Ankara Demiryolu Eğitim ve Sınav Merkezi Müdürü, Sayın Dursun YAVUZ'a ve Eğitim Dairesi Başkanlığı Ölçme ve değerlendirme Şube Müdürü Sayın Hakan KARLIDAĞ'a teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] L.C. Schroeder, ve D.R. Poirier, "Mekanik birinci sınıf alaşım raylardaki termit kaynaklarının özellikleri." *Malzeme Bilim. Müh.*, 1984, 63, 1 –21.
- [2] B. Demir, K.B. Ali, H. Gürün, M. Acarer, "An investigation of the shearing performance and sheared surface characterization of Ultra-Strength DP Steel-Al Explosive Welded Plate Composite", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023.
- [3] I. Nenad, M. T. Jovanovic, M. Todorovic, M. Trtanj, ve P. Saponjic, "Raylarda kaynak sonrası ısıtma işlemi görmüş termit kaynağının mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu," *Malzeme. Charact.*, 1999, 43, 243.
- [4] L.C. Schroeder, ve D. R. Poirier, "Thermite demiryolu kaynakları, süreç, mekanik ve metalurjik özellikler ve olası iyileştirmeler," *Demiryolu Ray Kaynağı Bildirileri, Memphis*, 29 –30 Kasım 1983, s. 21

- [5] A. Arı, B. Demir ve A. Keskin, "Alimünotermite kaynağıyla birleştirilmiş, mantarı Sertleştirilmiş "R350HT" rayın boyuna sertlik taramasının incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 18, ss. 50-58, Tem. 2023, doi: 10.47072 / demiryolu.
- [6] J.A. Gianetto, E. Es-Sadiqi, K.J. Sawley, M.A. Joos, ve D.W. Blowatt, "EMS'nin demiryolu termit kaynak yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi." *39. Mekanik İşleme ve Çelik İşleme Konferansı Uluslararası Demiryolu Çelikleri Sempozyumu Bildirileri, Indianapolis, IN, 21 Ekim 1997*, s. 1091.
- [7] J. P. Cyre, "Termit ray kaynaklarının yorulma direncini geliştirmeye yönelik konseptler." Yüksek Lisans Tezi, Illinois Üniversitesi, Urbana-Champaign, 2002.
- [8] E. T. Ross, "Geliştirilmiş termit ray kaynağına ilişkin istatistiksel bir çalışma." Yüksek Lisans Tezi, Illinois Üniversitesi, Urbana Champaign, 2004
- [9] J.A. Oderio, "Termit kaynaklı demiryolu raylarındaki detay kırılmasının metalurjik bir çalışması." Yüksek Lisans Tezi, Illinois Üniversitesi, Urbana-Champaign, 1992.
- [10] G.T. Fry, F.V. Lawrence ve A.R. Robinson, "Termit ray kaynaklarında yorulma kusuru çekirdeklenmesine yönelik model. Yorgunluk Fraksiyonu." *Müh. Malzeme. Yapı.*, 1996, 19(6) 655
- [11] A. Arı, "Alüminotermite kaynağıyla birleştirilmiş mantarı sertleştirilmiş 'R350HT' rayın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi" PhD Thesis 2021 Ankara
- [12] Y. Chen, F.V. Lawrence, C.P.L. Barkan, ve J.A. Dantzig, "Ray termit kaynaklarında kaynak hatası oluşumu." Proc. IMechE, Bölüm F: *J. Rail ve Rapid Transit*, 2006, 220(F4), 373 –384.
- [13] Y. Liu et al., "Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Rail Thermite Welding Joints," 2018 *International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Singapore, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIRT.2018.8641675.
- [14] B. Lennart Josefson, R. Bisschop, M. Messaadi, J. Hantusch. "Residual stresses in thermite welded rails: significance of additional forging." Received: 6 December 2019 /Accepted: 27 April 2020
- [15] K. Kubo, ve R. D. Pehlke, "Katılarda gözeneklilik oluşumunun matematiksel modellenmesi." *Metal. Trans. B*, 1985, 16B, 359
- [16] T. Overfelt, "Katılarda modellenmesinin üretimdeki önemi". *J. Metals*, 1992, 44(6), 17.
- [17] W. S. Pellini, "Yükseltici yeterliliğini ve besleme aralığını belirleyen faktörler." *Trans. Am. Foundry Soc.*, 1953, 61, 61.
- [18] E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, ve S. Saito, "Sıcaklık gradyanı hesaplamalarından büyük çelik dökümlerdeki büzülme tahmin etmek". *AFS Uluslararası Döküm Metalleri J.*, 1981, 6, 16
- [19] G. K. Sigworth, ve C. Wang, "Katılarda sırasında gözeneklilik oluşumunun mekanizmaları: teorik bir analiz." *Metal. Trans. B*, 1993, 24B, 349.
- [20] E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, ve S. Saito, "Büzülme tahmini yöntemi ve bunun çelik döküm uygulamasına uygulanması." *AFS Uluslararası Döküm Metalleri J.*, 1982, 7(9), 52.
- [21] K.D. Carlson, C. Beckermann "Use of the Niyama criterion to predict shrinkage-related leaks in high-nickel steel and nickel-based alloy castings." In: *Proceedings of the 62nd SFSA Technical and Operating Conference. Steel Founders' Society of America*, 2008
- [22] D.R. Poirier, K. Yeum, ve A.L. Maples, "Alüminyum açısından zengin Al-Cu alaşımlarında mikro gözeneklilik oluşumu için termodinamik bir tahmin." *Metal. Trans. A*, 1987, 18A, 1979..
- [23] W. Kurz, D. J. Fisher, "Katılarda Temelleri", 1986 (*Trans Tech Yayınları*, İsviçre).
- [24] G.F. Carpenter, R.K. Steele, ve M.J. Markase, "Dahil edilen içeriğin ray çeliklerinin yorulma performansı üzerindeki etkisi." *Raylı Çelikler Sempozyumu Bildirileri, Montreal, Quebec, Kanada, 26 –27 Ekim 1992*, s. 49 –56.
- [25] J.M. Barsom, ve E.J. Imhof, "Karbon çelik rayların yorulma ve kırılma davranışı. Ray çeliklerinin geliştirilmesi, işlenmesi ve kullanımı" (Eds D. H. Stone ve G. G. Knupp), 1978, s. 387 (*Amerikan Test ve Malzeme Derneği, Philadelphia*) ASTM STP 644.
- [26] Ö. Akbayır, "Dünyada ve Türkiye'de demiryolu kazaları nedeniyle meydana gelen ölüm oranlarının karşılaştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı 5, 2017

Özgeçmiş**Adem ARI**

1969 yılında doğmuştur. Lisans eğitimini Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliğinde, Yüksek Lisans eğitimini Karabük Üniversitesinde tamamlamış, halen bu üniversitede Doktora eğitimine devam etmektedir. Ankara Bilim Üniversitesi İHA Teknolojisi ve Operatörlüğü Bölümünde Öğretim Görevlisidir. Kompozit Malzemeler, Makine Elemanları, Mukavemet, Hidrolik ve Pnömatik İlgili alanlarına giren araştırma konulardır.

E-Posta: adem.ari@ankarabilim.edu.tr

**Bilge DEMİR**

1970 yılında doğmuştur. Lisans ve Doktora eğitimini Gazi Üniversitesinde tamamlamıştır. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon ve İmalat Teknolojisi bölümünde öğretim üyesidir. İlgili alanına giren araştırma konuları Üretim ve Kaynak Teknolojileri, Toz teknolojisi, Kompozit malzemeler ve Malzeme Tasarım ve Davranışlarıdır.

E-Posta: bdemir@karabuk.edu.tr

**Atilla KESKİN**

1967 Yılında doğmuş Lisans ve Yüksek Lisans Eğitimi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalürji Mühendisliğinde tamamlamış, Türkiye ve Ortadoğu Anma İdaresi Enstitüsünde de Kamu Yönetiminde Yüksek Lisans yapmış ve halen TCDD DATEM İşletme Müdürlüğü'nde çalışmaktadır. İlgili alanları demiryolu malzemelerinin kırılma analizi, tahribatsız muayenesi, araştırma ve testleridir.

E-Posta: atilakeskin@hotmail.com; atilakeskin@tcdd.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Adem ARI: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Bilge DEMİR: Kontrol. Atilla KESKİN: Görselleştirme, İnceleme.



Demiryolu Araçlarında Kullanılan AW 6061 T6 Alüminyum Alaşımlarının MIG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Serbest Tel Boyunun Mekanik Değerler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Sedat DAĞLARAŞTI*^{ID}, Faruk VAROL^{ID}, Cihan YAKUPOĞLU^{ID} Salim ASLANLAR^{ID}

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, Türkiye

*sedatdaglarasti@gmail.com

(Alınış/Received: 03.12.2023, Kabul/Accepted: 06.01.2024, Yayınlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Bu çalışmada demiryolu araçları sektöründe özellikle hızlı tren gövde ve şasislerinin imalatında kullanılan AW 6061 T6 serisi alüminyum alaşımları MIG (metal inert gaz) kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Çalışma kapsamındaki tüm numunelere PA (kaynak torcunun iş parçasına olan açısı 90° konumunda yapılan kaynak) pozisyonunda BW (alın birleştirme) uygulanmış ve birleştirme işlemlerinde 150x300x3 mm ebatlarında plakalar kullanılmıştır. Mukavemet değerlerinin kıyaslanabilmesi için kaynaklı numunelere çekme testi, çentik darbe testi, sertlik testi uygulanmış, birleştirme bölgeleri makrografi ve mikrografi muayene ile incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: AW 6061, Alüminyum, Kaynak, Demiryolu, MIG

Investigation of the Effect of Free Wire Length on Mechanical Values in Joining AW 6061 T6 Aluminum Alloys Used in Railway Vehicles with MIG Welding Method

Abstract: In this study, AW 6061 T6 series aluminum alloys, which are used in the railway vehicles industry, especially in the manufacturing of high-speed train bodies and chassis, were combined with the MIG (metal inert gas) welding method. BW (butt joint) was applied to all samples within the scope of the study in the PA position (welding performed at 90° angle of the welding torch to the workpiece) and plates with dimensions of 150x300x3 mm were used in the joining processes. In order to compare the strength values, tensile test, notch impact test and hardness test were applied to the welded samples, and the joint areas were examined by macrography and micrography examination.

Keywords: AW 6061, Aluminum, Welding, Railway, MIG

1. Giriş

1.1. Alüminyumun başlıca özellikleri

Alüminyum yer kürede diğer metallere birleşik durumda bulunmakta olup yer kürede bulunan tüm metaller içerisindeki oranı %8'dir. Bununla beraber kalay, altın, kurşun, demir ve bakır gibi metallerden uzun zaman sonra keşfedilmiş, endüstride yaklaşık olarak son 100-110 yıl içerisinde kullanılmaya başlanmıştır [1-4].

Mekanik açıdan sahip olduğu özellikler neticesinde endüstrinin birçok alanında kendisine çeşitli kullanım yerleri bulmuştur. Alüminyumun endüstride tercih edilmesinin başlıca sebepleri aşağıda verilmiştir;

- Hafiflik,
- Korozyon direnci,
- Şekillendirilebilirlik,

Atıf için/Cite as: S. Dağlaraştı, F. Varol, C. Yakupoğlu, S. Aslanlar, "Demiryolu araçlarında kullanılan AW 6061 T6 alüminyum alaşımlarının MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde serbest tel boyunun mekanik değerler üzerindeki etkisinin incelenmesi" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 214-224, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1399502

- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği,
- Geri dönüşüm,
- Alaşımlandırma ile sağlanabilen üstün mekanik özellikler [5].

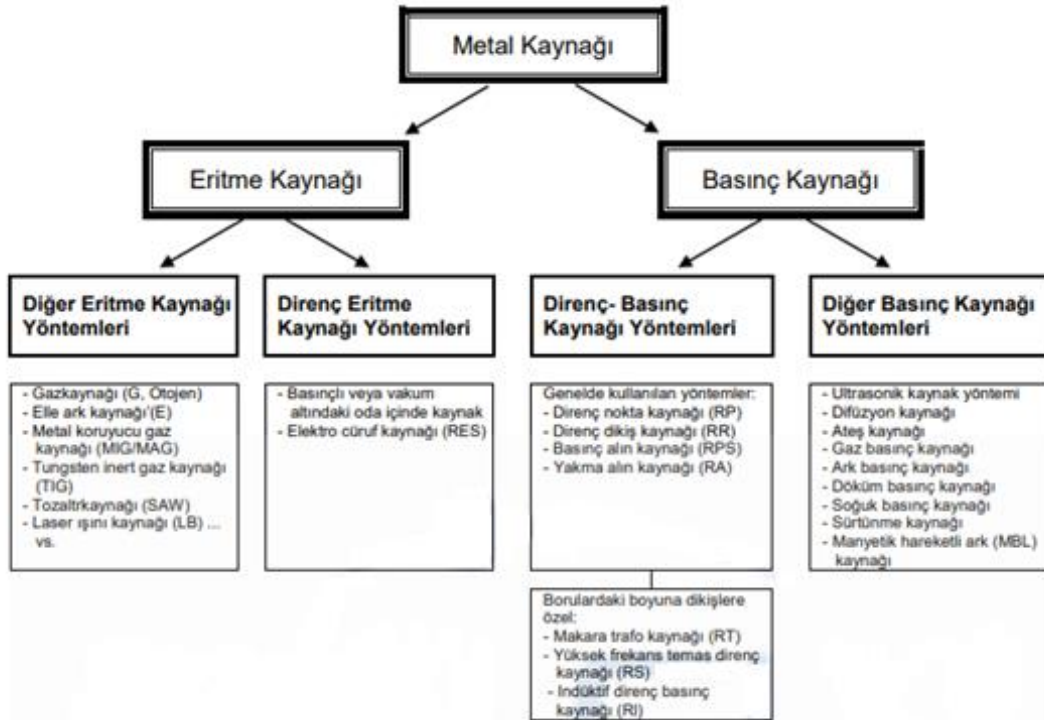
Alüminyum $2,7 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğuyla endüstride yaygın olarak kullanılan metaller arasında en hafif olanıdır. Alüminyumun hafif olması, alüminyum ve alaşımlarının endüstride kullanımını oldukça cazip hale getirmektedir [5, 6]. Aşağıda Tablo'1'de bazı metal malzemelerin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Bazı metal malzemelerin fiziksel özellikleri [5]

| Malzeme Kalitesi | 5083 | 6061 T6 | S235JR | S355JR | AISI 304 |
|---|------|---------|--------|--------|----------|
| Çekme Dayanımı (MPa) | 305 | 285 | 410 | 550 | 660 |
| Akma Dayanımı (MPa) | 170 | 260 | 240 | 360 | 300 |
| Uzama (%A) | 22 | 12 | 24 | 20 | 54 |
| Young Modülü (MPa) | 71 | 69,5 | 210 | 210 | 210 |
| Yoğunluk (gr/cm^3) | 2,66 | 2,70 | 7,8 | 7,8 | 7,9 |
| Lineer Genleşme Katsayısı ($10^{-6} \times [^{\circ}\text{C}]^{-1}$) | 23,8 | 23,6 | 11,7 | 11,7 | 17,5 |

1.2. Kaynak tekniği ve MIG kaynak yöntemi

Kaynak; malzemelerin dışarıdan ısı enerjisi sağlanarak veya sağlanmayarak, herhangi bir basınç işlemi uygulanarak veya uygulanmayarak, ergime sıcaklığı ve kimyasal kompozisyonu ana malzemeyle denk bir ilave malzeme kullanılarak veya kullanılmayarak, sürekli bir yapıya sahip olacak şekilde birleştirilmesi işlemidir [7]. Kaynak yöntemlerinin temel sınıflandırılması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kaynak yöntemlerinin temel sınıflandırılması [7]

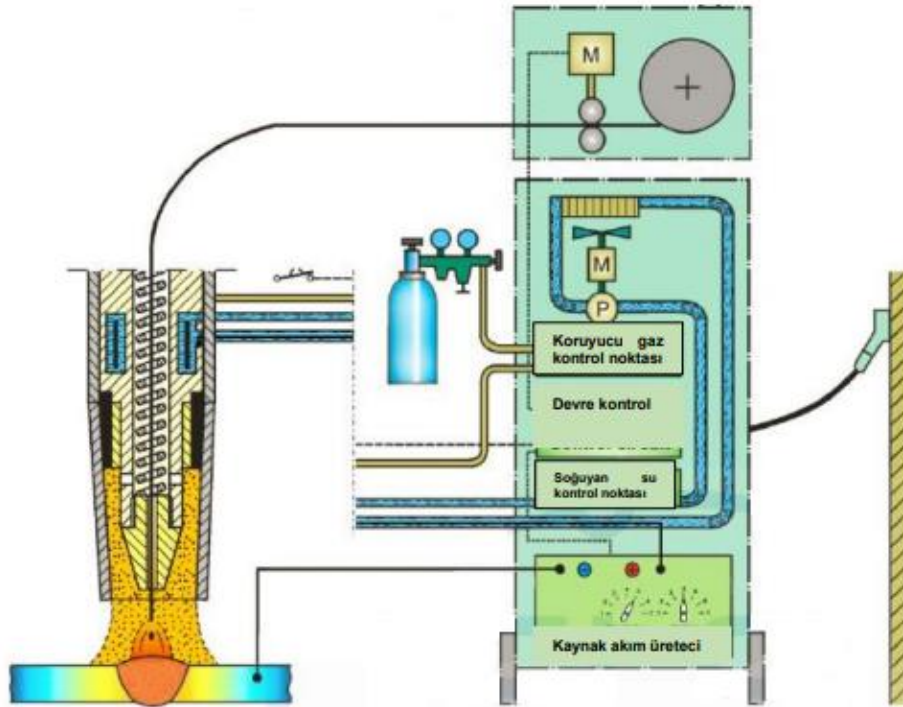
1.3. Metal koruyucu gaz kaynağı (MIG/MAG)

Sonsuz olarak tabir edilen rulo makaralardan sarılı tel elektrotlar cihazın gövdesinde bulunan tel sürme mekanizmasından geçerek koruyucu gaz atmosferi içerisinde yanan kaynak arkına doğru sürülür. MIG kaynak yönteminde kullanılan bütün koruyucu gazlar (Ar, He, Ar+He) asal gazdır. MAG kaynak yönteminde ise aktif gaz kullanılır. Bu iki yöntem arasındaki en temel fark budur. Akım üreten üreteç yataç karakteristiğe sahiptir. Yani kaynakta kullanılan parametrelerden gerilim değeri sabittir. Kaynak amper değerlerine bağlı olarak işlem esnasında farklı ark formları oluşturulabilir. Bunlardan darbeli ark alüminyum ve paslanmaz malzemelerin kaynağında büyük avantaj sağlar [8, 9, 10].

MIG/MAG kaynağı uygulanan malzemeler;

- Düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler,
- Yüksek alaşımlı çelikler,
- Paslanmaz çelikler,
- Alüminyum malzemeler [8, 9, 10].

Birçok metal malzemeye uygulanabilen MIG/MAG yöntemine ait kaynak makinasının şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. MIG/MAG kaynak makinasının şematik gösterimi [7]

2. Metot

Bu çalışmada demiryolu araçlarında özellikle de hızlı tren imalatında kullanılan ve kimyasal bileşimi Tablo 2’de verilen EN AW 6061 T6 alüminyum alaşımı malzeme kullanılmıştır.

Tablo 2. EN AW 6061 T6 malzemenin kimyasal kompozisyonu (%)

| Fe | Si | Mn | Cr | Ti | Cu | Mg | Zn | Al |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|------|
| 0,451 | 0,653 | 0,123 | 0,144 | 0,0466 | 0,242 | 0,844 | 0,0612 | 97,5 |

150x300x3mm ölçülerinde hazırlanan AW 6061 T6 alüminyum plakalar Tablo 3'te belirtilen kaynak parametreleri ve gaz altı MIG kaynak makinası ile PA pozisyonunda, alın altına (BW) ve kaynak ağzı açılmadan birleştirilmiştir. Birleştirme işlemlerinde kaynak altlığı olarak AISI 304 paslanmaz, kaynak koruma gazı olarak I1 (%100 Ar) ve ilave kaynak metali olarak ise 1,2 mm çapında 5356 (AlMg5) masif tel kullanılmıştır. Çalışma boyunca parametreler sabit tutularak farklı serbest tel boylarında numuneler birleştirilmiştir. Çalışmalarda 7,5 mm serbest tel boyu ile birleştirilen numune 10, 15 mm serbest tel boyu ile birleştirilen numune 11 ve 25 mm serbest tel boyu ile birleştirilen numune ise 12 numaraları ile kodlanmıştır.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri

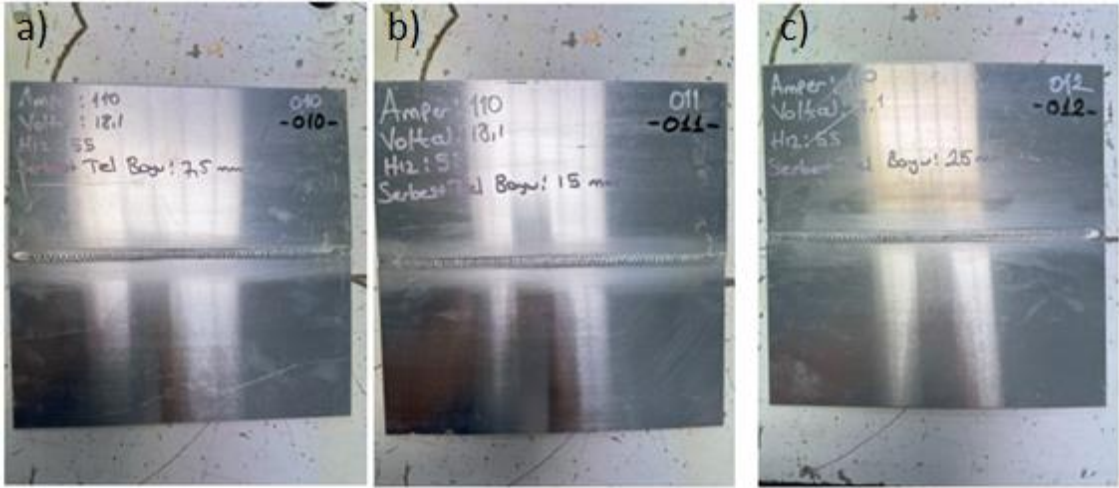
| Numune Kodu | Akım (A) | Gerilim (V) | İlerleme Hızı (cm/dk) | Tel Besleme Hızı (m/dk) | Gaz Debisi (lt/dk) | Serbest Tel Boyu (mm) |
|-------------|----------|-------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| 10 | 110 | 18,1 | 50 | 5,6 | 12 | 7,5 |
| 11 | 110 | 18,1 | 50 | 5,6 | 12 | 15 |
| 12 | 110 | 18,1 | 50 | 5,6 | 12 | 25 |

Çalışmada gaz altı MIG kaynak makinası olarak Şekil 3.'te verilen Fronius TPS 400İ marka kaynak makinası kullanılmıştır.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan MIG kaynak makinası

Şekil 4'te kaynaklı parçalar gösterilmiştir. Birleştirmelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için kaynaklı çekme test numuneleri ISO 4136, çentik darbe test numuneleri ISO 9016, sertlik test numuneleri ISO 9015 standartlarına göre Şekil 5'teki gibi hazırlanmış ve ilgili testler uygulanmıştır [11]. Hataları minimize etmek için her bir parçadan 3 adet çekme ve 6 adet çentik darbe test numunesi hazırlanmıştır. Çentik darbe test numuneleri, 2 adet ana malzeme, 2 adet ITAB (ısı tesiri altındaki bölge) ve 2 adet kaynak dikişi bölgelerinden olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 4. Kaynaklı parçalar a) Serbest tel boyu: 7,5 mm b) Serbest tel boyu 15 mm c) Serbest tel boyu 25 mm



Şekil 5. Kaynaklı parçalardan hazırlanan test numuneleri a) Serbest tel boyu 7,5 mm b) Serbest tel boyu 15 mm c) Serbest tel boyu 25 mm

Çalışmalarda spektral analiz için Spectrolab 5M, çekme testi için Instron 300DX, çentik darbe testi için Instron 300FT, sertlik testi için Qness Q700M cihazları kullanılmış ve kullanılan cihazlar Şekil 6'da verilmiştir.



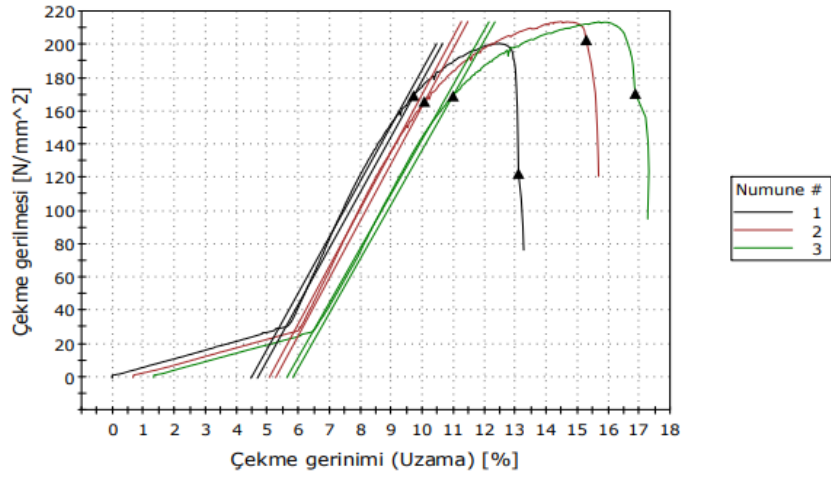
Şekil 6. Testler için kullanılan cihazlar a) Spektrometre cihazı b) Çekme test cihazı c) Çentik darbe test cihazı d) Sertlik test cihazı

3. Bulgular

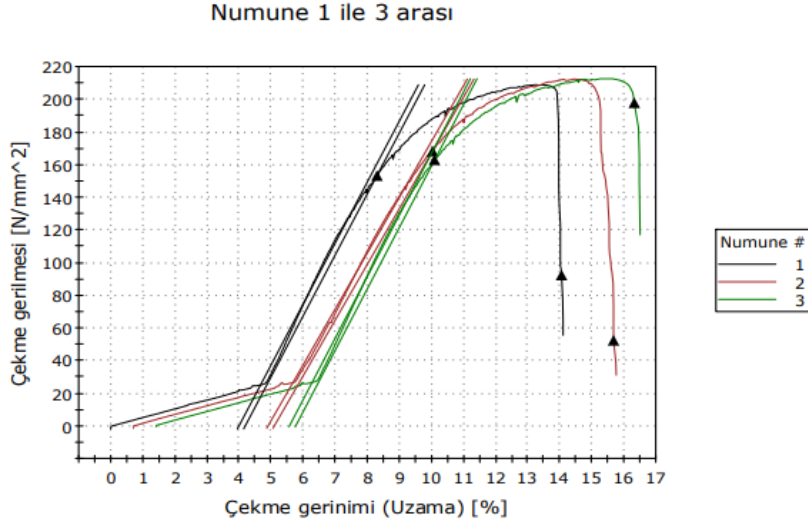
3.1. Çekme testi sonuçları

Farklı serbest tel boyları ile birleştirilen numnelere uygulanan çekme testi sonuçları Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Çekme testi TS EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

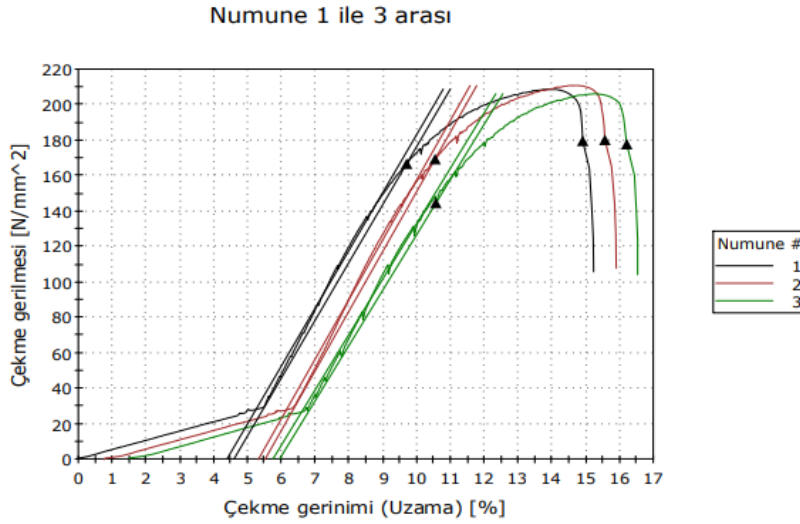
Numune 1 ile 3 arası



Şekil 7. 10 numaralı numunenin çekme test sonucu



Şekil 8. 11 numaralı numunenin çekme test sonucu



Şekil 9. 12 numaralı numunenin çekme testi sonucu

Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, 7,5 mm serbest tel boyu ile kaynak edilen numunenin ortalama akma dayanımı 167 MPa, çekme dayanımı 208 MPa, uzama değeri %10,1 olarak ölçülmüştür. 15 mm serbest tel boyu ile kaynak edilen numunenin ortalama akma dayanımı 161 MPa, çekme dayanımı 210 MPa, uzama değeri %9,3 olarak ölçülmüştür. 25 mm serbest tel boyu ile kaynak edilen numunenin ortalama akma dayanımı 159 MPa, çekme dayanımı 208 MPa, uzama değeri % 7,5 olarak ölçülmüştür.

“EN 15614-2 Metalik malzemeler için kaynak prosedürlerinin şartnamesi ve vasıflandırılması– Alüminyum ve alaşımlarının ark kaynağı” standardının Çizelge 2 kısmında, çekme deneyi sonucu kaynaklı malzeme çekme mukavemetinin, ana malzemenin çekme mukavemetinin %70 ve daha yukarısında olması kabul kriteri olarak belirtilmiştir. Sonuçlar tüm serbest tel boyları için kaynaklanabilirlik açısından kabul edilebilir değerlerdedir.

Serbest tel boyu arttıkça akma dayanımında ve uzama değerinde düşüş görülmektedir. En yüksek çekme dayanımı 15 mm serbest tel boyu ile kaynak edilen numunede gözlenmiştir.

3.2. Çentik darbe testi sonuçları

Kaynaklı birleştirmelerin ani bir kuvvet karşısında ve farklı sıcaklıklardaki davranışlarını belirlemek için ana malzeme, ITAB ve kaynak dikişi bölgesinden 2'şer adet numune hazırlanarak darbe testi uygulanmış, sonuçlar Tablo 4'te gösterilmiştir. Çentik darbe testi TS EN ISO 9016 standardına göre V çentik açılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. Çentik darbe testi sonuçları

| Numune Kodu | 23 °C'de Darbe Tokluğu (J) | | | -20 °C'de Darbe Tokluğu (J) | | |
|-------------|----------------------------|------|---------------|-----------------------------|------|---------------|
| | Ana Malzeme | ITAB | Kaynak Dikişi | Ana Malzeme | ITAB | Kaynak Dikişi |
| 10 | 33 | 33 | 27 | 33 | 33 | 30 |
| 11 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| 12 | 33 | 27 | 27 | 33 | 30 | 27 |

Sonuçlardan 25 mm serbest tel boylu numune için darbe enerjisinde azalma olduğu, 7,5 mm ve 15 mm serbest tel boylu numunelerde ise ana malzeme ve ITAB bölgelerinde darbe enerjisinin aynı olduğu fakat kaynak dikişinde en yüksek darbe enerjisinin 15 mm serbest tel boylu numunede gözlemlendiği anlaşılmaktadır.

3.3. Sertlik testi sonuçları

Numunelerin sertlik dağılımları belirlenmiş, ana malzeme, ITAB ve kaynak bölgelerinden ölçülmüştür. Belirlenen sertlik değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

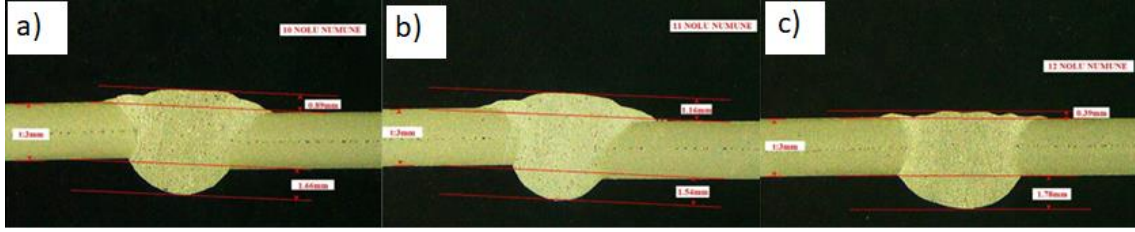
Tablo 5. Sertlik testi sonuçları

| Numune Kodu | Ana Malzeme (HV) | ITAB (HV) | Kaynak (HV) |
|-------------|------------------|-----------|-------------|
| 10 | 69 | 54 | 59 |
| 11 | 71 | 55 | 61 |
| 12 | 69 | 52 | 59 |

Sonuçlardan görüleceği üzere her 3 numune için de kaynak dişi ile ana malzeme arasında kayda değer bir sertlik farkı gözlenmemiştir. Bu beklenen bir durumdur. Alüminyumun içyapı olarak ısıdan etkilenmeyen bir malzeme olması ve ilave kaynak metali olarak ana malzemeye benzer özellikte dolgu malzemesi kullanılması bu durumun temel sebeplerindedir. Diğer taraftan ITAB sertlikleri ana malzeme ve kaynak dikişinden düşük ölçülmüştür. Bunun sebebi faz geçişi bölgesinde tane yapılarının irileşerek faz çizgisinin yumuşamasına sebep olmasıdır.

3.4. Makrografi sonuçları

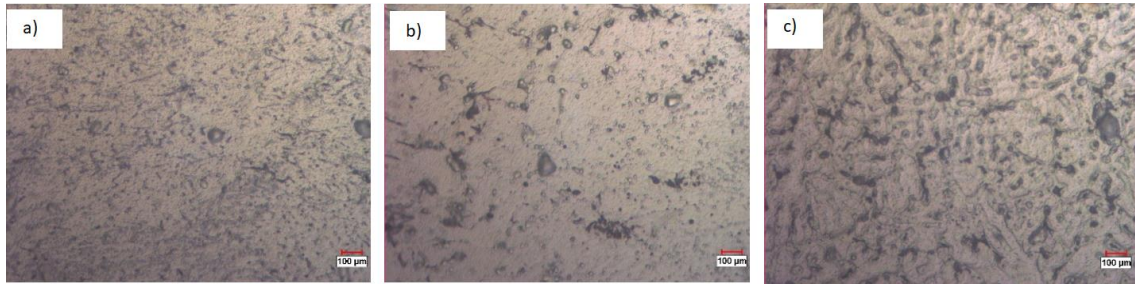
Her üç numuneye ait makrografi görüntüleri Şekil 10' da gösterilmiştir. Görüleceği üzere tüm numunelerde kök ve yan duvar nüfuziyetleri kabul edilebilir seviyededir. Ancak en düşük kaynak kepi ölçüsü 25 mm serbest tel boyu ile kaynak edilen 12 numaralı numunede ölçülmüştür. Bunun sebebinin, çok uzun serbest tel boyunun uzun ark üretmesi ve hava akımından kaynaklı kaynak arkının kaynak bölgesi dışına hareketlenmesi olduğu değerlendirilmiştir.



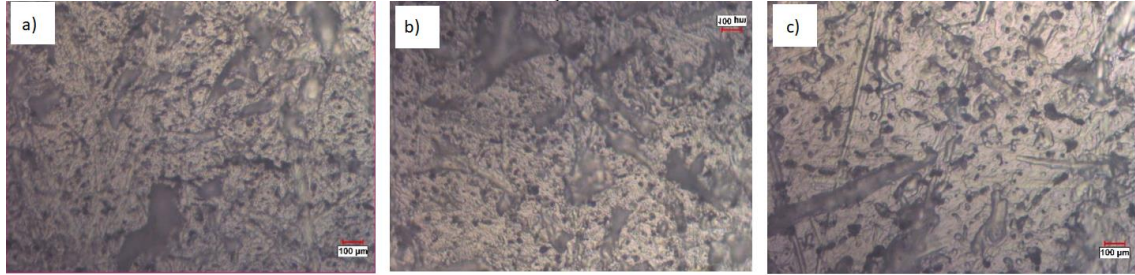
Şekil 10. Numunelerin makrografi görünümü a) 10 numaralı numune b) 11 numaralı numune c) 12 numaralı numune

3.5. Mikrografi sonuçları

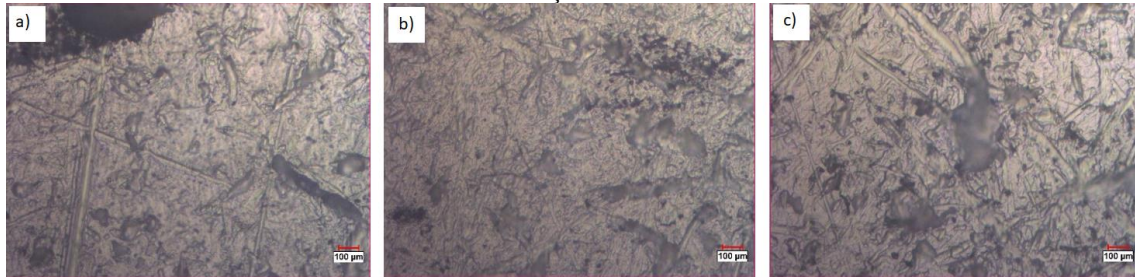
Numuneler üzerinden ana malzeme, ITAB ve kaynak dikişi bölgelerinden 100X'te mikro görüntüler alınmış ve Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 11. 10 numaralı numunenin mikrografi görüntüleri a) Ana malzeme 100X b) ITAB 100X c) Kaynak dikişi 100X



Şekil 12. 11 numaralı numunenin mikrografi görüntüleri a) Ana malzeme 100X b) ITAB 100X c) Kaynak dikişi 100X



Şekil 13. 12 numaralı numunenin mikrografi görüntüleri a) Ana malzeme 100X b) ITAB 100X c) Kaynak dikişi 100X

Kaynaklı birleştirme işlemi sonrasında içyapıda her 3 bölgede de kayda değer farklı yapılar veya çökelmeler gözlenmemiştir. Bunun sebebi alüminyumun malzemenin çelik malzemelerin aksine hızlı soğumadan etkilenmemesidir.

4. Sonuç

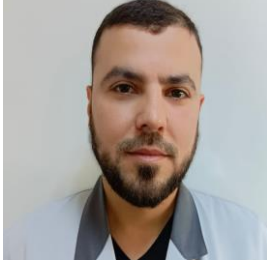
Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda madde madde verilmiştir.

- Kaynaklı numunelerin akma ve çekme dayanımları ana malzemenin değerlerinden düşük bulunmuştur. Farklı kaynak serbest tel boylarında numunelerin dayanımları farklılık göstermektedir. En yüksek çekme dayanımı 11 numaralı numunede ölçülmüşken en yüksek akma dayanımı 10 numaralı numunede ölçülmüştür. En ideal değere ulaşabilmek için farklı serbest tel boylarında mock-up çalışmaları yapılarak karar verilmesi gerektiği söylenebilir.
- Çentik darbe enerjileri 11 numaralı numunede ana malzemeye eşit bulunurken diğer numunelerde ana malzemedan düşük ölçülmüştür. Aşırı kısa serbest tel boyu ve aşırı yüksek serbest tel boyları çentik darbe enerjisini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir.
- Her üç numune içinde ana malzeme, ITAB ve kaynak dikişi sertlik değerleri ölçülmüş, sonuçların birbirlerinden çok farklı olmadığı gözlemlenmiştir. Kaynak serbest tel boyunun alüminyum malzeme kaynağında sertlik değerine doğrudan etki etmediği tespit edilmiştir.
- Makrografi görüntüsü sonucunda 12 numaralı numunede aşırı uzun ark oluştuğu bunun sonucunda kepte istenilen dolgu yüksekliği elde edilemediği bulunmuştur. Diğer iki numune için kaynak kep ve kök ölçüleri kabul edilebilir seviyede olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca görüntüler porozite açısından incelendiğinde serbest tel boyunun porozite üzerinde doğrudan etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.
- Üç numune için de kaynak dikişi, ITAB ve ana malzemedan mikrografi görüntüleri alınmış ve yüksek oranda birbirlerine benzerlikleri değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda alüminyum malzemenin iç yapısının ısı işlem ile değiştirilemeyeceği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak endüstride özellikle de hızlı tren imalatında geniş kullanım alanı bulunan EN AW 6061 T6 alüminyum malzemenin MIG kaynak yöntemi ile uygun parametre değerlerinde başarılı bir şekilde birleştirilebileceği söylenebilir.

Kaynakça

- [1] G. Mathers, *The Welding of aluminum and its alloys*. England, Woodhead, 2002
- [2] J. R. Davis, *Aluminum and aluminum alloys*. ASM Specialty Handbook, 1993
- [3] N. Erşen, S. Karakuş, *Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı*. Ankara, Ankara yayın evi, 1993
- [4] S. Anık, *Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı*. İstanbul, G.T.Ü matbaası, 1960
- [5] F. Büyükbaş, “Çift merdaneli sürekli levha döküm yöntemi ile üretilmiş AA3003 alaşımlı alüminyum levhalarda proses parametrelerinin özelliklere etkisi,” Yüksek lisans tezi, Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, Türkiye, 2001
- [6] Z. Özeşer, O. Meydanoğlu, C. Işıksaçan, M. Çöl, “Ara tav işleminin ikiz merdane sürekli döküm tekniği ile üretilen 6000 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin etkisi,” *9. Uluslararası Alüminyum Sempozyumunda*, İstanbul, 2019, pp.103-106
- [7] GSI SLV, *Malzemeler ve kaynak esnasındaki davranışları*. Ankara, ODTÜ, 2003
- [8] S. Kou, *Welding metallurgy*. United States of America, John Willey and Sons, 1987
- [9] K. Tülbentçi, *MIG-MAG gazaltı kaynak yöntemi*. İstanbul, Artech, 1998
- [10] O. Ünal, N. Akkaş, ve A. T. Sarihan, “Raylı sistem araçlarında kullanılan alüminyum alaşımlarının kaynak işleminde sıcaklık dağılımının iki boyutlu sayısal simülasyonu”, *Demühder*, sy. 16, ss. 91–101, Temmuz 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1127197.
- [11] E. Bray, E. Mcbride, *Destructive testing Techniques*. New York, A Willey Intersc, 1992

Özgeçmiş**Sedat DAĞLARAŞTI**

1989 yılında Adana'da doğdu. Lisans derecesini 2013 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde aldı. Halen Türkiye Raylı Sistem Araçları AŞ'de kaynak koordinatörü olarak görev yapmakta olup yüksek lisans eğitimine Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümünde devam etmektedir.

E-Posta: sedatdaglarasti@gmail.com

**Faruk VAROL**

Lisans derecesini Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde tamamladı. Yüksek Lisansını yine Sakarya Üniversitesi Metal Eğitiminde tamamladı. Sakarya Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümünde doktora derecesi aldı. Halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesinde Doçent Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: fvarol@subu.edu.tr

**Cihan YAKUPOĞLU**

2014 yılında Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde Lisans derecesi aldı. Yüksek lisansını Sakarya Üniversitesi İmalat Mühendisliğinde tamamladı. Halen Ak-Pres Metal San. firmasında üretim uzmanı olarak görev yapmakta olup Doktora eğitimine Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesinde devam etmektedir.

E-Posta: cihan.yakupoglu@akpres.com.tr

**Salim ASLANLAR**

Lisans ve Yüksek Lisans Eğitimini Fachhochschule Niederrhein Üniversitesinde tamamladı. Sakarya Üniversitesinde sırasıyla Araştırma Görevlisi, Öğretim Görevlisi, Yardımcı Doçent ve Doçent olarak görev yaptı. Halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesinde Profesör Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: saslanlar@subu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Sedat DAĞLARAŞTI: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Faruk VAROL: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Cihan YAKUPOĞLU: Görselleştirme, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Salim ASLANLAR: Kontrol.



Demir İpek Yolu Güzergahında Kuruluş Yeri Seçimi: Kapıkule-Kars Örneği

Mehmet Taha YIKIN¹, Evrencan ÖZCAN²

¹ TCDD Taşımacılık Genel Müdürlüğü, Yük Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

² Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

*tahayikin@gmail.com

(Alınış/Received: 29.06.2023, Kabul/Accepted: 15.01.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: İpek Yolu, tarihi boyunca birçok medeniyet arasında ticaretin yapıldığı en önemli yollarından biri olmuştur. Coğrafi keşiflerden sonra yeni ticaret yollarının bulunması sonucunda önemini kaybeden İpekyolu, güzergâh ülkeleri tarafından demir İpek Yolu olarak yeniden canlandırılmış, Trans Hazar Uluslararası Taşıma Koridoru olarak taşımalara açılmıştır. Özellikle Marmaray tüp geçidinin yapılması ile Çin'den gelen yüklerin bu geçidi kullanarak Avrupa'ya gitmesi, Türkiye'nin özellikle Jeopolitik konumu itibari ile Avrupa ve Uzak Doğu arasında önemli bir transit ülke olması ile Kars ve Kapıkule sınır kapılarının yoğun olarak kullanılması, ülkemizi önemli bir cazibe merkezi haline getirmiştir. Kuruluş yeri seçiminde ön önemli etkenler dikkate alındığında, gerek dopolama gerek bakım, gerekse diğer lojistik süreçlerin etkin ve verimli performansı için seçilecek yerin özellikle diğer taşıma modlarına kolay erişim sağlayan bir lokasyonda olması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Kapıkule-Kars arasında Türkiye'deki demiryolu ağının karayolu kavşak noktaları ile kesiştiği noktalar seçilerek 27 dal 31 düğümünden oluşan bir şebeke oluşturulmuştur. Yer ve güzergâh seçimini etkileyen 6 tane kriterler belirlenmiş pisagor bulanık analitik hiyerarşik prosesi ile kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş, COPRAS yöntemi ile alternatifler önem derecelerine göre sıralanmıştır. Bulunan değerler Dijkstra Algoritması kullanılarak Python programlama dilinde kodlanarak çözülmüştür. Kapıkule-Kars arasındaki hat kesiminde demiryolu güzergahının karayolu kavşak noktaları ile kesiştiği noktalarda en uygun yer ve rota seçimi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Şebeke optimizasyonu, Dijkstra algoritması, Demir ipekyol

Establishment Site Selection on the Iron Silk Road Route: Kapıkule-Kars Example

Abstract: The Silk Road has been one of the most important routes for trade between many civilizations throughout history. The Silk Road, which lost its importance as a result of the discovery of new trade routes after geographical discoveries, was revived as the Iron Silk Road by the route countries and opened to transportation as the Trans-Caspian International Transport Corridor. Particularly with the construction of the Marmaray tube passage, cargo coming from China goes to Europe using this passage, Turkey being an important transit country between Europe and the Far East, especially due to its geopolitical position, and the intense use of Kars and Kapıkule border gates, making our country an important one. has become a center of attraction. Considering the important factors in the selection of the establishment location, it is of great importance that the location to be chosen is in a location that provides easy access to other transportation modes, especially for the effective and efficient performance of both storage, maintenance and other logistics processes. In this study, a network consisting of 27 branches and 31 nodes was created by selecting the points where the railway network in Turkey intersects with the highway junctions between Kapıkule and Kars. Six criteria affecting location and route selection were determined, the weights of the criteria were determined with the Pythagorean fuzzy analytical hierarchical process, and the alternatives were ranked according to their importance with the COPRAS method. The found values were coded and solved in Python programming language using the Dijkstra Algorithm. In the line section between Kapıkule and Kars, the most suitable location and route selection was made at the points where the railway route intersects with the highway junctions.

Keywords: Network optimization, Dijkstra's algorithm, Iron silk road

Atıf için/Cite as: M.T. Yıkın, E. Özcan, "Demir İpek Yolu güzergahında kuruluş yeri seçimi: Kapıkule-Kars örneği," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 225-240, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1320992

1. Giriş

Tarihi İpek Yolu, Çin'den başlayarak Anadolu ve Akdeniz aracılığıyla Avrupa'ya kadar uzanan dünyaca ünlü bir ticaret yoludur[1]. İpek Yolu sadece tüccarların değil, aynı zamanda doğu ile batı arasında bilgelerin, orduların, fikirlerin, dinlerin ve kültürlerin de yolu olmuştur. 1980'lerden sonra ekonomik serbestleşme politikaların yaygınlaşması, mal ve sermaye hareketleri üzerindeki kısıtların kalkması ile teknolojik gelişmeler dünya ekonomisinde dengeleri değiştiren bir süreç başlatmıştır. Çin ve Hindistan'ın başını çektiği Asya ekonomilerinin dünya ekonomileri içerisinde oldukça büyük ticaret hacmine ulaşması, bu ekonomilerin çevresindeki Türk dünyasının da içerisinde olduğu ülkelerin de önemli bir konuma yükselmesine neden olmuştur.

Çin, 2013 yılında tarihi bir adım atarak Pekin'den Londra'ya ulaşan dünyanın bu kadim ve en eski ticaret yollarından biri olan İpek Yolu projesini güzergâh ülkeleri ile iş birliği içerisinde "Tek Kuşak Tek Yol" sloganı ile yeniden canlandırmıştır [2]. Tarihi İpek Yolundan ilham alınarak geliştirilen bu girişimin temel amacı, Asya'yı karadan ve denizden Avrupa'ya bağlayacak ticaret ve altyapı ağı oluşturarak ekonomik faaliyetlerin küreselleşmesini sağlamak, kazan-kazan anlayışı ile küresel iş birliğini arttırmak ve güzergâh ülkelerinde toplumsal refah yaratarak bölgesel ekonomik kalkınmayı ve işbirliğini teşvik etmektir [3]. Türkiye coğrafi ve jeopolitik konumu sayesinde en önemli güzergâh ülkelerinden birisi olarak bu iş birliğinden en fazla beklentisi olan ülke durumundadır. Dolayısıyla Türkiye; demiryolu, karayolu, tüp geçitler ve boğaz köprüleri başta olmak üzere birçok önemli yatırıma imza atmıştır [4].

2. Literatürde Yapılan Çalışmalar

İnan vd. Ege denizi üzerinde bulunan 61 liman ve bu limanlar arasında 604 adet düğümünden oluşan bir şebeke oluşturarak en kısa yol probleminin genetik algoritma yardımıyla belirlemişlerdir [5]. Boyacı vd. akaryakıt taşımacılığının karayolu, demiryolu ve denizyolunu kombinasyonundan oluşan arz ve talep noktaları arasındaki toplam ulaştırma maliyeti ve riskinin minimizasyonunu hedefleyen çok modlu çok ürünlü iki matematiksel model önerilmişlerdir [6]. Özdemir vd. İpekyolu Koridorlarında Pekin'den Londra'ya ulaşan demiryolu ağı için toplam 26 düğümünden oluşan bir graf oluşturulmuş ve modern İpekyolu veya orta koridor olarak adlandırılan güzergâhın Pekin-Londra arası en kısa demiryolu güzergâhı olduğu sonucuna ulaşmışlardır [7]. Yavuz vd. trafik kazalarına müdahale öncesi ve sonrasında ambulans hizmetlerinin olay yerine, hastanın da en yakın sağlık merkezine ulaştırılmasında yaşanan gecikmelerin ve aksaklıkları giderecek önlemlere ilişkin karar destek önerisi sunmuşlardır [8]. Prasetyo, havayolu uçuş süresini en aza indirebilmek için Welch-Powell ve Dijkstra algoritmalarını kullanılarak maliyetlerden tasarruf sağlayacak bir öneri geliştirmişlerdir [9]. Arman vd. bir lojistik firması için Düzce-Artvin arasındaki toplam mesafeyi ve süreyi en aza indiren bir rota önermişlerdir [10]. Ardana vd. metropoldeki bir tesisin başlangıç noktasından varış noktasına Dijkstra algoritması ile geçiş koridorlarının yerini veya aktarma noktasını belirlemişlerdir [11]. Suryani vd. çöp toplama araçlarının belirlenen noktalardan çöp toplama deposuna olan en kısa rotayı belirlemeyi amaçlayan bir uygulama geliştirmişlerdir [12]. Wibowo vd. Purbalingga'da hastaların şehrin meydanından toplu taşıma araçları ile en yakın hastaneye en kısa sürede ulaşmasını sağlayacak rotayı Dijkstra algoritması ile belirlemişlerdir [13]. Marni vd. Dijkstra algoritması ile android tabanlı bir online seyahat rezervasyon uygulama önerisi geliştirerek, kullanıcıların seyahat rezervasyonu yapmasını kolaylaştıran bir seyahat uygulaması önermişlerdir [14]. Li, karayolu yolcu taşıma merkezlerinin şehir içi trafik operasyonları üzerindeki etkisini azaltmak için kentsel karayolu ağında seyahat eden yolcular için en kısa yol bulmuştur [15]. Sangaiah vd. Çin'de ulaşım ağının depolama yapısını kurmak ve iki şehir arasındaki en kısa yolu Dijkstra ve Floyd algoritmaları ile bularak sonuçları zaman ve maliyet parametreleri açısından karşılaştırmışlardır[16]. Akpofure vd. ürünlerin üretim tesislerinden satış mağazalarına taşınması için en kısa mesafeyi bularak zaman ve maliyeti en aza indirecek bir öneri geliştirmişlerdir [17]. Behún vd. hammaddelerin çıkarıldığı yerden tüketim ya da işlenme noktasına Dijkstra

algoritmasını kullanarak en kısa yol ve sürede ulaştırılmasını sağlayacak bir öneri geliştirmişlerdir [18]. Patır, bir ilaç deposu için en kısa yol problemini dinamik programlama ile ele alarak, gelen siparişlerin en kısa zamanda karşılanması için alternatif bir yol belirlemişlerdir [19]. Fitriansyah vd. Endonezya'daki çeşitli turizm destinasyonlarının birbirlerine olan en kısa mesafesi bulunarak turistlerin seyahat sürelerinden tasarruf etmelerini amaçlamışlardır [20]. Makariye, şehir trafiğinde meydana gelen hızlı artışa çözüm bulmak için Dijkstra algoritması ile optimal güzergâh belirlenerek büyük şehirlerin trafik sorununa çözüm getirmek istemişlerdir [21]. Zulfiqar vd. lojistik firmalarının zaman ve maliyet tasarrufu yapmaları açısından Dijkstra ve Sweep algoritması kombinasyonu ile dağıtım planlaması yaparak nakliye den % 9,3 iyileşme ile yolculuk süresinden %50 oranında azalma sağlamışlardır [22]. Beker vd. lojistik süreçlerin en önemli unsurlarından biri olan depolama sürecinde kullanılan forkliftler için rota optimizasyonu yaparak depolardaki iş süreçlerinin kısaltılmasını amaçlamışlardır [23]. Khaing vd. modern bir kentsel bölgede coğrafi bilgi sistemi ve dijkstra algoritmasını kullanarak yaygın şehir içi otobüs güzergahlarındaki en kısa güzergahları temel alan bir prototip tasarlanmışlardır [24]. Li vd. yük taşımacılığı talebine dayalı ulaşım rotasının belirlenmesi için Dijkstra algoritması ile en kısa yolu bulmak için römorkla taşıma modeli üzerinden bir öneri sunmuşlardır [25]. Liu vd. Çin'de yemek teslimatındaki gecikmeleri önlemek ve en kısa sürede teslimini sağlamak için en kısa yol problemine çözüm getirilmişlerdir [26]. Dib vd. demiryolu ve karayolu yolcu ağlarında, seyahat süresi, maliyet gibi kriterleri dikkate alarak, genetik Algoritma yaklaşımı ile çok modlu bir ortamda bir en kısa yol önerisi sunmuşlardır. [27]. Şahin, bulanık analitik hiyerarşi süreci ile genişletilmiş Dijkstra algoritması kullanılarak insanlı ya da insansız gemilere yakıt tüketimi, zaman ve emniyet bakımından fayda sağlayacak bir öneri sunmuşlardır [28]. Bozyer vd. kapasite kısıtlı araç rotalama problemlerinin çözümüne yönelik bir yöntem geliştirerek veri kümelerine uygulanmış ve elde edilen sonuçları tartışmışlardır [29]. Pamučar vd. şehir içi ulaşım ağında tehlikeli maddeler için taşıma rotasının belirlenmesine yönelik bir model önerisi geliştirerek çeşitli risk kriterlerinin yanı sıra maliyeti en aza indirecek yeni bir yaklaşım önermişlerdir [30]. Gökcan, en kısa yol problemi ile ilgili bazı algoritmalar incelenmiş ve bunlardan Dijkstra Algoritması ile Manisa İline ait bir katı atık toplama araçları için en uygun yol güzergâh belirlemişlerdir [31].

Kapıkule-Kars arasında Türkiye'deki demiryolu ağının karayolu kavşak noktaları ile kesiştiği noktalar seçilerek 27 dal 31 düğümden oluşan bir şebeke oluşturulmuştur. Yer ve güzergâh seçimini etkileyen 6 tane kriterler belirlenmiş pisagor bulanık analitik hiyerarşik prosesi ile kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş, COPRAS yöntemi ile alternatifler önem derecelerine göre sıralanmıştır. Bulunan değerler Dijkstra Algoritması kullanılarak Python programlama dilinde kodlanarak çözülmüştür. Kapıkule-Kars arasındaki hat kesiminde demiryolu güzergahının karayolu kavşak noktaları ile kesiştiği noktalarda en uygun yer ve rota seçimi yapılmıştır.

Yapılan literatür araştırmasında benzer problemlerin, Floyd Warshall, Dijkstra, Prim, Ford Fulkerson, Bellman Ford gibi en kısa yol algoritmalarının farklı çok kriterli karar verme yöntemleri ile harmanlanarak çözüldüğü görülmektedir. Çalışmada optimal sonuç vermesi, yönlü graf içermesi, bütün düğümlere uğrama zorunluluğu olmaması, negatif değerler içermemesi, literatürde çok kullanılan bir algoritma olması nedeni ile Dijkstra Algoritması tercih edilmiştir. Çalışmada belirlenen kriterler birbirine yakın önem derecelerine sahip kriterlerdir. Bu nedenle belirlenen bütün kriterleri kendi içerisinde karşılaştırma olanağı verdiğinden klasik analitik hiyerarşik prosesi (AHP) yöntemi yerine pisagor bulanık AHP yöntemi tercih edilmiştir. AHP yöntemine göre elde edilen kriter ağırlıkları alternatiflerin önem derecelerine sıralanması için yönteminin güvenilirliği ve doğruluğu birçok bilim insanı tarafından kabul edilen ve günümüzde karar vericiye özellikle mühendislik ve farklı yönetim alanları olmak üzere birçok alanda kullanılabilir esneklik sağlaması açısından COPRAS yöntemi tercih edilmiştir.

Özellikle Çin Halk Cumhuriyeti'nin girişimi ile canlandırılan tarihi İpek Yolunun barındırdığı fırsatların yanında ülkemizin coğrafi konumunun barındırdığı avantajlar ile son yıllarda başta

Marmaray tüp geçidi ve köprü projeleri olmak üzere; yapılan entegre altyapı yatırımları sektör paydaşlarının cazibesini orta koridora yöneltmiştir. Bu çalışmada sektör paydaşlarının beklentilerinin karşılanması ve koridorun avantajlarından daha fazla yararlanmalarının sağlanması amacıyla Kapıkule-Kars güzergahı üzerinde özellikle kara yolu bağlantılı kavşak noktaları üzerinde kuruluş yeri seçimi yapılmış, belirlenen kriterler çerçevesinde rekabet üstünlüğü sağlayacak bir öneri sunulmuştur.

3. Kullanılan Yöntemler

3.1. Pisagor bulanık analitik hiyerarşi prosesi (AHP)

Analitik hiyerarşi prosesi (AHP); Saaty tarafından geliştirilmiş olan çok kriterli karar verme yöntemidir. En doğru karara ulaşılabilmesi için gerekli olan somut veya soyut faktörleri inceleyen, karmaşık yapıları içine dâhil edebilen ve bu etmenler ile hesaplama yapabilen bir çözüm yöntemidir [32].

AHP yönteminin sezgisel bulanık kümelerin belirsizliğini tam olarak karşılayamamasından dolayı Yager tarafından pisagor bulanık kümeler ortaya atılmış ve sezgisel bulanık kümelere genelleme olarak geliştirilmiştir [33].

Geleneksel AHP yönteminde alternatiflerin ikili karşılaştırılması sırasında öznel ve nesnel kriterlerin karşılaştırılması yapılabilir. Yöntem, hem karar vericilerin tutarlı olmasını sağlamakta hem de ikili karşılaştırmalarla karar vericilerin işini kolaylaştırmaktadır. Uzman görüşlerinden faydalansa bile, insanın değer yargılarını tam olarak yansıtmamaktadır. Bu nedenle, geleneksel AHP ile bulanık mantık kombinlenerek Bulanık AHP geliştirilmiştir. Geleneksel AHP yönteminden farklı olarak kesin rakamlar değil de bir dizi değerler bütünü kullanılarak kriterler karşılaştırılmaktadır. [34]. Pisagor Bulanık AHP yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [35].

Adım 1: Dilsel değişkenlere dayalı ikili karşılaştırma matrisi $A = (a_{ij})_{m \times m}$ oluşturulur.

Adım 2: Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak farklar matrisi $D = (d_{ij})_{m \times m}$ oluşturulur.

$$d_{ijL} = \mu_{ijL}^2 - v_{ijL}^2 \quad (1)$$

$$d_{ijU} = \mu_{ijU}^2 - v_{ijU}^2 \quad (2)$$

Adım 3: Çarpımsal matris $S = (s_{ij})_{m \times m}$ Eşitlik 3 ve 4 kullanılarak hesaplanır.

$$s_{ijL} = \sqrt{1000^{d_{ijL}}} \quad (3)$$

$$s_{ijU} = \sqrt{1000^{d_{ijU}}} \quad (4)$$

Adım 4: Tereddüt dereceleri $H = (h_{ij})_{m \times m}$ Eşitlik 5 kullanılarak belirlenir.

$$h_{ij} = 1 - (\mu_{ijU}^2 - \mu_{ijL}^2) - (v_{ijU}^2 - v_{ijL}^2) \quad (5)$$

Adım 5: Normalize edilmemiş ağırlıklar $T = (t_{ij})_{m \times m}$ Eşitlik 6 yardımıyla hesaplanır.

$$t_{ij} = \left(\frac{s_{ijL} + s_{ijU}}{2} \right) h_{ij} \quad (6)$$

Adım 6: Kriter ağırlıkları w_i Eşitlik 7 kullanılarak belirlenir.

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^m t_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m t_{ij}} \quad (7)$$

3.2. COPRAS yöntemi

COPRAS yöntemi ise Zavadskas ve Kaklauskas tarafından 1996 yılında geliştirilmiştir[36]. Genellikle yönetim, mühendislik ve çevre bilimi gibi alanlarda kullanılır. COPRAS, çeşitli kriterlerin dikkate alınması gereken karmaşık karar problemlerin çözümünde ağırlıklı olarak kullanılır. Bu yöntemin diğer çok kriterli karar verme yöntemlerinden farkı ise, seçeneklerin birbirleriyle kıyaslanması ve birbirlerine olan üstünlüklerinin yüzdesel olarak gösterilebilmesidir. Yöntemin aşamaları aşağıdaki gibidir [37].

Adım 1- Karar matrisinin oluşturulur.

$$X = \begin{matrix} & x_{11} & x_{12} & x_{1m} \\ x_{21} & & & \\ & x_{n1} & x_{n2} & x_{nm} \end{matrix} \quad (8)$$

Adım 2- Adım 1' de oluşturulan karar matrisi Eşitlik 8 kullanılarak normalleştirilir. Buradaki q_i kriter ağırlıklarını göstermektedir. COPRAS yönteminde kriter ağırlıklarını belirleme aşaması olmayıp, ağırlıklar bir puanlama yöntemi kullanılarak belirlenir. Her bir kriterin x_i 'ye göre ağırlıklandırılmış d_{ij} değerlerinin toplamı ilgili kriterin ağırlık değeri olan q_i 'ye eşit olup bu hesaplama eşitlik 9'da gösterilmektedir.

$$d_{ij} = \frac{x_{ij}q_i}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}, \quad i=1,m; \quad j=1,n \quad (9)$$

Adım 3- Ağırlıklı indeksler toplanır. Faydasız kriterlere göre hesaplanan $S-j$ değerinin küçük, aynı şekilde faydalı kriterlere göre hesaplanan $S+j$ değerinin ise büyük olmasının amaca ulaşmada daha olumlu etkisi olmaktadır.

Adım 4- Seçeneklerin göreceli önem değerinin hesaplanır. Karşılaştırması yapılan her bir seçeneğin göreceli önem değeri olan Q_j , Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanır. Elde edilen Q_j değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır. Q_j değerinin büyük olması göreceli önem değerinin de o derece büyük olduğu anlamına gelir.

$$q_{ij} = \sum_{j=1}^n d_{ij}, \quad i=1,m; \quad j=1,2 \quad (10)$$

Adım 5- Seçeneklerin fayda derecesini belirlenir. Her bir seçeneğin fayda derecesi Eşitlik 11 kullanılarak belirlenir. En iyi seçeneğin fayda derecesi 100 puan olur ve diğer seçenekler bu puana göre oranlanır.

$$N_j = \frac{Q_j}{Q_{\max}} * 100 \% \quad (11)$$

3.3. Dijkstra algoritması

Dijkstra Algoritması, bir graf üzerinde belirlenen başlangıç ve hedef düğümleri arasındaki en kısa güzergâhın bulunmasını sağlayan bir algoritmadır. Hollandalı bilgisayar bilimci Edsger Dijkstra tarafından 1959 yılında yayınlanan en kısa yol algoritmasıdır[38]. Algoritma, ağırlıklı ve yönlü graflar için geliştirilmiştir. En kısa yolun belirlenmesinde, bir düğümden diğer bir düğüme geçerken olası en iyi yerel çözümü göz önüne alan Greedy yaklaşımı kullanılır ve iterasyonun her adımında bir sonraki düğüme ilerleme Greedy yaklaşımına göre yapılır [39].

Dijkstra algoritmasının avantajı diğer algoritmalara göre daha doğru ve kesin sonuçlar vermesi, bütün düğümlere uğrama zorunluluğu olmaması, döngülü veya döngüsüz tüm şebekelere uygulanabilmesi, dezavantajı ise yalnızca pozitif ağırlık bulunduran şebekelere uygulanabilmesidir. Algoritmanın çalışma adımları aşağıda gösterilmiştir. [40]

İlk olarak Başlangıç düğümü seçilir ve “sıfır” değeri atanır. Bu düğümden gidilebilen diğer tüm düğümlerin ağırlığı “geçici puan” olarak hesaplanır.

$$\bar{S} = \{s\}, S = N - \{s\}, \quad \begin{array}{ll} 0 & j = s \text{ ise} \\ Lj = \{Lsj\} & j \in \Gamma \text{ ise} \\ \infty & j \notin \Gamma \text{ ise} \end{array}$$

Başlangıç düğümünden direkt olarak gidilen düğümlerden en az puana sahip olan düğüm işaretlenir, diğerleri ise aynı puanla devam eder. Direkt olarak ulaşılamayan diğer düğümlerin puanı “sonsuz değer” olarak varsayılır. En az puana sahip olan düğüm kalıcı olarak belirlenir.

$$\begin{array}{l} \text{Eğer } \Gamma k \in S \text{ ise } Lk = \min_{(j \in S)} \{Lj\} \\ \text{Değilse } S = S \cup \{k\}, \bar{S} = \bar{S} - \{k\} \end{array}$$

Kalıcı düğümden yola çıkarak henüz işaretlenmemiş diğer düğümlerin puanı hesaplanır. Daha az puanlı bir yol bulunduğunda düğüm puanı güncellenir. Başlangıç ve ulaşılması istenilen düğümler sabitlene kadar iterasyon devam eder, tüm düğümler sabitlendiğinde ise işlem biter.

$$\begin{array}{l} j \in \Gamma k \cap \bar{S} \text{ olmak üzere tüm } j \text{ düğümleri için;} \\ Lj = \min\{Lj \cdot Lk + Lkj\} \end{array}$$

- N : Şebekedeki tüm düğümlerin kümesi
- s : Kalıcı etikete sahip olan düğümlerin kümesi
- \bar{S} : Geçici etikete sahip olan düğümlerin kümesi
- Γk : k düğümüne direkt bağlı olan düğümlerin kümesi
- Lj : j düğümünün başlangıç düğümüne olan uzaklığı
- Lkj : Komşu düğümler olan k ve j düğümleri arasındaki uzaklık

4. Uygulama

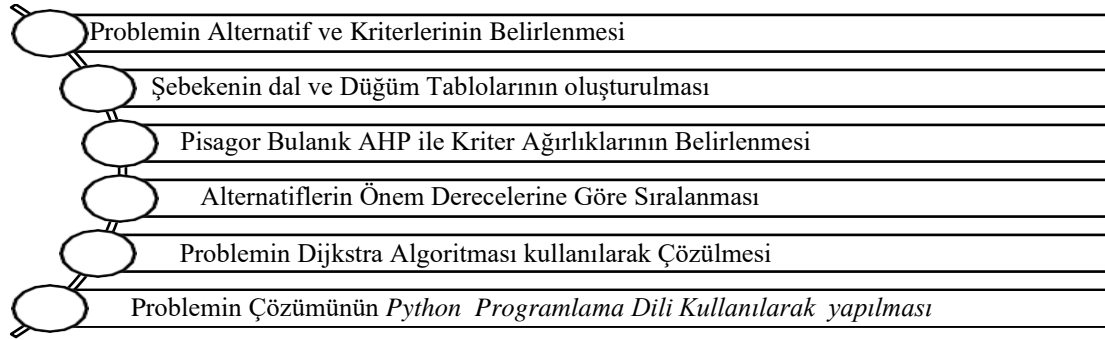
Sektör paydaşlarının görüş ve beklentileri, günlük hayat verileri ve demiryolu devlet politikaları çerçevesinde 6 adet kriter belirlenmiştir. Bu kapsamda sektör paydaşları tarafından en çok dikkate alınan bakım atölye (A1), mesafe (A2), tren hat kapasitesi (A3), turnist süresi (A4), tesis ve elleçleme (A5), taşıma maliyeti (A6) gibi kriterler ele alınmıştır. Çalışmada ele alınan kriterlere ait veriler, dünya bankası tarafından yıllık olarak yayınlanan lojistik performans indeksi raporları, TCDD Taşımacılık AŞ yıllık taşıma verileri, Trans-Hazar Uluslararası Taşımacılık Rotasının Geliştirilmesi Koordinasyon Komitesi (TITR) tarafından yayınlanan orta koridor taşıma verileri ve Birleşmiş Milletler Asya Pasifik Ekonomik ve Sosyal Komisyonu (ESCAP) çalışmalarından elde edilmiştir.

Turnist süresi bir vagonun yükleme istasyonundan çıktıktan sonra varış istasyonuna gidip tekrar çıkış istasyonu veya herhangi bir istasyona yükleme için geldiği zaman dilimi içerisinde arada geçen süreyi ifade etmektedir. Güzergahın hat tren kapasitesi açısından yetersiz blok tren ağına sahip olması diğer kriterler açısından uygun olsa bile süreci olumsuz etkileyecektir. Önemli kriterlerden biri de sınır garlarına olan mesafedir. Nitekim yakınlık hem seyir sürelerini hem de vagonların turnist süresini kısaltmaktadır.

Demir İpek Yolu hattında yapılan taşımaların konteyner ile yapılması, seçilecek noktaların konteyner aktarımına uygun tesis ve ekipmana sahip olmasını gerektirmektedir. TCDD taşımacılık ve diğer 3. şahıs çeken çekilen araçlarının periyodik revizyon ve tamir bakımlarının zamanında yapılması için tren güzergahında bakım atölyelerinin olması ve bakımların zamanında yapılması büyük önem arz etmektedir. Uluslararası taşımalarda başta navlun olmak üzere; taşımayı etkileyen diğer maliyet kalemleri yer ve güzergâh seçiminde önemli bir kriter oluşturmaktadır. Diğer kriterler açısından uygun olan bir alternatifin maliyet açısından dezavantajlı olması seçimi olumsuz yönden etkileyecektir.

Türkiye'deki demiryolu ağının karayolu kavşak noktaları ile kesiştiği noktalar seçilerek Kapıkule-Kars arasında yer ve güzergâh seçimini etkileyen 27 dal 31 düğümden oluşan bir şebeke oluşturulmuştur. Yer ve güzergâh seçimini etkileyen 6 tane kriterler belirlenmiş, kriterlerin ağırlıkları pisagor bulanık analitik hiyerarşik prosesi ile belirlenmiş, kriterlere ait dal ağırlıkları COPRAS ile sıralanmıştır. Bulunan değerler literatürde Dijkstra Algoritması kullanılarak Python programlama dilinde kodlanarak çözülmüştür. Kapıkule-Kars arasındaki hat kesiminde demiryolu güzergahının karayolu kavşak noktaları ile kesiştiği noktalarda yer ve rota seçimi yapılmıştır.

Türkiye gerek jeopolitik konumu, gerek Marmaray ve orta koridor yatırımları ile bütün dünya ülkelerinin dikkatini çekmiştir. Konumu itibari ile trans hazar uluslararası taşıma koridorunun kalbi konumunda bulunan ülkemiz koridorun sağladığı avantajlardan payına düşeni artırmak ve diğer taşıma koridorlarından da yük çekmek için hem altyapı yatırımlarını artırmakta, hem de güzergâh ülkeleri ile işbirliğini geliştirmek için yoğun çabalar göstermektedir. Bu kapsamda demir İpekyolu taşıma koridoruna yatırım yapmak isteyen sektör paydaşları için en belirleyici konu doğru yer seçimidir. Bu çalışmada, tüm paydaşları memnun edecek bir taşıma operasyonu için belirlenen kriterler ve alternatifler çerçevesinde kuruluş yeri ve rota seçimi yapılarak literatüre katkı sunulmuştur. Problemin çözümüne ilişkin akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Problemin akış şeması

Başlangıç noktası Kapıkule sınır kapısı bitiş noktası Kars Gürcistan sınır kapısı Ahılkelek istasyonu olan ve 27 adet daldan oluşan şebeke dal tablosu Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Şebekenin dalları

| Dal Adı | İstasyon Adı | Dal Adı | İstasyon Adı |
|---------|--------------|---------|--------------|
| A | Kapıkule | O | Konya |
| B | Derince | P | Karaman |
| C | Arifiye | R | Ulukışla |
| D | Hasanbey | S | Kayseri |
| E | Ankara | T | Mersin |
| F | Zonguldak | U | Toprakkale |
| G | Çankırı | V | Gölbaşı |
| H | Yahşihan | Y | Malatya |

| | | | |
|---|----------|----|------------|
| I | Alsancak | Z | Sivas |
| J | Manisa | X | Divriği |
| K | Uşak | W | Erzurum |
| L | Afyon | Q | Kars |
| M | Denizli | AA | Ahhalkelek |
| N | Dinar | | |

Başlangıç noktası Kapıkule sınır kapısı bitiş noktası Kars Gürcistan sınır kapısı Ahılkelek istasyonu olan ve 31 adet düğümden oluşan şebeke düğüm tablosu Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Şebekenin düğümleri

| Düğüm No | Düğüm Adı | Düğüm No | Düğüm Adı |
|----------|-------------------|----------|--------------------|
| 1 | Kapıkule-Derince | 17 | Afyon-Hasanbey |
| 2 | Derince-Arifiye | 18 | Afyon-Konya |
| 3 | Arifiye-Hasanbey | 19 | Konya-Ankara |
| 4 | Hasanbey-Afyon | 20 | Konya-Karaman |
| 5 | Hasanbey-Ankara | 21 | Karaman-Ulukışla |
| 6 | Ankara-Yahşihan | 22 | Mersin-Ulukışla |
| 7 | Yahşihan-Kayseri | 23 | Ulukışla-Kayseri |
| 8 | Kayseri-Sivas | 24 | Mersin-Toprakkale |
| 9 | Zonguldak-Çankırı | 25 | Toprakkale-Gölbaşı |
| 10 | Çankırı-Yahşihan | 26 | Gölbaşı-Malatya |
| 11 | İzmir-Manisa | 27 | Malatya-Divriği |
| 12 | Manisa-Uşak | 28 | Sivas-Divriği |
| 13 | Uşak-Afyon | 29 | Divriği-Palandöken |
| 14 | İzmir-Denizli | 30 | Palandöken-Kars |
| 15 | Denizli-Dinar | 31 | Kars-Ahhalkelek |
| 16 | Dinar-Afyon | | |

4.1. Dal büyüklüğünü belirleyecek kriterlerin ağırlıklandırılması

Problemin çözümü için belirlenen kriterler çok kriterli karar verme algoritmalarından Pisagor Bulanık AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmış, bulunan değerler COPRAS yöntemi ile önem derecelerine göre sıralanmıştır.

Tablo 3. Dilsel değişkenler ve aralıklı pisagor bulanık sayılar

| Dilsel Değişken | | Aralıklı Pisagor Bulanık Sayılar | | | |
|----------------------------|----|----------------------------------|-------|------|------|
| | | mü(L) | mü(U) | v(L) | v(U) |
| Kesinlikle Düşük Önemli | KD | 0,00 | 0,00 | 0,90 | 1,00 |
| Çok Düşük Önemli | ÇD | 0,10 | 0,20 | 0,80 | 0,90 |
| Düşük Önemli | D | 0,20 | 0,35 | 0,65 | 0,80 |
| Ortalamanın Altında Önemli | OA | 0,35 | 0,45 | 0,55 | 0,65 |
| Eşit | E | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Ortalama Önemli | O | 0,45 | 0,55 | 0,45 | 0,55 |
| Ortalamanın Üstünde Önemli | OÜ | 0,55 | 0,65 | 0,35 | 0,45 |
| Yüksek Önemli | Y | 0,65 | 0,80 | 0,20 | 0,35 |
| Çok Yüksek Önemli | ÇY | 0,80 | 0,90 | 0,10 | 0,20 |
| Kesinlikle Yüksek Önemli | KY | 0,90 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |

Pisagor bulanık AHP yönteminde belirlenen kriterlerin kendi aralarında ikili karşılaştırılması tablo 3'te verilen dilsel değişken ve aralıklı Pisagor bulanık sayılar tablosundaki değerlere göre yapılmaktadır. Tablo 3'te verilen değerlere göre belirlenen kriterler karşılaştırılarak Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Dilsel değişkenlere dayalı ikili karşılaştırma matrisi

| Kriterler | (A1) | (A2) | (A3) | (A4) | (A5) | (A6) |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| (A1) | E | O | Y | OA | E | O |
| (A2) | Y | E | OA | OA | OÜ | OA |
| (A3) | ÇY | Y | E | O | ÇY | O |
| (A4) | ÇY | ÇY | O | E | Y | O |
| (A5) | O | OA | OA | OA | E | OA |
| (A6) | Y | O | O | O | ÇY | E |

Kriterlerin ikili karşılaştırılma matrisi olan $A = (a_{ij})_{m \times m}$ Tablo 4'te verilmiştir. Tabloda karşılıklı kıyaslamaları yapılan kriterlerin birbirlerine göre üstünlükleri dilsel değişken cinsinden gösterilmiştir.

Pisagor Bulanık AHP yöntemi ile ağırlıkları belirlenen kriterler uzman görüşleri, literatür araştırmaları ve TCDD taşımacılık istatistik verileri ve gözlemci raporları kapsamında belirlenen kriterler, bulanık pisagor sayılara göre kendi aralarında iki karşılaştırılmış ve Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi

| A1 | | A2 | | | | A3 | | | | | |
|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| mü(L) | mü(U) | v(L) | v(U) | mü(L) | mü(U) | v(L) | v(U) | mü(L) | mü(U) | v(L) | v(U) |
| 0,20 | | 0,20 | | 0,50 | | 0,50 | | 0,50 | | 0,50 | |
| 0,73 | | 0,28 | | 0,20 | | 0,20 | | 0,40 | | 0,40 | |
| 0,85 | | 0,15 | | 0,73 | | 0,28 | | 0,20 | | 0,20 | |
| 0,85 | | 0,15 | | 0,85 | | 0,15 | | 0,50 | | 0,50 | |
| 0,50 | | 0,50 | | 0,40 | | 0,60 | | 0,40 | | 0,60 | |
| 0,73 | | 0,28 | | 0,50 | | 0,50 | | 0,50 | | 0,50 | |

Tablo 6. Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi

| A1 | | A2 | | | | A3 | | | | | |
|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| mü(L) | mü(U) | v(L) | v(U) | mü(L) | mü(U) | v(L) | v(U) | mü(L) | mü(U) | v(L) | v(U) |
| 0,50 | | 0,50 | | 0,20 | | 0,20 | | 0,50 | | 0,50 | |
| 0,40 | | 0,60 | | 0,60 | | 0,40 | | 0,40 | | 0,60 | |
| 0,50 | | 0,50 | | 0,85 | | 0,15 | | 0,50 | | 0,50 | |
| 0,20 | | 0,60 | | 0,73 | | 0,28 | | 0,50 | | 0,50 | |
| 0,40 | | 0,60 | | 0,50 | | 0,20 | | 0,40 | | 0,60 | |
| 0,50 | | 0,50 | | 0,55 | | 0,85 | | 0,20 | | 0,20 | |

Tereddüt dereceleri $H = (h_{ij})_{m \times m}$ Eşitlik 5 kullanılarak belirlenmiştir. Normalize edilmemiş ağırlıklar $T = (t_{ij})_{m \times m}$ Eşitlik 6 yardımıyla hesaplandıktan sonra kriter ağırlıkları Eşitlik 7 kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları

| Kriterler | Ağırlıklar | Sıralama |
|-----------|--------------|----------|
| A1 | Bakım Atölye | 0,05 |
| | | 5 |

| | | | |
|----|---------------------|------|---|
| A2 | Mesafe | 0,09 | 4 |
| A3 | Hat Tren kapasitesi | 0,29 | 2 |
| A4 | Turnist Süresi | 0,32 | 1 |
| A5 | Tesis ve Elleçleme | 0,03 | 6 |
| A6 | Taşıma Maliyeti | 0,21 | 3 |

Kriterlerin birbirlerine karşı ağırlıkları Pisagor Bulanık AHP ile hesaplanmış ve nihai sonuçlar Tablo 7’ de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde en önemli 3 kriterin turnist süresi, tren hat kapasitesi ve taşıma maliyeti olduğu sonucuna varılmıştır.

4.2. Alternatiflerin dal büyüklüklerinin belirlenmesi

Kapıkule-Kars arasında yer ve güzergâh seçimini etkileyen 27 dal 31 düğümden oluşan bir şebeke oluşturulmuş, rota seçimine etki eden kriter ağırlıkları pisagor bulanık analitik hiyerarşik prosesi ile hesaplandıktan sonra şebekeni dal ağırlıkları COPRAS yöntemi ile sıralanmış ve Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Karar matrisi

| Alternatifler | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 |
|---------------|-----|-----|----|----|----|----|
| 1 | 121 | 391 | 3 | 5 | 5 | 1 |
| 2 | 15 | 48 | 3 | 5 | 5 | 1 |
| 3 | 58 | 187 | 3 | 5 | 5 | 1 |
| 4 | 53 | 172 | 3 | 5 | 5 | 1 |
| 5 | 73 | 237 | 3 | 4 | 5 | 1 |
| 6 | 29 | 94 | 5 | 4 | 5 | 1 |
| 7 | 91 | 294 | 5 | 4 | 5 | 1 |
| 8 | 69 | 223 | 3 | 4 | 3 | 1 |
| 9 | 97 | 313 | 5 | 4 | 4 | 1 |
| 10 | 37 | 119 | 5 | 4 | 4 | 1 |
| 11 | 21 | 67 | 2 | 5 | 3 | 1 |
| 12 | 69 | 221 | 2 | 5 | 3 | 0 |
| 13 | 42 | 135 | 2 | 5 | 3 | 0 |
| 14 | 83 | 267 | 1 | 5 | 4 | 1 |
| 15 | 41 | 133 | 1 | 5 | 4 | 1 |
| 16 | 40 | 130 | 1 | 5 | 4 | 1 |
| 17 | 53 | 172 | 3 | 5 | 4 | 1 |
| 18 | 82 | 266 | 3 | 5 | 4 | 1 |
| 19 | 209 | 675 | 3 | 4 | 4 | 1 |
| 20 | 32 | 103 | 3 | 4 | 4 | 1 |
| 21 | 42 | 136 | 3 | 4 | 3 | 1 |
| 22 | 47 | 150 | 5 | 4 | 5 | 1 |
| 23 | 58 | 187 | 5 | 4 | 4 | 0 |
| 24 | 45 | 146 | 5 | 4 | 5 | 1 |
| 25 | 62 | 201 | 5 | 4 | 3 | 0 |
| 26 | 35 | 113 | 5 | 3 | 3 | 0 |
| 27 | 63 | 204 | 5 | 3 | 4 | 1 |
| 28 | 54 | 173 | 3 | 3 | 4 | 1 |
| 29 | 112 | 361 | 3 | 2 | 3 | 0 |
| 30 | 70 | 226 | 3 | 2 | 3 | 1 |
| 31 | 33 | 108 | 1 | 1 | 3 | 0 |

Karar matrisi Eşitlik 8 kullanılarak normleştirilmiştir. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi eşitlik 9’da ile bulunduktan sonra faydasız kriterlere göre $S-j$ değeri, aynı faydalı kriterlere göre $S+j$ değeri ise hesaplanır. Karşılaştırması yapılan her bir seçeneğin göreceli önem

değeri olan Q_j , Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanıp büyükten küçüğe doğru sıralanır. Q_j değerinin büyük olması göreceli önem değerinin de o derece büyük olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 9. Alternatiflerin tercih sırası

| Alternatif | N_j |
|------------|-------|
| 1 | 37 |
| 2 | 26 |
| 3 | 31 |
| 4 | 31 |
| 5 | 29 |
| 6 | 9 |
| 7 | 18 |
| 8 | 29 |
| 9 | 19 |
| 10 | 11 |
| 11 | 34 |
| 12 | 60 |
| 13 | 57 |
| 14 | 47 |
| 15 | 43 |
| 16 | 43 |
| 17 | 31 |
| 18 | 34 |
| 19 | 40 |
| 20 | 23 |
| 21 | 25 |
| 22 | 12 |
| 23 | 34 |
| 24 | 12 |
| 25 | 35 |
| 26 | 22 |
| 27 | 9 |
| 28 | 19 |
| 29 | 44 |
| 30 | 14 |
| 31 | 100 |

Her bir seçeneğin fayda derecesi Eşitlik 11 kullanılarak belirlenmiştir ve Tablo 9'da gösterilmiştir.

4.3. En kısa yol probleminin çözümü

Yer ve güzergâh seçimini etkileyen 6 tane kriterin pisagor bulanık analitik hiyerarşik prosesi ile ağırlıklarının belirlenmiş, çok kriterli karar verme yöntemlerinden COPRAS ile alternatifler önem derecelerine göre sıralanmıştır. Bulunan değerler literatürde en sık kullanılan en kısa yol algoritmalarından biri olan Dijkstra Algoritması kullanılmıştır. Algoritmanın yazımı aşağıda gösterilmiştir.

```
from collections import defaultdict
```

```
# düğümlerden oluşan grafın oluşturulması
```

```
def build_graph(edge_list):
```

```
    graph = defaultdict(list)
```

```
    seen_edges = defaultdict(int)
```

```
    for src, dst, weight in edge_list:
```

```
        seen_edges[(src, dst, weight)] += 1
```

```

# düğüm ağırlıklarının kontrolü
if seen_edges[(src, dst, weight)] > 1:
    continue

# düğüm ağırlıklarının güncellenmesi
graph[src].append((dst, weight))
graph[dst].append((src, weight))
return graph

# dijkstra algoritmasının oluşturulması
def dijkstra(graph, src, dst=None):
    nodes = []
    for n in graph:
        nodes.append(n)
        nodes += [x[0] for x in graph[n]]

    q = set(nodes)
    nodes = list(q)
    dist = dict()
    prev = dict()
    for n in nodes:
        dist[n] = float('inf')
        prev[n] = None

    dist[src] = 0

    while q:
        u = min(q, key=dist.get)
        q.remove(u)

        if dst is not None and u == dst:
            return dist[dst], prev

        for v, w in graph.get(u, ()):
            alt = dist[u] + w
            if alt < dist[v]:
                dist[v] = alt
                prev[v] = u

    return dist, prev

# düğüm ağırlıklarına göre güzergahın oluşturulması
def find_path(pr, node):
    p = []
    while node is not None:
        p.append(node)
        node = pr[node]
    return p[::-1]

# bağlantılı düğümlerin birbirlerine olan uzaklıkları
if __name__ == "__main__":
    edges = [
        ("A", "B", 37),

```

```

("B", "C", 26),
("C", "D", 31),
("D", "L", 31),
("D", "E", 29),
("E", "H", 9),
("H", "S", 19),
("S", "Z", 29),
("F", "G", 19),
("G", "H", 11),
("I", "J", 34),
("J", "K", 60),
("K", "L", 57),
("I", "M", 47),
("M", "N", 43),
("N", "L", 43),
("L", "D", 31),
("L", "O", 34),
("O", "E", 40),
("O", "P", 23),
("P", "R", 25),
("T", "R", 22),
("R", "S", 34),
("T", "U", 22),
("U", "V", 35),
("V", "Y", 22),
("Y", "X", 9),
("Z", "X", 19),
("X", "W", 44),
("W", "Q", 14),
("Q", "AA", 100),
]
g = build_graph(edges)

# sonucun yazdırılması
print("Dijkstra Çözümü ")
d, prev = dijkstra(g, "A", "AA")
path = find_path(prev, "AA")
print("A düğümünden AA düğümüne olan en kosa yolun toplam uzunluğu: {} km,\n"
      " güzergah ise = {}".format(d, path))

```

Dijkstra Algoritması kullanılarak problemin kod ekranı oluşturulmuş, Python programlama dili ile kodlanarak çözülmüş ve sonuç Şekil 2’de gösterilmiştir.

Tablo 10. Problemin python programlama dili sonuç ekranı

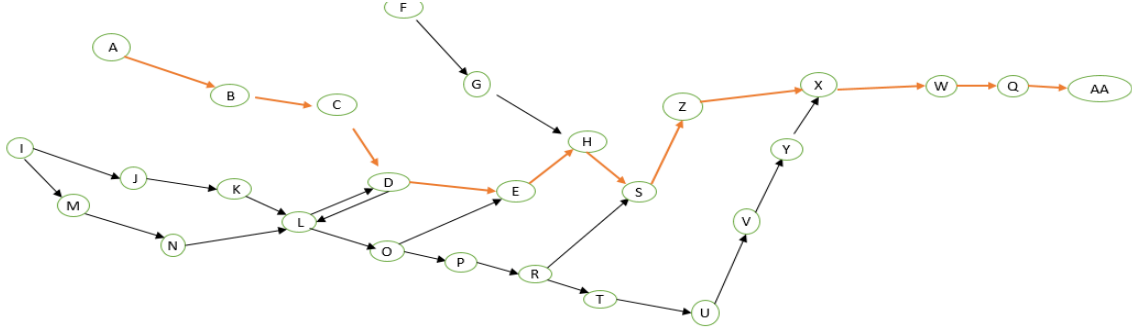
```

C:\Users\01000495\PycharmProjects\pythonProject17\venv\Scripts\python.exe C:/
Dijkstra Çözümü
A düğümünden AA düğümüne olan optimal rotanın toplam skoru : 257 puan,
güzergah ise = ['A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'H', 'S', 'Z', 'X', 'W', 'Q', 'AA']
Process finished with exit code 0

```

Kapıkule-Kars arasındaki hat kesiminde demiryolu güzergahının karayolu kavşak noktaları ile kesiştiği noktalarda en uygun rotanın toplam skoru 257 puan olarak bulunmuştur.

Rotanın düğüm adlarına göre; [A → B → C → D → E → H → S → Z → X → W → Q → AA], İstasyon adlarına göre [Kapıkule, Derince, Arifiye, Hasanbey, Ankaraya, Kayseri, Sivas, Divriği, Erzurum, Kars, Ahılkelek] olduğu sonucuna varılmıştır. Sonucun graf gösterimi Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Sonucun graf gösterimi

5. Sonuç ve Öneriler

Türkiye'nin modern İpek Yolunda orta koridorun merkezinde yer alması büyük bir avantaj sağlamaktadır. Demiryolu ile gelen yüklerin ülkemizi transit geçerek Avrupa ve Asya kıtalarına dağılması büyük bir lojistik potansiyeli beraberinde getirmektedir. Orta koridor üzerinde efektif verim, kombine taşımacılık uygulamaları ile sağlanacaktır. Bu çalışmada orta koridor üzerinden Türkiye'ye gelen ve diğer ülkelere devam edecek bir yük taşıması için ideal güzergah yer seçimi problemine çözüm getirilmiştir. Lojistik sektörü paydaşlarınca önem arz eden kriterler öncelikle bulanık pisagor bulanık analitik hiyerarşik prosesi ile ağırlıklandırılmış en önemli 3 kriterin turnist süresi, tren hat kapasitesi ve taşıma maliyeti olduğu sonucuna varılmıştır.

Turnist süresi bir vagonun yükleme istasyonundan çıktıktan sonra varış istasyonuna gidip tekrar çıkış istasyonu veya herhangi bir istasyona yükleme için geldiği zaman dilimi içerisinde arada geçen süreyi ifade etmektedir. Turnist süresinin uzun olması sürecin, operasyonun ve yatırımın başarısız olmasına veya yerince başarılı olmamasına neden olacaktır.

Kuruluş yeri seçiminde en önemli kriterlerden biri de seçilecek güzergahın hat tren kapasitesinin yeterli olmasıdır. Diğer kriterler açısından uygun olsa bile tren hat kapasitesinin yetersiz olması süreci olumsuz etkileyecektir. Bu nedenle güzergah seçiminde dikkat edilecek en önemli konulardan biri de güzergahta başka önemli taşımaların da yapılıyor olması, buna bağlı olarak güçlü ve sık blok tren ağına sahip olmasıdır.

Uluslararası taşımalarda en önemli kriterlerden biri de taşıma maliyetidir. Başta navlun olmak üzere taşımayı etkileyen diğer maliyet kalemleri yer ve güzergah seçiminde önemli bir kriter oluşturmaktadır. Diğer kriterler açısından uygun olan bir alternatifin maliyet açısından dezavantajlı olması seçimi olumsuz yönden etkileyecektir.

Bakım Atölye, Tren hat kapasitesi, Mesafe gibi kriterler turnist süresinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle seçilecek diğer kriterler turnist süresinin kısa olmasına yardımcı olması bakımından son derece önemlidir.

Kriterler COPRAS yöntemi kullanılarak önem derecelerine göre sıralanmıştır. Dijkstra algoritması kullanılarak optimal güzergah ve yer seçimi yapılmıştır. Problemin Python

programlara dili ile yapılan çözümü sonucunda ükleme depolama ağı için optimal sonuç Kapıkule, Derince, Arifiye, Eskişehir-Hasabey, Ankara, Yahşihan, Kayseri, Sivas, ve Ahalkelek şeklinde oluşmuştur. Bugün ki uygulamalara baktığımızda sonucun gerçek hayat uygulamaları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Son yıllarda özellikle Trans Hazar Uluslararası Taşıma Koridoru ile ilgili benzer çalışmalar çok fazla yapılmıştır. Özellikle Demir İpek Yolunun açıldığı günden bu yana rota optimizasyonu ve en kısa yol seçimi ile ilgili yapılan çalışmalar sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak Çin ve Avrupa arasında rota seçimi çalışmalarını kapsamakta olup, ülkemizden sadece Kars ve Kapıkule sınır kapıları seçilmiştir. Bu nedenle ilkemiz içerisinde yer ve rota seçimi konusunda sektör paydaşlarına yol gösterecek bir çalışma yapılması ihtiyacı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada benzer çalışmaların desteklenmesinin yanında kuruluş yeri seçiminde belirgin rol oynayan kriterler seçilerek özellikle Türkiye içerisinde en önemli iki sınır kapısı olan Kars ve Kapıkule arasında hem kuruluş yeri seçimi hem de rota optimizasyonu yapılmıştır.

Kaynakça

- [1] D. Spetha, V. Sauter, P. Plötz and Tim Signer, “Synthetic European road freight transport flow data” *Elsevier*, vol. 40 pp. 107786, 2022.
- [2] D. Kirchler, L. Liberti, T. Pajor and R. W. Calvo, “UniALT for regular language constrained shortest paths on a multi-modal transportation network”, *Karlsruhe Institute of Technology*, vol 11, pp. 64–75, 2011.
- [3] H. Ihsan, E. Yudaningtyas and M. Muslim, “Solusi optimal pencarian jalur tercepat dengan algoritma hybrid fuzzy-dijkstra”, *Jurnal EECCIS*, vol. 6, No. 2, pp. 155-160, 2012.
- [4] Nurwan, W, Pranata, Muhammad R. Payu and N. Yahya,” Implementation of dijkstra algorithm and welch-powell algorithm for optimal solution of campus bus transportation” *Matematika Mantik*, Vol. 7, No. 1, pp. 31-40,2021.
- [5] C. Sevinç, “Karma Taşımacılık Modeli Seçimi: Bir Uygulama”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi,2015.
- [6] Hale Gonçe Köçken, “Şebeke Analizlerine Bulanık Yaklaşımlar, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2011.
- [7] Min L., X. Hou, and J. Yang,” surface optimal path planning using an extended dijkstra algorithm” *IEEE Access*, vol 8, pp.147.827-837, 2020.
- [8] H. Al-Tameemi,” Using Dijkstra Algorithm In Calculating Alternative Shortest Paths For Public Transportation with Transfers and Walking” Master’s Thesis, Çankaya University, 2014.
- [9] L. Yu, H. Jiang and L. Hua, “Anti-Congestion Route Planning Scheme Based on Dijkstra Algorithm for Automatic Valet Parking System”, *applied sciences*, vol. 9, 5016, 2019.
- [10] [S. S. Biswas, B. Alam and M.N. Doja, “A Refinement of dijkstra’s algorithm for extraction of shortest paths in generalized real time-multigraphs”, *Journal of Computer Science* vol. 10 (4), pp.593-603,2014.
- [11]L. X. Yan and C. Y. Li, “Application of Dijkstra Algorithm in Logistics Distribution Lines” *Proceedings of the Third International Symposium on Computer Science and Computational Technology*,vol 10, pp. pp. 048-050,2010.
- [12]I. R. Karas and S. Demir, “Dijkstra algorithm interactive training software development for network analysis applications in GIS”, *Energy Education Science and Technology* vol.28(1), pp. 445-452, 2011.
- [13]M. Z. Erkaya, “Türkiye’de Demiryolu Yük Taşımacılığının Analiz Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 2019.
- [14]D. Fan and P. Shi,” Improvement of Dijkstra’s Algorithm and Its Application in Route Planning” *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Shandong, China, 2010.
- [15]B. He,” Application of Dijkstra algorithm in finding the shortest path”, *Journal of Physics, Conference Series*, Haining, ZheJiang, China,2021
- [16]Z. Zhang, W. Jigang and X. Duan, “Practical Algorithm for Shortest Path on Transportation Network”, *International Conference on Computer and Information Application*, Tianjin, China,2010.
- [17]C. Yin” A Developed Dijkstra Algorithm and Simulation of Urban Path Search”, *The 5th International Conference on Computer Science & Education* Hefei, China, 2010.

- [18] S. Sun, Z. Duan, S. Sun and D. Yang, "How to Find the Optimal Paths in Stochastic Time-Dependent Transportation Networks, 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Qingdao, China, 2014.
- [19] Y. Denga, Y. Chenb, Y. Zhanga and S. Mahadevanc, "Fuzzy dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment", *Elsevier, Applied Soft Computing*, vol.12 pp. 1231–1237, 2012.
- [20] P. Tirastittam and P. Waiyawuththanapoom, "Public transport planning system by dijkstra algorithm: case study bangkok metropolitan area" *World Academy of Science*, vol:8, No:1, pp. 54-59, 2014.
- [21] Y. Sun, M. Fang and Y. Su, "AGV Path Planning based on Improved Dijkstra Algorithm", *Journal of Physics: Conference Series*, Jiaxing, China, 2021.
- [22] Ş. Bayzan, "Araç Rotalarının En Kısa Yol Algoritmaları Kullanılarak Belirlenmesi ve .Net Ortamında Simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2005.
- [23] M. F. Altan, M. Ç. Kızıldaş ve S. C. Divrik, "Toplu taşımada çok amaçlı karar verme ve metropoliten bir alanda servis araçlarının modellenmesi", *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 8(1) pp. 99-105, 2018.
- [24] G. K. Kyzy, "Akıllı Ulaşım Sistemine Yönelik En Kısa Yol Bulma Algoritmalarının Performans Analizi", Yüksek Lisans Tazi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2019.
- [25] M. Dener, M. A. Akcayol, S. Toklu ve Ö. F. Bay, "Zamana bağlı dinamik en kısa yol problemi için genetik algoritma tabanlı yeni bir algoritma", *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*" vol. 26, No 4, pp. 915-928, 2011.
- [26] B. Malkoç, "Temel bilimler ve mühendislik eğitiminde programlama dili olarak python," Akademik Bilişim'12 - XIV. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Uşak, Türkiye, 2012.
- [27] TCDD [Online]. Available: [https://www.port.tcddtasimacilik.gov.tr/kky/YBS Analiz Raporlari](https://www.port.tcddtasimacilik.gov.tr/kky/YBS_Analiz_Raporlari), [Accessed March 4], 2023.

Özgeçmiş



Mehmet Taha YIKIN

1987 yılında Muşun Kızılağaç Nahiyesinde doğdu. İlköğrenimini burada tamamladıktan sonra orta ve lise öğrenimine Muş merkezde devam etti. 2012 yılında İstanbul Üniversitesi Ulaştırma ve Lojistik Fakültesi, 2020 yılında Ahmet Yesevi Uluslararası Türk Kazak Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2013 yılında TCDD Genel Müdürlüğünde Lojistik Memuru olarak göreve başladı. Ocak 2023 ayında bu yana TCDD Taşımacılık AŞ'de Endüstri Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.

E-Posta: tahayikin@gmail.com



Evrencan ÖZCAN

Aslen Kırşehirli olan Özcan 1980 Ankara doğumludur. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora derecelerini sırasıyla 2003, 2007 ve 2013 yıllarında Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden almıştır. Özel sektörde 7 yıl devam eden mühendislik tecrübesinin ardından, 2010 yılında Elektrik Üretim A.Ş.'ye atanan Özcan, Ocak 2018'den bu yana Kırıkkale Üniversitesi'nde Doç. Dr. Öğretim Üyesi unvanı ile meslek hayatına devam etmektedir.

E-Posta: evrencan.ozcan@kku.edu.tr

Beyanlar

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Aerodinamik Kuvvetlerin Demiryolu Araç Dinamiğine Etkilerinin İncelenmesi

Erbil BİLGİN^{*1}, Rahmi GÜÇLÜ²

¹ TÜRASAŞ Genel Müdürlüğü, Üretim, Planlama ve Kontrol Dairesi Başk., Ankara, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Böl., İstanbul, Türkiye

*erbil.bilgin@turasas.gov.tr

(Alınış/Received: 05.12.2023, Kabul/Accepted: 23.01.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Taşımacılık modları arasında tarihsel gelişim boyunca önemli bir yere sahip olan demiryolu taşımacılığı gelişen teknoloji ile birlikte yüksek hızlarda sağladığı güvenli ve konforlu seyahat ile yolcu taşımacılığı için tercih edilen bir ulaşım aracı haline gelmiştir. Özellikle yolcu taşımacılığında taşıma modları arasında tercih unsuru olan seyahat sürelerinin kısaltılması demiryolu araç gelişim süreçlerinde aerodinamik unsurların ön plana çıkmasına neden olmuştur. 1800 lü yıllardan itibaren başlayan demiryolu araçlarında hızlanma yarışı halen günümüzde devam etmektedir. Enerji verimliliği, sürüş güvenliği, yolcu konforu gibi birçok parametrede etken olan aerodinamik kuvvetlerin etkilerinin daha iyi anlaşılması için birçok çalışma yürütülmektedir, bu çalışma kapsamında literatürde yer alan matematiksel modellerden farklı olarak hem aracın hem de rüzgâr hızının değişken olduğu ve değişken aerodinamik verilerin gerçek zamanlı saha ölçümleri ile toplanması, kompleks bir dinamik simülasyon modeli ile simülasyonların gerçekleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada literatüre ilave olarak demiryolu araçlarında aerodinamik etkinin araştırılmasında yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Yapılan saha çalışmaları ve analizlerin sonucu olarak da belirlenen ölçüm hattı boyunca tekerlek ray kontağında meydana gelen kuvvet değişimleri irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu dinamiği, Aerodinamik etkiler, Tekerlek-ray kontağı

Investigation of the Effects of Aerodynamic Forces on Railway Vehicle Dynamics

Abstract: Railway transportation, which has an important place among transportation modes throughout historical development, has become a preferred means of transportation for passenger transportation with the safe and comfortable travel it provides at high speeds with the advancing technology. Especially in passenger transportation, the shortening of travel times, which is a factor of preference among transportation modes, has led to the prominence of aerodynamic factors in railway vehicle development processes. Starting in 1800s, the race for speeding up in railway vehicles still continues today. In order to better investigate the effects of aerodynamic forces, which are factors in many parameters such as energy efficiency, driving safety, passenger comfort, etc., in this study, unlike the mathematical models in the literature, a complex dynamic simulation model was created by performing simulations with a complex dynamic simulation model in which both the vehicle and wind speed are variable and variable data are obtained by collecting real-time measurement data. In this study, in addition to the literature, a new approach to investigate the aerodynamic effect in railway vehicles has been introduced. As a result of the field studies and analyzes, the lateral force changes occurring at the wheel-rail contact along the determined measurement line were examined.

Keywords: Railway dynamics, Aerodynamic effects, Wheel-rail contact

1. Giriş

Demiryolu ulaşım sisteminin tarihteki ilk örnekleri olarak kabul edilen M.Ö. 600'de Eski Yunan döneminde Mora yarımadasının etrafını dolaşmak yerine hızlı bir şekilde sevk etmek için başlayan kılavuz demiryolu sistemi yüzyıllar boyunca insanlık tarihinde devrim yaratacak gelişmeler ile birlikte en önemli taşıma aracı olarak tarihte yer almıştır. İlk kullanım alanları maden ocakları olduğu için yük taşıma kapasitesi öncelikli demiryolu araçları geliştirilmiştir,

Atıf için/Cite as: E. Bilgin, R. Güçlü "Aerodinamik kuvvetlerin demiryolu araç dinamiğine etkilerinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 241-257, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1400421

1800 lü yıllarda taşıma kapasite ile birlikte hızlı taşıma önceliğinin de gelmesi ile saatte 60km/sa hıza ulaşan lokomotifler tasarlanmıştır. 1900'lü yıllarda demiryolu sektörünün gelişiminin yolcu taşımacılığı üzerine olmasıyla birlikte kısa bir zaman içerisinde trenlerin sürat yarışları başlamıştır.

Demiryolu araçları hızlandıkça aerodinamik araştırmalar başta olmak üzere enerji tasarrufu ve yolcu konforu sağlamak için yeni araştırma alanları ortaya çıkmıştır. İlk etapta hem yakıt tüketimini azaltmak hem de daha yüksek hızlara ulaşılmasını sağlamak için trenlerin aerodinamik sürtünmesinin azaltılmasına önem verilmiştir. İlk lokomotifler aerodinamik açıdan değerlendirme yapılmadan ana gövde silindirik bir yapıda ön kısımları ise düz bir yüzey alanına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu temel tasarım, hızla ilgili olarak araçta yüzey basıncı oluşmasına ve aynı enerji tüketimi ile yüksek hızlara çıkılmasına engel olmaktadır.

Demiryolu aerodinamik araştırmaları ilk kez 1938'de Derby'deki Londra, Midland ve İskoç Demiryolu Araştırma Merkezi'nde Coronation sınıfı buharlı makinelerin aerodinamik sürtünmesini ölçmek ve lokomotifin etrafındaki duman dağılımını incelemek için testler yapılmasıyla başlamıştır [1]. İngiltere ve Japonya'da dar tüneller içinde hızlı hareket eden demiryolu araçlarında basınç farklılıklarından dolayı meydana gelen yolcu şikayetleri hızla ilgili aerodinamik etkilerin araştırma sürecini de hızlandırmıştır.

1938 de başlayan aerodinamik etki araştırmaları günümüze kadar artan işletme hızları ile paralel şekilde artmıştır. Günümüz uygulamalarında aerodinamik performansa yönelik analizler temel olarak aracın direnç katsayısı üzerine optimizasyon çalışmalarını içermektedir. Gerçek işletme durumlarındaki çevresel koşullara bağlı değişen aerodinamik etkilerin sürüş dinamiğine etkisi ampirik formüller ile ifade edilmektedir. Demiryolu tarihsel gelişiminde teknoloji üreten ülkelerden olan Fransa'da hızlı tren işletmecisi olan SNCF, yanal rüzgârlara karşı geliştirdiği risk analizinde hat kenarına ses duvarı olarak da kullanılan sabit rüzgâr perdeleri ve belli aralıklarla anemometre (rüzgâr hızını ölçer) koyarak rüzgâr hızının 30m/s'yi geçtiği durumlarda rüzgâr alarm sistemini devreye alarak işletme hızını kademeli olarak 320 km/sa'dan 80 km/sa'e düşürmektedir. Bir diğer demiryolu tarihsel gelişimine katkı sağlayan ülke olan Almanya da Alman Demiryolları DB ise %10 tolerans dahilinde ray üzerine basan teker yükünü daimî şekilde ölçmekte ve bu noktada rüzgâr gibi çevresel etmenlerden kaynaklı yaşanan ani değişikliklerde işletme hızını düşürmektedir [2].

Aerodinamik etkenler özellikle açık alanlardaki demiryolu araç dinamiğine en çok etkileyen kuvvetlerdir. Demiryolu araçlarının dinamiğinin karakterize edildiği EN 14363 Demiryolu Uygulamaları-Demiryolu Taşıtları Seyir Niteliklerinin Kabul Deneylei-Seyir Davranışlarının Denenmesi ve Durağan Deneylei standardı [3] kapsamında tüm demiryolu araçları için yapılan güvenlik analizlerinde, aerodinamik kuvvetlerin araç dinamiğine etkisi henüz tam olarak tanımlanmamıştır. Aerodinamik kuvvetlerin araç dinamiğine etkisinin araştırılması çalışması birinci fazı Avrupa Birliği projesi kapsamında DYNOTRAIN (Railway Vehicle Dynamics and Track Interactions Total Regulatory Acceptance for the Interoperable Network) [4] projesi olarak 2009-2013 yılları arasında tamamlanmış, ikinci faz araştırmaları ise UIC projeleri kapsamında devam etmektedir. Aerodinamik etkilerin analizi demiryolu araştırma konuları arasında önemli olan yerini korumaktadır.

Bu çalışma kapsamında, öncelikle demiryolu aerodinamik analizlerinde literatürde kabul görmüş modelleme yöntemleri üzerinden inceleme gerçekleştirilecektir. Daha sonra, model olarak belirlenen Milli EMU Tren Setine ait kompleks dinamik analiz modeli oluşturulmuştur. Analiz modellemesinin yanı sıra Milli EMU Tren seti basınç analizörleri ile donatılarak livre hızlarında saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aerodinamik veri ölçümü yapılan hatlar daha sonra ROGER ölçüm treni ile hat geometrisi ölçümü yapılarak, hattın modellemesi gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak, saha ölçümlerinde elde edilen araç hız verileri, aerodinamik hız ve basınç verileri, altyapı

geometrisi ölçüm verileri simülasyonda modellenerek Milli EMU tren setinde aerodinamik kuvvet etkisinde simülasyon koşturulmuş ve tekerlek ray kontağında oluşan kuvvet ve parametre değişimleri incelenmiştir.

2. Metot

Aerodinamik kuvvetlerin demiryolu araçlarının sürüş dinamiğine etkisinin araştırılması için literatürde farklı modeller kullanılmıştır. Aerodinamik kuvvetlerin simüle edilmesine yönelik metodoloji büyük önem taşımaktadır ve aerodinamik kuvvetlerin farklı modelleri farklı doğruluk seviyeleri ile sonuçlanmaktadır.

Literatürde kabul görmüş aerodinamik matematiksel modellemede 3 farklı model yapısı bulunmaktadır;

- Sabit akışkan modeli
- Sert rüzgâr modeli
- Türbülanslı akış modeli

Son 30 yılda, gelişen mühendislik yazılımları ile demiryolu endüstrisinde demiryolu araçlarının aerodinamik etkilerden kaynaklı deray riski açısından güvenlik seviyesini araştırmak ve risk seviyesini değerlendirebilmek için yeni yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Geliştirilmiş yaklaşımlarla yapılan çalışmalarda aerodinamik katsayılar ve araç dinamik özelliklerine etkisinin belirlenmesi olarak iki temel konu üzerinde yoğunlaşmıştır.

Mevcut araştırmalarda aerodinamik yüklerin hesaplanmasında kullanılan en yaygın yöntemler, küçültülmüş ölçekli modeller üzerinde yapılan rüzgâr tüneli testleri ve Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleridir. Her iki yaklaşımın da nihai çıktısı, belirli tekerlek boşta kalma sınırı değerleri aşılmadan önce demiryolu taşıtının dayanabileceği karakteristik rüzgâr hızları kümesi olan karakteristik rüzgâr eğrileridir.

Geliştirilen matematiksel modellemelerinin yanı sıra aerodinamik etkilerin araştırılmasında rüzgâr tüneli testleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Belirli ölçekte hazırlanan demiryolu araçları statik olarak tünelin içerisine yerleştirilir ve rüzgâr kaynağından ayarlanabilir rüzgâr hızı ve açısı ile yanal yüzeyde oluşan kuvvetler gerinim ölçerler ile ölçülmektedir. Demiryolu aracının yüzeylerinde meydana gelen basınçlar için boru tip basınç analizörleri modelin içerisine yerleştirilmekte, farklı açı ve rüzgâr hızlarında meydana gelen basınç dağılımları ölçülmektedir. Rüzgâr tüneli testlerinde aracın statik oluşu, gerçek durumu tam yansıtmadığı için ölçekli modellere hareket mekanizması eklenmiştir. Rüzgâr tüneli içinde hareket eden model sisteminde alınan verilerde, mekanik hareket aksamı kaynaklı gürültüler meydana gelmesinden dolayı, rüzgâr tüneli testlerinin gelişimi için halen çalışmalar devam etmektedir.

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) hem maliyet hem de süre açısından sağladığı avantajlar ile demiryolu aerodinamik analizler için tercih edilen yöntem haline gelmiştir. CFD analizlerinin dezavantajı ise statik dengedeki aerodinamik kuvvetlerin araç üzerinde etkili olduğu statik bir yaklaşımla rüzgâr verileri ve aerodinamik katsayılar rüzgâr-aracın sisteminin bir modeline girilmesidir [5].

2.1. Sabit akış modeli

Yanal rüzgâr stabilitesi üzerine yapılan araştırmaların çoğunda, yanal rüzgârın sabit akış olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, sabit akış modelindeki rüzgâr hızının doğal akışın tepe değeri olduğu kabul edilerek, aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\hat{w} = \bar{w} + k\sigma_w \quad (1)$$

\hat{w} ; Rüzgâr hızı tepe noktası

\bar{w} ; Ortalama rüzgâr hızı

σ_w ; Rüzgâr hızı standart sapması

k ; Emniyet faktörü

k 'nın farklı değerleri farklı emniyet oranlarına neden olur. Emniyet oranı, en yüksek rüzgâr hızının $\bar{w} + k\sigma_w$ değerini aşmama olasılığı olarak tanımlanır.

Rüzgâr hızının standart sapması esas olarak ortalama rüzgâr hızı ve türbülans yoğunluğuna bağlıdır. Standart sapma değeri aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır:

$$\sigma_w = I_z \bar{w} \quad (2)$$

I_z ; Türbülans yoğunluğu

Türbülans yoğunluğu aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$I_z = \frac{1}{\ln(h/h_0)} \left(1 - \frac{5}{10^5} \left(\log \left(\frac{h_0}{0.05} \right) + 2 \right)^7 \right) \quad (3)$$

h ; yer zemininden yükseklik

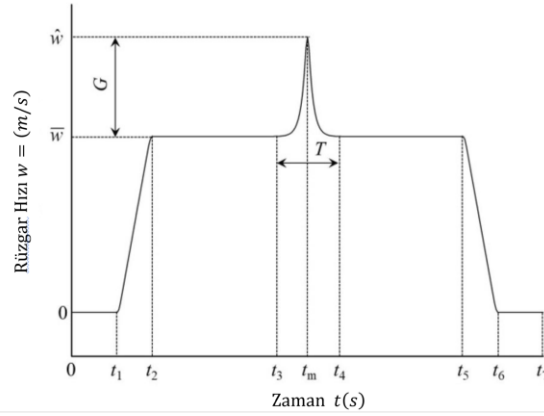
h_0 ; yüzey pürüzlülük boyu

TS EN 14067-Demiryolu uygulamaları-Aerodinamik-Yanal rüzgâr değerlendirmesi için test prosedürleri ve şartlar standardına [6] göre $h = 4$ m ve $h_0 = 0.07$ m olarak alınır.

2.2. Sert rüzgâr modeli

Sert rüzgâr senaryoları, normal türbülanslı rüzgâr sürecinin gerçekleşmesini beklemeden belirli aşırı rüzgâr koşullarını modellemek için kullanılır.

Sert rüzgâr modelinde, gerçek hayatta kararsız olan rüzgârın basitleştirilmiş bir modeli olarak zamana bağlı fonksiyonu olarak tanımlanan rüzgâr hızındaki değişimi statik aracın bulunduğu bölgeye uygulanır. Sert rüzgârın zamana bağlı değişimini simüle etmek için hazırlanan fonksiyonların farklı formları bulunmaktadır. Simülasyonlarda en yaygın olarak kullanılanlar, üstel sert rüzgâr formu, "1-cos" sert rüzgâr formu, rampa sert rüzgâr formu ve adım sert rüzgâr formudur. Üstel sert rüzgâr formu mevcut en gelişmiş matematiksel modeldir. Bunun nedeni ampirik olmaması ve gerçek rüzgâr verilerinin analiz edilmesiyle elde edilmesidir. EN 14067-6'da [6], üstel rüzgâr formun bir örneği olan Çin şapka rüzgâr formu özellikle gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Çin şapka rüzgâr formu [5]

Donmuş türbülans hipotezine göre, bir sert rüzgâr daha fazla şiddetini artırmaz ve ortalama rüzgâr hızı \bar{w} ile hareket eder;

\bar{w} rüzgâr hızının sabit olduğu varsayılır. Çin şapkası sert rüzgâr modeli bir tür parçalı fonksiyon ile tanımlanabilir; burada esas odak rüzgâr hızının değişken bileşenlerini tanımlamak üzerinedir. Sert rüzgâr faktörü G ve sert rüzgâr süresi T , sert rüzgârı tanımlamak için iki ana karakteristik parametredir.

Sert rüzgâr faktörü G , maksimum rüzgâr hızı \hat{w} ile ortalama rüzgâr hızının \bar{w} oranıdır.

$$G = \hat{w}/\bar{w} \quad (4)$$

T sert rüzgâr uygulama süresi TS EN 14067-6 [6] standardına göre doğal rüzgâr hızının güç spektral yoğunluğu göre hesaplanmaktadır.

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{\int_{n_1}^{n_2} n^2 S_w(n) dn}{\int_{n_1}^{n_2} S_w(n) dn} \right)^{-0,5} \quad (5)$$

n frekans, n_1 frekans integral alt sınırı, n_2 frekans integral üst sınırı, $S_w(n)$ doğal rüzgâr hızının güç spektral yoğunluğu olarak tanımlanır.

2.3. Türbülans rüzgâr modeli

Türbülanslı rüzgâr modelinde, rüzgâr hızının yer değişim-zaman değişimi oluşturulur; bu durum rüzgârın fiziksel stokastik özelliklerinin yeniden üretilmesini sağlar. Rüzgârın stokastik simülasyonu tanımlanırken, ortalama rüzgâr hızına ve dalgalanan rüzgâr hızı ile tanımlanır. Belirli bir andaki rüzgâr hızı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$w = \bar{w} + w^l \quad (6)$$

w^l dalgalı rüzgâr hızı, normal dağılıma sahip stokastik bir aralıktır.

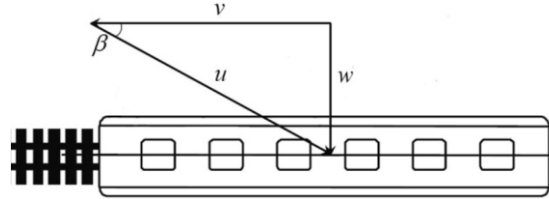
Türbülanslı rüzgâr modelinde bir dezavantaj olarak trenin düz bir hat üzerinde sabit bir v hızıyla hareket ettiği ve türbülanslı rüzgâr hızının yatay ve raylara dik olduğu kabul edilmiştir.

Türbülanslı rüzgârın aerodinamik etkilerini hesaplanması için, gerçek sürüşte olduğu gibi araca etkiyen kararsız rüzgârın modellenmesi gerekmektedir. Türbülanslı rüzgâr modeli için iki ana

yaklaşım bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntem, bir hat boyunca kısa mesafelerle ayrılmış çok sayıda noktada rüzgâr hızı değişimlerini sayısal olarak simüle etmektir. Diğer yöntem ise, belirli bir andaki araç hızı ile çakışan rüzgâr hızının referans noktası alınarak rüzgâr hızının zamana bağlı değişimini araç hızını zamana bağlı değişimine oranlayarak rüzgâr hız değişimi oluşturmaktır.

2.4. Aerodinamik kuvvet hesaplaması

Demiryolu aracına etkiyen rüzgârın etkisi Şekil 2 de hız vektörel diyagramında gösterildiği üzere w rüzgâr hızı, v araç hızı ve β tren hareketine göre rüzgâr açısına bağlı olarak modellenmektedir.



Şekil 2. Hız vektörü [1]

Trene etkiyen u rüzgâr hızı,

$$u^2 = v^2 + w^2 \quad (7)$$

β tren hareketine göre rüzgâr açısı,

$$\tan \beta = \frac{w}{v} \quad (8)$$

Sabit akış modelinde rüzgâr hızının w nin sabit bir \hat{w} olduğu varsayılır, u araç hızı β tren hareketine göre rüzgâr açısının sabit olduğu kabul edilir. Sabit akış modelinde F aerodinamik kuvvet ve M aerodinamik moment, aerodinamik katsayılar kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_F(\beta) u^2 \quad (9)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho A h C_M(\beta) u^2 \quad (10)$$

C_F aerodinamik kuvvet katsayısı, C_M aerodinamik moment katsayısı, ρ havanın yoğunluğu, A referans yüzey alanı ve h referans yüksekliği ifade etmektedir.

Çin şapkası sert rüzgâr modelinde rüzgârın kararsız yapısından dolayı β tren hareketine göre rüzgâr açısı ve u araç hızı zamana bağlı olarak değişmektedir.

Çin şapkası sert rüzgâr modelinde F aerodinamik kuvvet ve M aerodinamik moment aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho A C_F(\beta(t)) u(t)^2 \quad (11)$$

$$M(t) = \frac{1}{2} \rho A h C_M(\beta(t)) u(t)^2 \quad (12)$$

Çin şapkası modelindeki yarı kararlı varsayım araca etkiyen kuvvetlerin doğrudan rüzgârdaki değişimden dolayı kaynaklandığını kabul etmektedir. Bu kabul birçok durumda verimli olsa da türbülans rüzgâr modeli için yeterli değildir. Rüzgârın aracın tüm yüzeylerine etki etmediği kabulü ile türbülans rüzgâr modelinde aerodinamik kuvvet dalgalanmalarının rüzgâr hız dalgalanmalarını tam olarak takip etmediği için doğrulanmış alternatif bir yarı kararlı model yaklaşımı uygulanır.

Türbülans rüzgâr modeli doğrulanmış yarı kararlı model teorisine göre, F aerodinamik kuvvet ve M aerodinamik moment aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho A C_F (\beta_c(t)) u_c(t)^2 \quad (13)$$

$$M(t) = \frac{1}{2} \rho A h C_M (\beta_c(t)) u_c(t)^2 \quad (14)$$

u_c doğrulanmış hız ve bu andaki β_c doğrulanmış tren hareketine göre rüzgâr açısıdır.

$$u_c^2 = v^2 + (\bar{w} + w_c^l)^2 \quad (15)$$

$$\beta_c = \text{atan} \frac{\bar{w} + w_c^l}{v} \quad (16)$$

w_c^l doğrulanmış dalgalı rüzgâr hızı aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır.

$$w_c^l = \sum_j [2S_{W_c}(n_j) \Delta n_j]^{0.5} \sin(2\pi n_j t + 2\pi r_j) \quad (17)$$

S_{W_c} , w_c^l hızına karşılık gelen güç spektral yoğunluğudur ve aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır.

$$S_{W_c} = X^2 S_w \quad (18)$$

X^2 aerodinamik kabul fonksiyonudur. Bu fonksiyon için Baker [7], çeşitli trenler üzerinde yapılan tam ölçekli ve rüzgâr tüneli testlerinden elde edilen önemli miktarda deneysel veriyi bir araya getirmiş ve demiryolu trenlerinde kullanılan aerodinamik kabul fonksiyonu için basit bir ifade sağlamıştır.

$$X^2 = \frac{1}{(1 + (n_s/n^l)^2)^2} \quad (19)$$

n_s boyutsuz frekans,

$$n^l = \lambda \sin \bar{\beta} \quad (20)$$

$\bar{\beta}$ tren hareketine göre ortalama rüzgâr açısı, λ katsayısı, yanal kuvvet hesaplamaları için 2, kaldırma kuvvet hesaplamalarında 2,5 alınmaktadır.

2.5. Aerodinamik analiz modeli

Demiryolu araçlarında aerodinamik kuvvetlerin araç dinamiğine etkisinin araştırılması çalışmalarında aerodinamik etkiler sabit akışkan modeli, Sert rüzgâr modeli ve Türbülanslı Akış modeli simüle edilmiş, Hesaplamalı Akışlar Dinamiği ile statik yapılara etkisinin araştırılmış,

ölçeklendirilmiş statik modeller ile Aerodinamik Test Tüneli ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tüm bu yöntemlerin birbirlerine göre farklı kabulleri ve farklı üstünlükleri bulunmaktadır. Yöntemlere ait değişkenler Tablo 1 de belirtilmiştir.

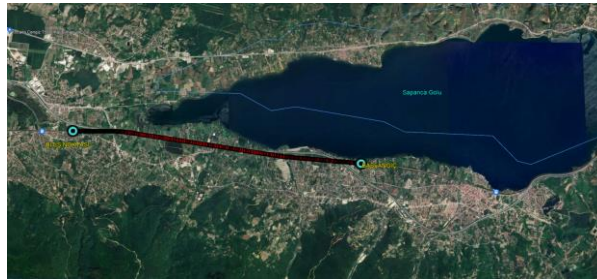
Tablo 1. Aerodinamik etki analizi modelleri

| | Araç Durumu | Araç Hızı | Rüzgâr Hızı | Rüzgâr Açısı |
|-----------------------------|-------------|-----------|------------------|----------------------|
| Sabit Akışkan Modeli | Dinamik | Sabit | Sabit | Her uygulamada Sabit |
| Sert Rüzgâr Modeli | Dinamik | Sabit | Limitli Değişken | Her uygulamada Sabit |
| Türbülanslı Akış Modeli | Dinamik | Sabit | Değişken | Her uygulamada Sabit |
| Hesaplamalı Akış Analizleri | Statik | Sabit | Değişken | Her uygulamada Sabit |
| Test Tüneli Çalışmada | Statik | Sabit | Değişken | Her uygulamada Sabit |
| Kullanılan Dinamik Model | Dinamik | Değişken | Değişken | Değişken |
| Gerçek Durum | Dinamik | Değişken | Değişken | Değişken |

Yapılan bu çalışmada gerçek duruma en yakın değişkenlere sahip model kurgulanmıştır, aerodinamik kuvvetler araç üzerinden tam boyutlu testler ile toplanmış, ölçüm hattına ait yol parametreleri ölçülmüş, testleri yapılan hat ve araç 725 serbestlik dereceli araç modeli ile saha ölçümlerinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

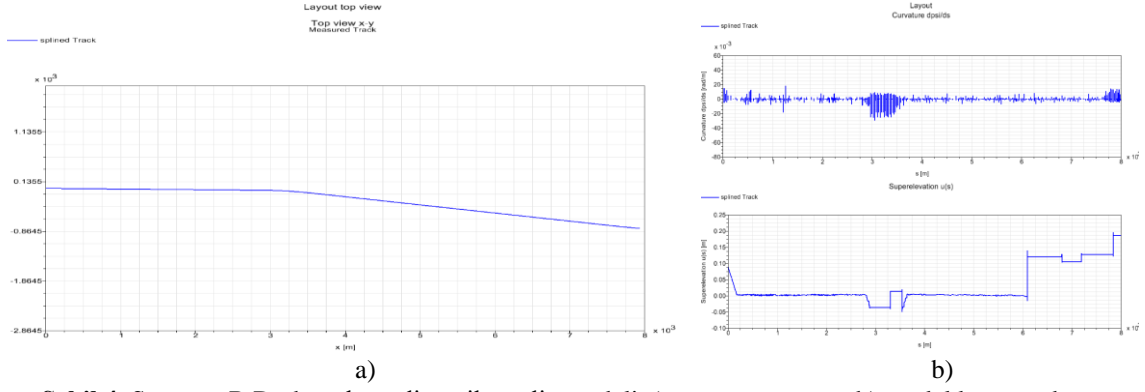
Saha ölçümleri için özellikle yanal rüzgâr durumunun incelenebilmesi için demiryolu hattının yakınında kentsel yapılanmanın bulunmaması, büyük açık alanlara ihtiyaç duyulduğundan ölçüm için Sapanca-B.Derbent hattı kullanılmıştır (Şekil 3). Sapanca Gölünün kenarında bulunan bu hatta göl üzerinden gelen hava akımları doğrudan geçiş noktasında trenlere etkimektedir. Ayrıca konvansiyonel demiryolu hattı ile havaalanı tek kesişim bölgesi olan Sapanca-B.Derbent hattı gölün yakınında bulunan Cengiz Topel Havaalanından dolayı demiryolu hattının da bulunduğu alanı da kapsayacak şekilde günlük ve mevsimlik aerodinamik veriler kayıt alınmaktadır.

Tutulan aerodinamik veri ve rüzgâr hızı istatistikleri ile risk analizi yapma imkânı bulunmaktadır.



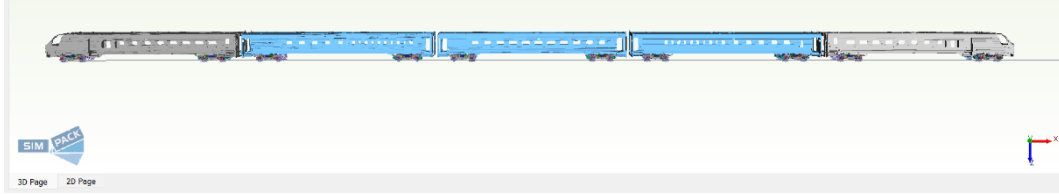
Şekil 3. Ölçüm ve analizler için belirlenen Sapanca-B.Derbent hattı

Sapanca-B.Derbent hattı demiryolu hat ölçümleri ROGER 800 ölçüm treni vasıtasıyla toplanmıştır. Toplanan hat geometrisi verileri MATLAB programı yardımı ile işlenerek SIMPACK dinamik analiz yazılımına aktarılmıştır. Hat üzerinde bulunan yol düzensizlikleri de dinamik analiz modelinde yer almıştır (Şekil 4).

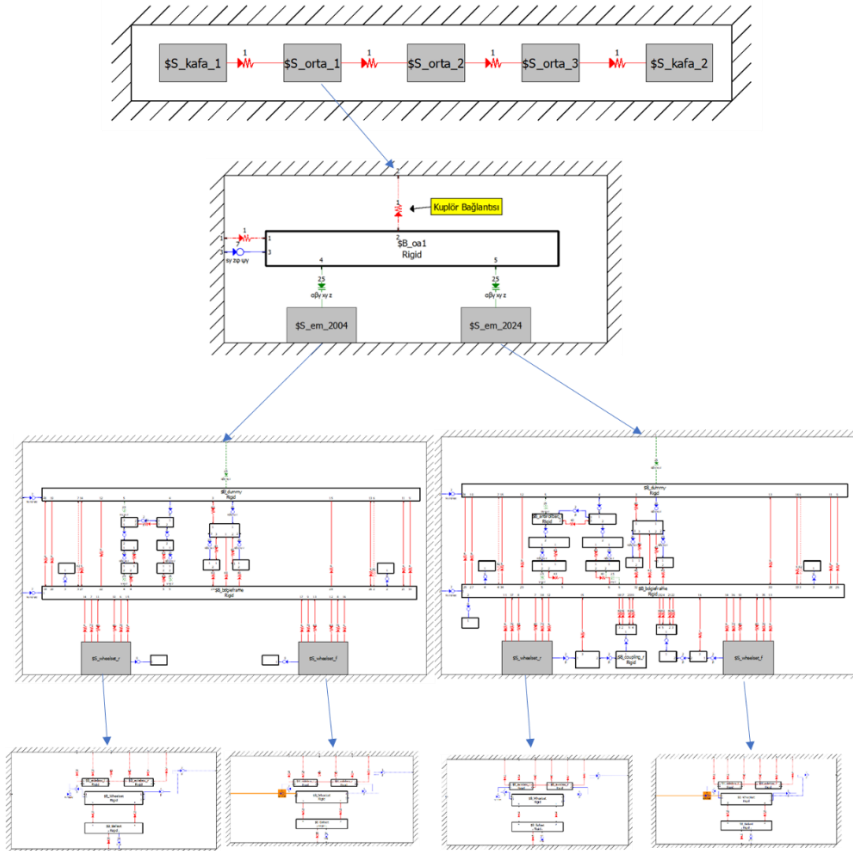


Şekil 4. Sapanca-B.Derbent hattı dinamik analiz modeli a) üstten görünüşü, b) model kurp ve dever parametreleri

Milli EMU Tren setinin modellenmesi (Şekil 5) çalışmasında, Şekil 6 da ana topolojisi görülen; 5 vagon, 10 boji, 20 adet tekerlek grubu olmak üzere modellenmiştir, 725 serbestlik derecesine sahip model oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir.

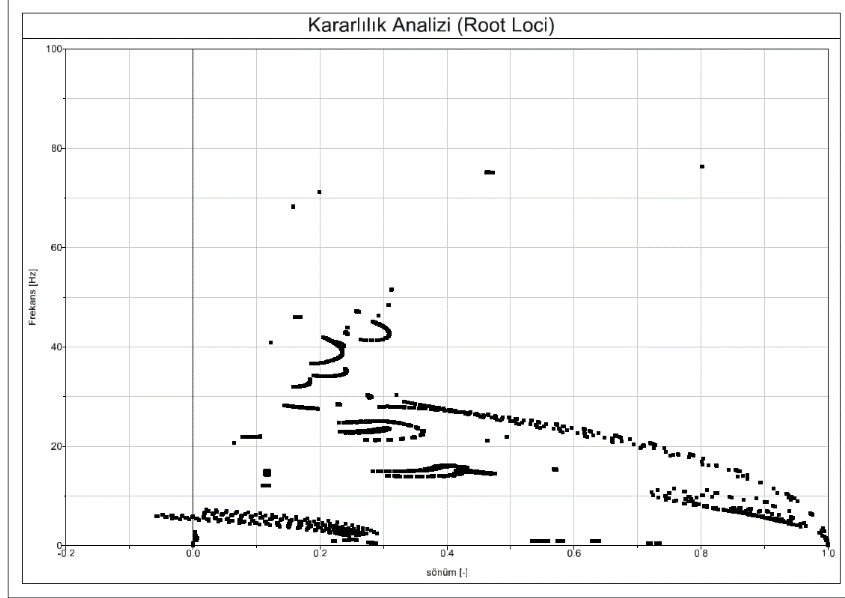


Şekil 5. Milli EMU dinamik analiz modeli görseli



Şekil 6. Milli EMU temel seviye araç topolojisi

Milli EMU dinamik analiz modelinin doğrulanması için hazırlanan kararlılık analizi modelinde 40 km/sa ile 170 km/sa hız aralığı için sistemin kararlılığı incelenmiştir. Şekil 7 de kararsız bölgeye geçen kökler incelendiğinde; hız arttıkça sistem kararsızlığa yakınsadığı, negatif sönüme geçen kısımlarda artan hız sonucu oluşan hunting salınımlarının etkisi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. Milli EMU modeli kararlılık analizi

Milli EMU dinamik analiz modelinin doğrulanması için ayrıca doğal frekans analizi gerçekleştirilmiş, gövde titreşim modları ve kritik frekanslarının aralıkları kontrol edilmiştir.

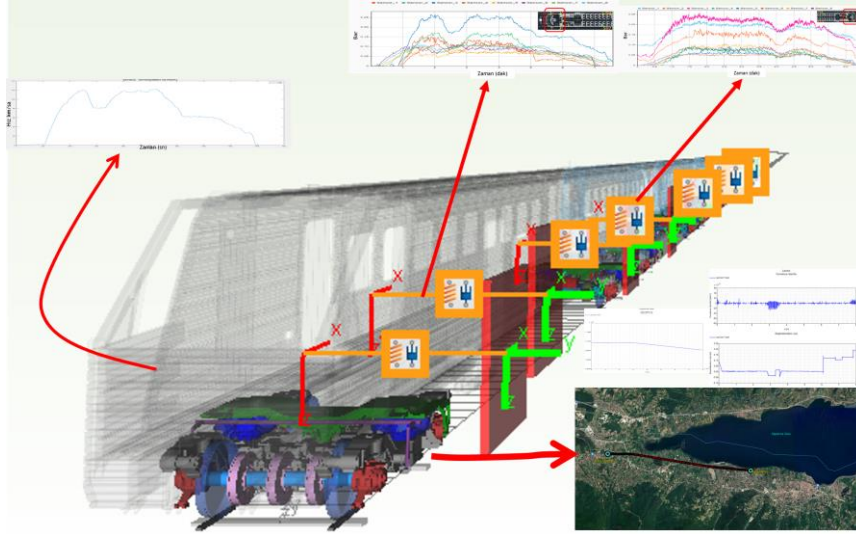
Araç gövdesi titreşim modları ikiye ayrılır; rijit gövde modları ve esnek gövde modları. Düşey konforu etkileyen rijit gövde modları zıplama, kafa vurma ve yuvarlanma modlarıdır. Bu modlar genellikle 0-2 Hz aralığında olan düşük frekanslı modlardır. Esnek gövde modları ise araç gövdesine etkiyen kuvvetlerden kaynaklanan deformasyonlar sonucu oluşan yanal ve yalpa modlarıdır [8].

Tablo 2. Milli EMU doğal frekans analizi sonuçları

| Araç Tipi | Mod Şekli | Frekans [hz] | Sönüm [%] |
|-----------|------------------|--------------|-----------|
| Baş Araç | Gövde Yalpa | 0.5 | 0.23 |
| | Gövde Yanal | 0.57 | 0.68 |
| | Gövde Yuvarlanma | 0.94 | 0.43 |
| | Gövde Zıplama | 0.98 | 0.23 |
| | Gövde Kafa Vurma | 1.21 | 0.2 |
| Orta Araç | Gövde Yalpa | 0.4 | 0.92 |
| | Gövde Yanal | 0.61 | 0.28 |
| | Gövde Yuvarlanma | 0.88 | 0.73 |
| | Gövde Zıplama | 1.13 | 0.26 |
| | Gövde Kafa Vurma | 1.21 | 0.27 |

Sapanca-B.Derbent hattı için önce hat modellemesi, daha sonra Milli EMU araç modellemesi gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak da çevresel koşullar, kuvvet elemanı olarak modellenmiştir.

Aerodinamik analiz modelinde hat verisi koordinatları (Şekil 5), eş koordinattaki araç hız verisi (Şekil 10) ve rüzgâr hız verileri (Şekil 11) senkronize edilmiştir. Tüm değişken parametreler, senkron şekilde modele uygulanarak (Şekil 8), modelin tekerlek ray kontağında meydana gelen kuvvet değişimleri ve kontak alan değişimleri incelenmiştir.



Şekil 8. Milli EMU dinamik analiz modeli aerodinamik verilerin uygulanması

2.6. Aerodinamik verilerin toplanması

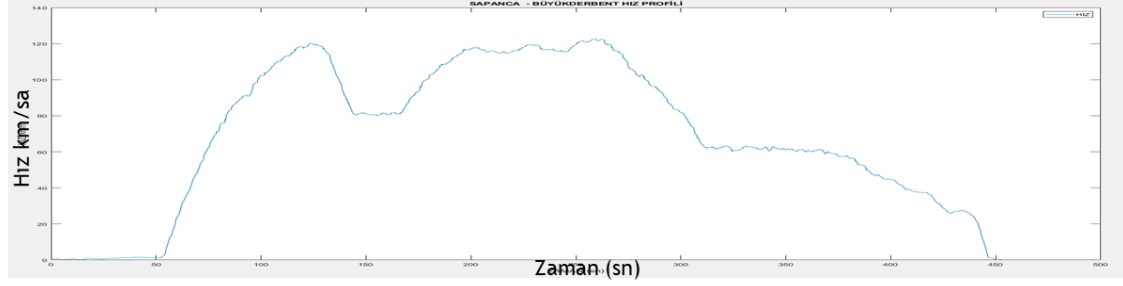
Literatür çalışmalarında, rüzgârın kararsız davranışlarının matematiksel modellenmesi için sabit akışkan modeli, sert rüzgâr modeli ve türbülanslı akış modeli kullanılsa da hem araç hızının sabit olmaması hem de rüzgâr hız ve açısının kararsız oluşu simülasyonlarda bahsedilen matematiksel modelin gerçek durumu tam karşılamadığı bilinmektedir. Bu yaklaşımı geliştirmek için CFD analizlerine göre tren yüzeyi Ön kabin yan yüzey, birinci boji üstü, orta bölüm ve arka boji üzeri olmak üzere 4 alana bölünmüştür. Kritik olan her bir bölüme 1,5 m ve 2.5 m ye basınç sensörleri yerleştirilmiştir. Özellikle, havacılık uygulamalarında kanatların üzerinden geçen akışın basıncını ölçmek için geliştirilmiş EPL yüzey basınç sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerin avantaj sağlayan en temel özelliği değişken rüzgâr açısı, rüzgâr hızı ve araç hızı da olsa yüzeye gelen basınçlardan kuvvet normallerini verebilmesidir. Sensör yüzeylerinden alınan kuvvet verileri tüm yüzey alanına uygulanarak, tüm araca etkiyen kuvvet normalleri hesaplanmıştır.

Modellenen EMU tren setinde kullanılacak aerodinamik veriler, 200 Hz örnekleme frekansında EPL yüzey basınç sensörleri ile modellenen Sapanca-B.Derbent hattında 64 kanallı IMC Cronoflex veri toplayıcısı ile toplanmıştır (Şekil 9).

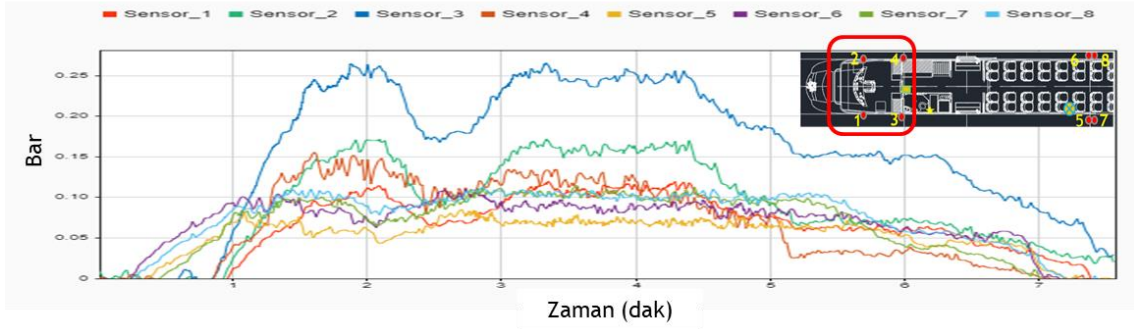


Şekil 9. Milli EMU yol testleri aerodinamik veri toplanması

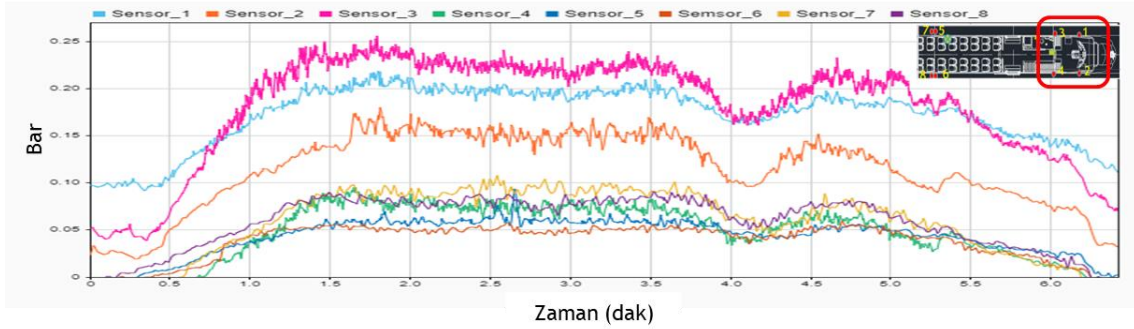
Simülasyon çalışmasında test yapılan hattın üzerinde aynı hız verisiyle eşlenmiş aerodinamik verinin koşturulması için saha ölçümlerinde Garmin GPS aracı ile 5 Hz de hız verisi toplanmıştır (Şekil 10). Daha sonra, 5Hz örnekleme verisi Matlab yardımı ile 200 Hz e genişletilmiştir. Saha testleri normal işletme koşulları ve 120 km/sa livre hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Sapanca-B.Derbent Ölçümü livre hız profili



a)



b)

Şekil 11. Sapanca-B.Derbent ölçümü a) baş araç yüzey basınç verileri, b) son araç yüzey basınç verileri

3. Bulgular

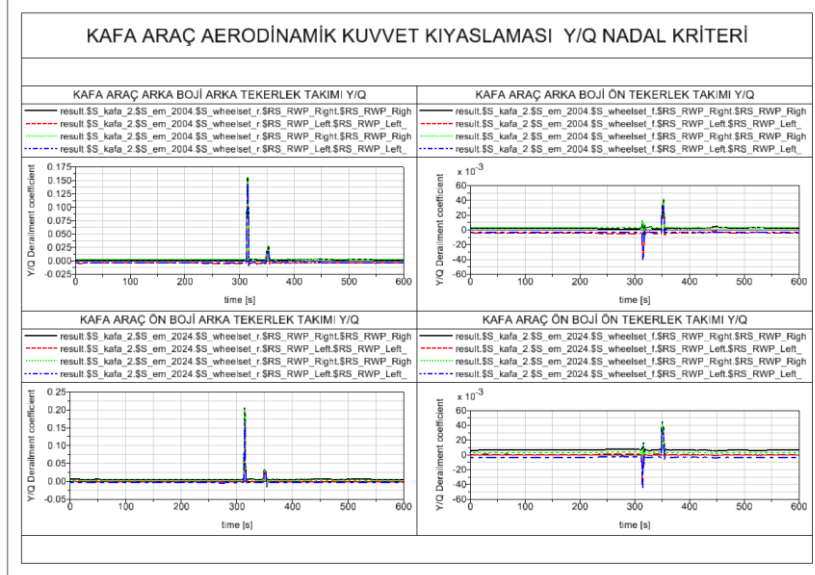
Testler ve simülasyonlarda livre hızı olarak belirlenmiş maksimum 120 km/sa araç hızında, mevsim normali olarak kabul edilen ve ölçüm gününde kayıt altına alınan 5.4 km/sa ortalama rüzgâr hızında toplanan aerodinamik kuvvetler simülasyona uygulandığında Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14' te görüleceği üzere seti oluşturan tüm vagonlarda aerodinamik kuvvetlerin yanıl stabiliteye etkisi nedeniyle Y/Q deray karakteristiğinde değişikliklerin olduğu gözlemlenmiştir.

Baş araçta aerodinamik etkilerden dolayı Nadal kriterinde oluşan fark 002 iken, orta3 araçta fark 0.017, orta2 araçta fark 0.020, orta1 araçta fark 0.019 ve son araçta fark 0.450 olduğu tespit edilmiştir.

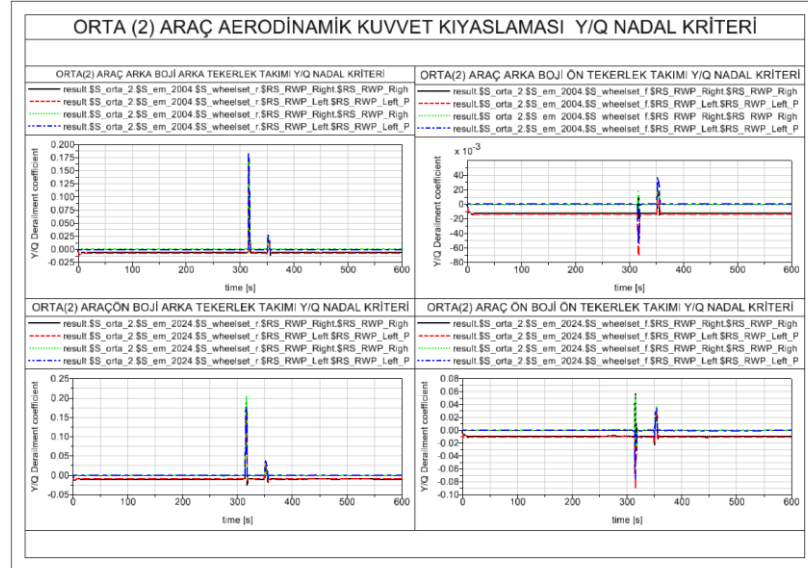
Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14' te kırmızı ve siyah eğriler; aerodinamik kuvvetlerin uygulandığı analizdeki boji/tekerlek takımında; siyah olan eğriler sağ tekerlek kontağını, kırmızı olan eğriler sol tekerlek kontağını temsil etmektedir,

Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14’ te mavi ve yeşil eğriler; aerodinamik kuvvetlerin uygulanmadığı durumdaki boji/tekerlek takımında; yeşil olan eğriler sağ tekerlek kontağını, mavi olan eğriler sol tekerlek kontağını temsil etmektedir.

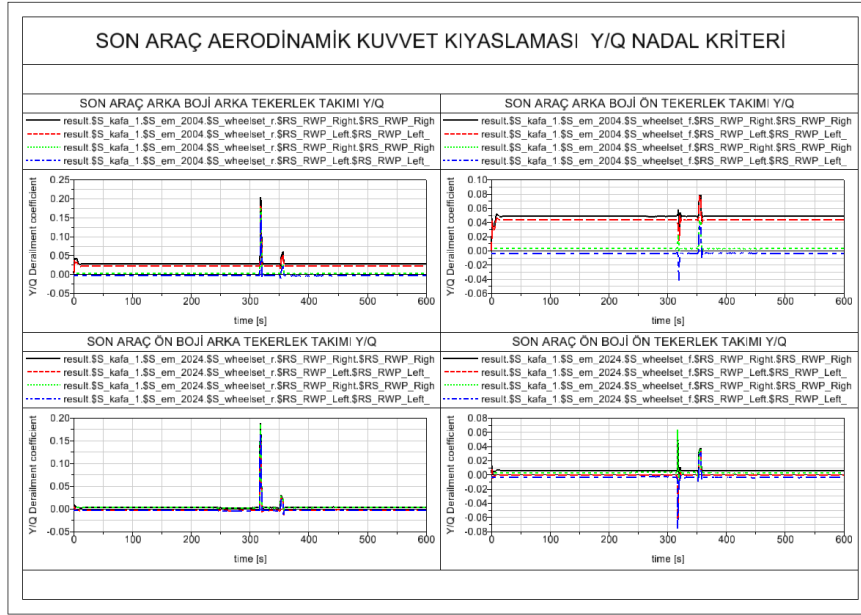
Eğrilerde temel olarak orta araçlar benzer özellik sergilediği için orta araçlar yaklaşık temsil eden orta2 aracının eğrileri verilmiştir.



Şekil 12. Baş araç Y/Q deray analizi



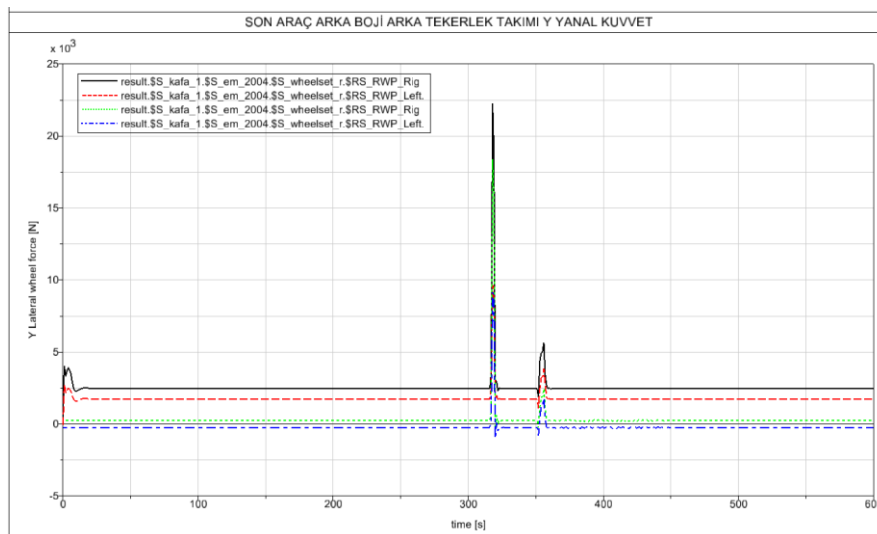
Şekil 13. Orta araçlar Y/Q deray analizi



Şekil 14. Son araç Y/Q deray analizi

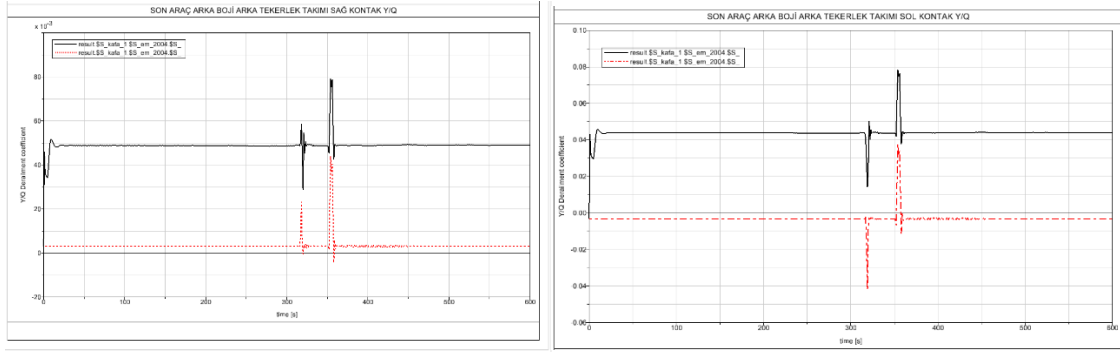
Sapanca-B.Derbent hattında livre hızı ile yapılan analizlerde öncelikle aerodinamik kuvvet büyüklüğü açısından en yüksek kuvvetlere baş araç maruz kalsa da yanıl salınım açısından en kritik vagonun son vagon olduğu tespit edilmiştir. Tüm tren setinin Y/Q deray analizlerinde en yüksek değer son araç arka bojide olduğu tespit edilmiştir. Tren setinin seyri esnasında en yüksek deray katsayısına sahip olan son araç arka bojide bulunan iki tekerlek takımı da incelendiğinde arka tekerlek takımının Y/Q deray değeri daha büyük olduğu için kontak analizleri için kritik tekerlek takımı olarak belirlenmiştir.

Kritik tekerlek takımının Y yanıl kuvvetlerin değışimi incelendiğinde (Şekil 15); aerodinamik etki altındaki sağ tekerlek kontağı (siyah eğri), aerodinamik kuvvetlerin etkilediğı sağ tekerlek kontağına (yeşil eğri) göre maksimum 3785 N luk bir yanıl kuvvet meydana geldiğı tespit edilmiştir. Sol tekerlek kontaklarında ise kırmızı eğri ile belirtilen aerodinamik etki altındaki sol tekerlek kontağı ile mavi eğri ile belirtilen aerodinamik kuvvetlerin etkilediğı sol tekerlek kontağına göre maksimum 3036 N luk bir yanıl kuvvet meydana geldiğı tespit edilmiştir.



Şekil 15. Kritik tekerlek takımı Y yanıl kuvvet değışimi

Aerodinamik kuvvetlerin modele eklenmesi ile meydana gelen ilave yanal kuvvet, Şekil 16a ve 16b’ de görüleceği üzere Y/Q olarak tanımlanan Nadal derayman değerinde de değişikliklere neden olmuştur. Kritik tekerlek takımı ray kontakları Nadal kriteri açısından değerlendirildiğinde aerodinamik kuvvetler yok iken sağ tekerlek kontağında Y/Q Nadal derayman değeri maksimum 0.0438, aerodinamik kuvvetler uygulanınca ise Y/Q Nadal derayman değeri %!80 değişerek 0.0794 ‘e yükselmiştir. Sol tekerlek kontağı için aerodinamik etkenler yok iken Y/Q Nadal derayman değeri maksimum 0.0375, aerodinamik kuvvetler uygulanınca Y/Q Nadal derayman değeri %209 artarak 0.0785 ‘e yükselmiştir.

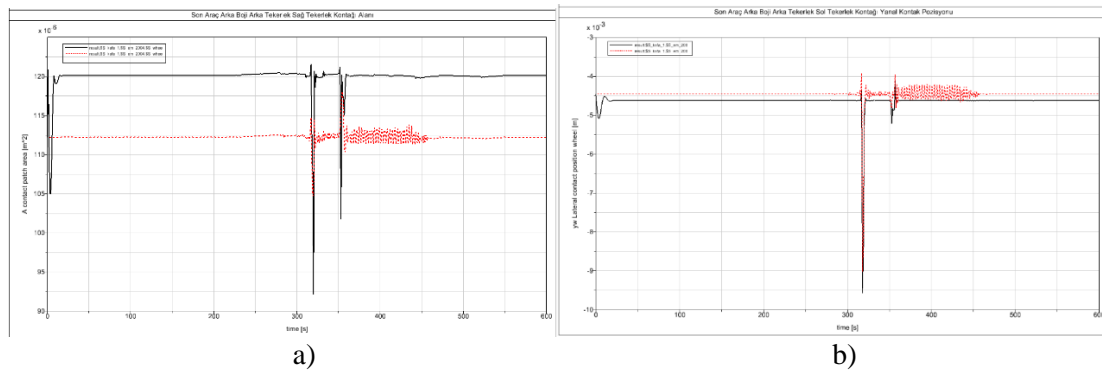


Şekil 16. Kritik tekerlek takımı a) sağ tekerlek kontağı Y/Q derayman katsayısı, b) sol tekerlek kontağı Y/Q derayman katsayısı

Aerodinamik kuvvetlerin modele uygulanması ile tekerlek-ray kontağındaki kuvvet değişimlerinden etkilenme durumunun incelenmesi gereken bir kontak parametresi de kontak alanıdır.

Kritik tekerlek takımı için kontak alan değişimleri incelendiğinde (Şekil 17a ve 17b); sağ tekerlek kontak alanı (Şekil 17a) (kırmızı eğri) aerodinamik kuvvet etkileri yok iken 113.8 mm², aerodinamik kuvvet uygulandıktan sonra (Şekil 17a) (siyah eğri) 121.6 mm² olmaktadır.

Sol tekerlek kontak alanları incelendiğinde (Şekil 17b) (kırmızı eğri) aerodinamik kuvvet etkileri yok iken 114 mm², aerodinamik kuvvet uygulandıktan sonra (Şekil 17b) (siyah eğri) 110 mm² olmaktadır.



Şekil 17. Kritik tekerlek takımı a) sağ tekerlek kontak alan değişimi, b) sol tekerlek kontak alan değişimi

4. Sonuç

Artan mobilite ihtiyacı ve çevre dostu ulaşım arayışı yolcu taşımacılığının demiryolu sektörü ile gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Seyahat sürelerinin güvenli bir şekilde kısaltılması ve

demiryolu araçlarının işletme hızlarının artması, araç tasarımlarında aerodinamik davranışların iyileştirilmesi ile mümkün olabilecektir.

Aerodinamik kuvvetlerin sürüş dinamiğine etkisinin araştırılması için bu çalışmada, literatürde bulunan metotların dışında, özgün olarak gerçek işletme şartlarına yakın bir dinamik model oluşturulmuştur. Bu model üzerinden, güvenlik açısından en kritik olan tekerlek takımı belirlenmiş ve bu tekerlek takımı ray kontaklarında aerodinamik kuvvetlerden dolayı oluşan yanal kuvvet değerleri analiz edilmiş ve oluşan aerodinamik yanal kuvvet kaynaklı kontak alan değişimleri hesaplanmıştır.

Aerodinamik kuvvetlerin sürüş dinamiğine etkisi için hazırlanan bu dinamik model yaklaşımı ile Milli EMU tren seti için ölçülen güzergâhta, livre hızlarında ve mevsim normallerinde olan bir rüzgâr etkisinde Y/Q deray katsayısı incelenmiş ve deray sınır olan 1.2 katsayısına ulaşmadan hat boyunun güvenli bir şekilde işletilebileceği belirlenmiştir. Ancak, ölçüm yapılan hattın bu çalışma esnasındaki rüzgâr hızının 5,4 km/sa olduğu ve 2023 yılı ölçülmüş maksimum rüzgâr hızının ise 62 km/sa olduğu, mevsimsel olarak birçok noktada rüzgârın 50 km/sa hıza ulaştığı göz önüne alınır, aerodinamik etkileri gerçek kararsız duruma yakınsayan bu dinamik analiz yaklaşımı ile demiryolu hatlarının risk haritasının oluşturulması, riskli belirlenen alanlar için bu dinamik model yaklaşımı ile araç bazlı simülasyonlar yapılması ve işletme hız azaltımının, bu risk analizi verilerine göre yapılması gerekmektedir.

Teşekkür

Desteklerinden dolayı, TCDD DATEM İşletme Müdürlüğüne, TCDD Yol Bakım Dairesi Başkanlığına, TCDD Taşımacılık A.Ş. Araç Bakım Dairesi Başkanlığına ve TÜRASAŞ Genel Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] C. Baker, 'A review of train aerodynamics Part 1 – Fundamentals', *The Aeronautical Journal*, cilt. 118, sayı. 1201, 2014.
- [2] Işık B. ve ark., “Yüksek hızlı trenlerde aerodinamik tasarımın önemi ve uluslararası standartlarda yapılan yenilikler,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı:10, ss. 75-83, 2019.
- [3] *Demiryolu uygulamaları, Demiryolu taşıtları seyir niteliklerinin kabul deneyleri - Seyir davranışlarının denenmesi ve durağan deneyler standardı*, TS EN 14363+A2, 2022.
- [4] Shift2Rail, "Final Report Summary - DYNOTRAIN (Railway Vehicle Dynamics and Track Interactions Total Regulatory Acceptance for the Interoperable Network)" 2013. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://cordis.europa.eu/project/id/234079/reporting>. [Erişim Tarihi: 17 Nisan 2023].
- [5] S. Giappino ve ark., “Cross wind and rollover risk on lightweight railway vehicles,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, cilt. 153, ss. 106–112, 2016.
- [6] *Demiryolu uygulamaları - Aerodinamik - Bölüm 6: Yanal rüzgârlara maruziyet değerlendirilmesi ile ilgili gerekler ve deney yöntemleri*, TS EN 14067-6, 2022.
- [7] C.J. Baker, “The simulation of unsteady aerodynamic crosswind forces on trains,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, cilt. 98, ss. 88–99, 2010.
- [8] M. Metin, “Raylı sistem araçlarının modellenmesi ve titreşimlerinin kontrolü,” Yüksek lisans tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.

Özgeçmiş**Erbil BİLGİN**

Lisans Eğitimini Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde, Yüksek Lisans Eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır, Doktora eğitimine Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde devam etmektedir. TÜVASAŞ Ar-Ge Dairesi ve Boji fabrikası müdürlüklerinde görev yaptıktan sonra, TCDD DATEM İşl. Müdürlüğünde Demiryolu Araçları Müdürlüğünde Ar-Ge mühendisliği ve DATEM Müdür yardımcısı olarak görev yapmıştır. TÜRASAŞ'ın kurulmasıyla birlikte Üretim, Planlama ve Kontrol Daire Başkanı olarak görev almış ve bu görevine devam etmektedir.

E-posta: erbil.bilgin@turasas.gov.tr

**Rahmi GÜÇLÜ**

Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde, 1985 yılında Lisans Eğitimini, 1988 yılında Yüksek Lisans Eğitimini, 1996 yılında ise Doktora Eğitimini tamamlamıştır. YTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Makine Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı Başkanı olarak görev yapmaktadır. Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ'nün, ilgi alanları arasında Makine Teorisi ve Dinamiği, Sistem Dinamiği Kontrolü, Taşıt Sistemleri Dinamiği, Mekanik Titreşimler ve Endüstriyel Gürültü konuları bulunmaktadır.

E-posta: guclu@yildiz.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede, bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Erbil BİLGİN: Analiz ve veri işleme çalışmaları, Rahmi GÜÇLÜ: Saha ölçüm planlaması ve proje yönetimi.