



Açıklanabilir Yapay Zekâ Tabanlı Denetimsiz Öğrenme ile Ray Kusur Tespiti

Selçuk Sinan KIRAT^{ORCID}, İlhan AYDIN^{ORCID}

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

**iaydin@firat.edu.tr*

(Alınış/Received: 10.01.2023, Kabul/Accepted: 06.02.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Demiryolları insanı ve yükünü geçmişten günümüze kadar taşımış, artan ilgi ve talep nedeniyle gelecekte de taşımaya devam edecektir. Demiryollarında güvenli seyir için ray sağlamlığının otonom olarak tespit edilip önceden önlem alınması önem arz etmektedir. Yapay zekâ tabanlı bilgisayarlı görüş uygulamaları kapsamında derin öğrenme modelleri ile otonom kusur tespiti yapılabilmektedir. Son yıllarda açıklanabilir yapay zeka yaklaşımı kusur (anomali) tespitinde popüler olmuştur. Sistem tarafından tespit edilen kusurun, niçin kusurlu olduğunun asıl karar verici olan insana açıklanması gerekmektedir. Bu çalışmada ray yüzey kusurlarını içeren etiketsiz görüntü veri seti ile sınıflandırıcı katmanları özelleştirilmiş Vgg16 ve MobileNetV3 Small ağları eğitilmiştir. Denetimsiz öğrenme ile etiketsiz verilerden sağlam rayların özelliklerini öğrenen ağlara, test için verilen görüntülerdeki kusurlar tespit ettirilmiştir. Kusurlar açıklama haritaları ile kullanıcıya gösterilmiştir. Ağların sınıflandırma başarısında Vgg16 %98, MobileNetV3 Small %96 doğruluk seviyesine ulaşırken, kusurlu bölgenin işaretlenmesini sağlayan açıklama haritalarında Vgg16'nin daha isabetli çıkarımlar yaptığı gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Açıklanabilir yapay zekâ, Denetimsiz öğrenme, Transfer öğrenme, Kusur tespiti, Vgg16, MobileNetV3 Small

Rail Defect Detection with Explainable Artificial Intelligence Based Unsupervised Learning

Abstract: Railways have carried people and their loads from the past to the present, and will continue to carry them in the future due to the increasing interest and demand. For safe transportation on railways, it is important to determine the rail strength autonomously and to take precautions beforehand. Within the scope of artificial intelligence-based computer vision applications, autonomous defect detection can be done with deep learning models. In recent years, the explainable artificial intelligence approach has become popular in defect (anomaly) detection. The defect that is detected by the system should be explained to the person who is the main decision maker, why it is faulty. In this study, Vgg16 and MobileNetV3 Small networks with customized classifier layers are trained with an unlabeled image dataset containing rail surface defects. With unsupervised learning, the networks that learned the properties of solid rails from unlabeled data were detected in the images given for testing. Defects are shown to the user with annotation maps. While Vgg16 reached 98% accuracy and MobileNetV3 Small 96% accuracy in the classification success of the networks, it was observed that Vgg16 made more accurate inferences in the annotation maps that marked the defective region.

Keywords: Explainable artificial intelligence, Unsupervised learning, Transfer learning, Flaw detection, Vgg16, MobileNetV3 Small

1. Giriş

Demiryollarında geçmiş günümüze, günümüz ise geleceğe taşınmaya devam etmektedir. Trenler çok uzun yıllardır insanoğlunun ulaşım ihtiyacını alternatiflerine göre daha ekonomik ve güvenli bir şekilde karşılamaktalar. Gelişen teknolojiye paralel olarak tüm ulaşım araçları gibi trenler de gelişmekte ve değişmektedir. Gün geçtikçe daha hızlı ve konforlu trenlerin hayatımızda var olması yolculuk yapmak isteyen insanları cezbetmekte, seyahat tercihinde trenleri seçmelerini

Atıf için/Cite as: 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

sağlamaktadır. Turizm ve tatil anlayışı değişen insanlar tren yolculuğunu farklı bir macera, egzotik bir yolculuk, yeni yerlerin keşfi vb. birçok farklı nedenle tercih edebilmektedir [1].

İnsanı ve yükünü taşıyan trenlerin güvenle seyredebilmesi için üzerinde ilerledikleri demiryollarının da güvenli olması gerekir. Bu güvenliğin bir boyutunu da rayların sağlamlığı oluşturmaktadır. Yıl boyunca zemine sabitlenmiş olarak dış ortamdaki her türlü fiziksel hava koşullarına, trenin uyguladığı baskı ve sürtünme kuvvetine maruz kalan raylarda çeşitli kusurlar meydana gelebilmektedir. Bu durum trenin raylardan çıkarak kaza yapmasına, can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir. Federal Railroad Administration (FRA)'ya göre 2015 – 2020 yılları arasındaki tren kazalarının %23'ü raylardaki kusurlar nedeniyle meydana gelmiştir [2]. Bu nedenle ray kusurlarının erkenden tespit edilerek önlem alınması önem arz etmektedir. Ray kusurları radyografi, sıvı penetrant, manyetik indüksiyon, ultrasonik, görme tabanlı yöntemlerle tespit edilebilmektedir. Son yıllarda bilgisayarlı görü çalışmalarının popüler olması nedeniyle ray kusurlarının tespitinde görme tabanlı yöntemler üzerinde araştırmacılar yoğunlaşmaktadır [3]. Çağımızda sıkça duyar olduğumuz “yapay zekâ” kavramı insanda heyecan uyandırmaktadır. Yapay zekâ; akıllı bir makine, akıllı bir bilgisayar programı ortaya çıkarma bilimi, mühendisliği olarak tanımlanmaktadır [4]. Yapay zekâ çalışmalarında akıllı bir sistem geliştirmek için makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmaktadır. Derin öğrenme, makine öğrenmesi algoritmalarından birisidir. Özellikle bilgisayarlı görü uygulamalarında veriden öznelik çıkarma işini otomatik hale getiren derin öğrenme, son yıllarda popüler olmuştur.

Hayatımızda birçok teknolojik aletin artık otonom olduğunu görebiliyoruz. Evlerde kullanılan süpürgeler, çocukların oyuncakları, kara, hava ve deniz araçları otonom olarak hareket edebilmekte, insan yerine bazı görevleri başarılı bir şekilde yerine getirebilmektedir. Makinelerin otonom davranış sergilemesi için çevrelerini algılaması, makine öğrenmesi vb. yöntemler ile algıladıkları çevreden gelen verilerle öğrenmesi ve aksiyon sergilemesi gerekir [5]. Bu durum yapay zekâ kavramının işaret ettiği akıllı makinelerle örnek teşkil etmektedir. Demiryollarında hareket eden trenlerin de otonom hareket edebilmesi, engel tanınması, önünü görebilmesi, çevresinden topladığı verilere göre karar verip aksiyon sergilemesi adına çalışmalar yapılmaktadır. Lokomotifler, tramvaylar üzerinde yapılan çeşitli çalışmalarda engel algılama gibi çeşitli görevler yerine getirilmektedir. Buna rağmen halen tam otonom bir sürüş yapılmamakta, insana ihtiyaç duyulmaktadır. Demiryolları ile ilgili olarak yapılan yapay zekâ çalışmaları şimdilik makinist, kondüktör, demiryolu işletmesi sorumlusu gibi görevlilerin karar vermelerine destek olmaktadır [6].

Yapay zekâ çalışmalarında sıkça kullanılan derin öğrenme modelleri, farklı mimarilerde tasarlanmış derin sinir ağlarından oluşmaktadır. Derin sinir ağları milyonlarca nöron, öğrenilebilir parametre, çok fazla derin katman içermektedir. Derin öğrenme modelleriyle eğitilen sistem öğrenmekte, yeni karşılaştığı verilere çeşitli çıktılar üretmektedir [7]. Gittikçe daha karmaşık hale gelen derin öğrenme modelleri kara kutu olarak ifade edilmekte olup, bu modellerin ürettiği çıktıların insan tarafından anlaşılabilmesi ve yorum yapılabilmesi adına “Açıklanabilir Yapay Zekâ” (Explainable Artificial Intelligence - XAI) yaklaşımı ortaya çıkmıştır [8]. Makine tarafından tahmin edilen basit bir kedi / köpek gibi sınıflandırma sonuçlarının açıklanabilir olması gerekmeyebilir. Fakat tıp ve sağlık alanında karar vericilere yardımcı olacak sistemin, bir dokunun kanserli olup olmadığı ile ilgili tahminlerinin açıklanabilir olması gerekir. Aksi halde sadece makinenin tahmin kararına güvenen bir cerrah, sağlam bir kişiyi gereksiz yere ameliyat edebilir. Benzer şekilde demiryolları gibi yüksek bütçeli ciddi işlerde sistemin ürettiği çıktının da açıklanabilir olması önemlidir. Makinenin de hata payının olduğu unutulmamalıdır. Makinenin verdiği kararlar açıklanabilir olduğunda, asıl karar verici olan insan açıklama bilgisine bakarak kararın uygulanması noktasındaki iradesini kullanabilir. Bu sayede hatalı aksiyonlar engellenebilir. Açıklanabilir yapay zekâ ile sistemin verdiği kararların alt yapısını gösteren açıklama haritaları insana gösterilir. İnsan, açıklama haritalarını incelediğinde makine tarafından alınmış muhtemel bir yanlış kararı algısal olarak fark edip yanlış bir aksiyon gösterilmesini

engelleyebilir. Makine öğrenmesinde kullanılan modellerden bazıları denetimli (supervised) ve denetimsiz (unsupervised) öğrenme başlıkları altında incelenebilir. Denetimli öğrenme olarak ifade edilen modellerde girdi olarak kullanılan verilerin etiket bilgileri uzman kişi tarafından belirlenmiştir. Denetimsiz öğrenme modellerinde uzman tarafından etiketlenmiş veri yoktur. Elde etiket bilgileri olmayan salt veriler vardır. Model bu verilerle eğitilir. Model girişte aldığı bu verilere etiket tahmini yapmaz. Aslında denetimsiz öğrenmede öğrenilen bilgi, modelin aldığı veriler içerisindeki gizli örüntülerdir [9-11]. Denetimsiz öğrenmeye özellikle etiketli veri elde etmenin zor, sınırlı olduğu ya da bulunmadığı durumlarda başvurulmaktadır. Demiryollarında binlerce kilometrelik hatlardan alınabilecek milyonlarca ray görüntüsü verilerinde sağlam ve kusurlu ray görüntülerinin tek tek uzman birisi tarafından etiketlenmesi meşakkatli bir iştir. Çoğu zaman derin öğrenme modellerinin eğitilmesi için demiryolları ile ilgili etiketlenmiş büyük veri bulunamamakta, bulunan verilerde ise kusurlu / kusursuz görüntü sınıflarına dahil veri sayılarında dengesizlikler olabilmektedir. Bu durumlarda elde olan sınırlı sayıdaki etiketsiz görüntü verisi ile denetimsiz öğrenme modellerinin kullanılması uygun olacaktır.

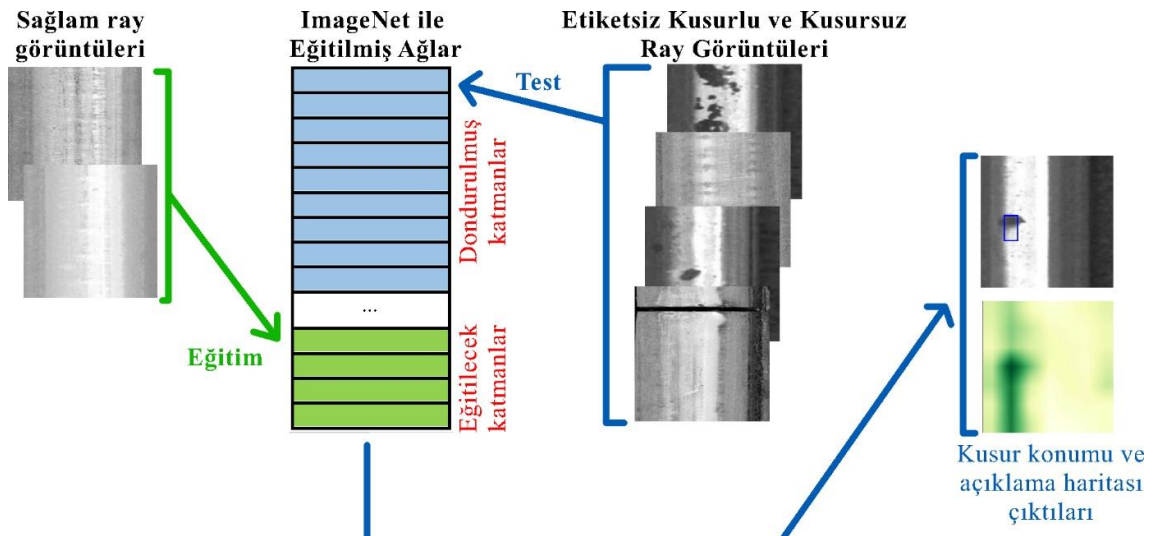
Ray kusurlarının tespit edilebilmesi amacıyla araştırmacılar çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Mızrak [12] ray yüzey görüntülerindeki kusurları görüntü işleme teknikleri ve bulanık mantık ile daha belirgin hale getirmeye çalışmıştır. Görüntülerdeki ışık yansımaları ve rayların metalik parlak yapısı nedeniyle tespiti zor olan kusurları sıradan kenar çıkarma algoritmalarına göre daha iyi ortaya çıkarabilmiştir. Çelik [13] görüntü işleme tekniklerini kullanarak ray-tekerlek temas bölgesini tespit etmiştir. Görüntüler üzerinde geliştirdikleri Yatay-Dikey ve Yatay-Yatay algoritmalarını kullanıp son aşamada kusur tespiti için ortalama ve eşikleme yöntemleri kullanmıştır. Aydın vd. [14] ray yüzey kusurlarının tespit etmek için derin öğrenme yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada GoogleNet ve SqueezeNet ağları 2000 ray görüntüsü ile eğitilmiştir. Eğitim neticesinde GoogleNet %96 doğruluk oranına ulaşmıştır. Wu vd. [15] demiryolu görüntülerinde rayları bölütlemek ve yüzey kusurlarını tespit etmek için hibrit bir derin ağ modeli önermişlerdir. RBGNet'in kullanıldığı çalışmada segmentasyon görevinin daha iyi gerçekleştirilebilmesi için ağı tahmin hatasının hesabında ikili çapraz entropi, yapısal benzerlik indeksi ölçümü, birleşim üzerinde kesişim (Intersection over Union-IoU) metriklerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir kayıp hesaplama yöntemi önermişlerdir. Zhang vd. [16] hizmet dışı raylardan toplanan görüntülerin segmentasyonunda karşılaşılan düzensiz aydınlatma, karmaşık arka plan ve kusurlu numune görüntüsü toplama gibi sorunların üstesinden gelebilmek çözümler önermişlerdir. Özellikle karmaşık arka plan bilgisinin olduğu örüntülerde segmentasyon doğruluğunu artırmak için MCnet ağını önermişlerdir. Nieniewski vd. [17] görüntünün morfolojik özellikleri üzerinde uyguladığı algoritmalarla ray yüzey hatalarını tespit etmişlerdir. Çalışmada görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Feng vd. [18] ray yüzey kusurlarını tespit etmek için MobileNetV2 ile MobileNetV3'ü görüntülerden özellik çıkarma görevinde omurga ağ olarak kullanmışlardır. Omurgada MobileNet sürümlerinin kullanıldığı çalışmanın algılama katmanlarında YOLOv3 ve FPN'den ilham alınarak tasarlanmıştır. Tasarlanan ağ ray yüzey kusurlarını yüksek doğrulukta tespit edebilmiştir. Wang vd. [19] ray yüzey kusurlarını tespit etmek için Mask R-CNN tabanlı yeni bir ağ önermişlerdir. Modelin başarısının değerlendirmesinde IoU metriğinin sınırlılıkları nedeniyle birleşim üzerinde tam kesişim (complete intersection over union-CIoU) metriğini önermişlerdir. Önerilen model çalışmada kullanılan veri setinde %98,7 ortalama kesinlik değerine ulaşmıştır. Ni vd. [20] ray yüzey kusurlarını tespit için bölümlenmiş kenar özellikleri (Partitioned Edge Features - PEF) ile yeni bir algoritma önermişlerdir. Görüntü işleme tekniklerinin kullanıldığı çalışmada kusurlar %88,49 hassasiyetle tespit edilmiştir. Zhang vd. [21] ray yüzey kusurlarını tespit etmek için evrimsel sinir ağlarına dayalı bir sistem önermişlerdir. Önerdikleri tespit sistemi tek atış çoklu kutu dedektörü (single shot multibox detector - SSD) ve YOLOv3 ağını içermektedir. Guo vd. [22] ray yüzey kusurlarının tespiti için özelleştirilmiş bir görüntü seti ile Mask R-CNN ağını eğitmişlerdir. Söz konusu ağın omurgasında farklı ağlar kullanarak deney yapmış, en iyi sonucun ResNet101 omurgası ile elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Kou [23] araştırmacıların ray yüzey kusur tespiti ile ilgili yaptıkları çalışmaları derlemiştir. Klasik görüntü işleme yöntemleri ve derin öğrenme

yöntemleri ile ray yüzey kusuru tespit çalışmalarının araştırıldığı çalışmada, görüntü işleme yöntemleri ile doğruluk oranının yaklaşık %80'lere kadar ulaşabildiğini, derin öğrenme yöntemlerinde doğruluk oranının %5-7 oranında iyileştirildiği ifade edilmiştir. Yazar ray yüzey kusur tahmini ile ilgili olarak yapılan çalışmaların yetersiz olduğunu sonuçların istikrarsız olduğunu, derin makine öğrenmesi yöntemlerinin umut vadettiğini ifade etmiştir.

Alan yazın incelendiğinde ray yüzey kusurları ile ilgili olarak çeşitli çalışmalar yapılmasına rağmen halen yetersiz olduğu, araştırmacıların yaptıkları bazı çalışmalarda sadece klasik görüntü işleme tekniklerini kullanırken bazı çalışmalarda ise derin öğrenme yöntemleri ile görüntü işleme tekniklerini harmanladıkları, farklı derin ağları özelleştirerek çözüm önerisi sundukları gözlemlenmektedir. Derin ağların esnek yapısı sayesinde araştırmacılar ağa özgürce müdahale ederek değiştirebilmekte, birden fazla ağ birleştirerek hibrit modeller ortaya çıkabilmektedirler. Tüm bunların yanında ray yüzey kusuru tespiti için kullanılan veriler sayıca yeterli değildir. Ayrıca ray yüzeyindeki parlamalar, ışık dengesizlikleri ve karmaşık arka plan görüntüleri gibi faktörler de araştırmacıları zorlamıştır. Ülkemizde milli imkânlarla yapay zekâ tabanlı otonom lokomotiflerin geliştirilebilmesi için derin öğrenme modellerinin kullanıldığı bilgisayarlı gözü uygulamalarına ağırlık verilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma, açıklanabilir yapay zekâ tabanlı denetimsiz öğrenme modeli ilkelerine uygun olarak derin öğrenme ağları ile ray yüzey kusurlarını tespit etmeyi amaçlamaktadır. Açıklanabilir yapay zekâ ve denetimsiz öğrenme yaklaşımının esas alındığı bu çalışma, ray yüzey kusur tespitinde araştırmacılara yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

2. Metot

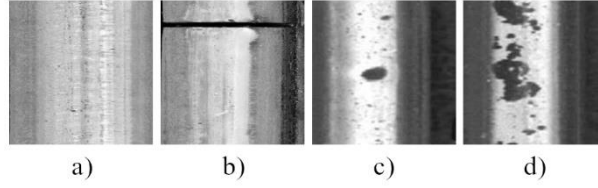
Çalışmada takip edilen yöntemde ilk olarak ImageNet verileri ile önceden eğitilmiş Vgg16 ve MobileNetV3 ağlarının özellik çıkarım katmanlarından bazıları dondurularak gerçekte sağlam olan etiketsiz ray görüntüleri ile alt katmanlar tekrar eğitilmiştir. Ardından sağlam ray görüntülerinin özelliklerini öğrenen ağlara ilk kez verilen test görüntülerinde kusur (anomali) tespiti yaptırılmıştır. Kusurlu bölgenin çerçeve içerisine alındığı çalışmada açıklama haritaları çıkarılmıştır. Bu süreç Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Çalışma yöntemi şeması

2.1. Veri seti

Çalışmada kullanılan veriler lokomotif altına yerleştirilmiş kameralardan elde edilen 1838 görüntüden oluşmaktadır. Şekil 2'de veri setindeki bazı örnekler görülmektedir.



Şekil 2. Veri seti görüntü örnekleri a) Sağlam ray b) Birleşim kusuru c) Hafif çöküntü kusuru d) Büyük çöküntü kusuru

Şekil 2’de görüldüğü gibi veri seti, raylardaki 4 farklı durumu temsil eden görüntülerden oluşmaktadır. Görüntüler 224x224 boyutunda, 3 kanallı “.jpg” formatındadır. Veri setinde 492 adet sağlam, 408 adet birleşim kusuru, 608 adet hafif çöküntü kusuru, 330 adet büyük çöküntü kusuru görüntüsü bulunmaktadır. Bu görüntülerden 443 adet sağlam görüntü derin öğrenme modellerini eğitmek için kullanılmıştır. Geriye kalan 49 adet sağlam ve diğer kusurlu görüntüler etiketsiz olarak modellere test için verilmiştir. Denetimsiz öğrenme gereği modeller, kendilerine etiketsiz olarak verilen bu görüntülerden eğitim esnasında sağlam olanları öğrenecek, test esnasında ilgili görüntülerdeki anormal durumları tespit edecektir. Modeller eğitilirken paket boyutu (batch size) 10, öğrenme oranı (learning rate) 0.0001, devir (epoch) parametresi ise 10 olarak belirlenmiştir. Modellerin eğitimde kayıp fonksiyonu olarak çarpaz entropi (cross entropy) kullanılmıştır. Ayrıca %20 oranında 5 katlı k-fold çarpaz doğrulama ayarlanarak modeller eğitilmiştir..

2.2. Özelleştirilmiş Vgg16 modeli

Vgg16, Simonyan vd. [24] tarafından önerilmiş bir derin öğrenme modelidir. 11 - 19 sayıda katman içerebilecek şekilde farklı konfigürasyonlarla kullanılabilir. Vgg16 konfigürasyonu ImageNet tarafından 2014 yılında yapılan büyük ölçekli görüntü tanıma yarışmasında birinci olmuştur. Tablo 1’de VGG16’nın mimarisi verilmiştir.

Tablo 1. Vgg16 mimarisi

Seviye	Giriş Boyutu	Operatör	Çıkış Boyutu
1.1	$224^2 \times 3$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$224^2 \times 64$
1.2	$224^2 \times 64$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$224^2 \times 64$
1.3	$224^2 \times 64$	Max Pooling (k: 2^2)	$112^2 \times 128$
2.1	$112^2 \times 128$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$112^2 \times 128$
2.2	$112^2 \times 128$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$112^2 \times 128$
2.3	$112^2 \times 128$	Max Pooling (k: 2^2)	$56^2 \times 256$
3.1	$56^2 \times 256$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$56^2 \times 256$
3.2	$56^2 \times 256$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$56^2 \times 256$
3.3	$56^2 \times 256$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$56^2 \times 256$
3.4	$56^2 \times 256$	Max Pooling (k: 2^2)	$28^2 \times 512$
4.1	$28^2 \times 512$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$28^2 \times 512$
4.2	$28^2 \times 512$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$28^2 \times 512$
4.3	$28^2 \times 512$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$28^2 \times 512$
4.4	$28^2 \times 512$	Max Pooling (k: 2^2)	$14^2 \times 512$
5.1	$14^2 \times 512$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$14^2 \times 512$
5.2	$14^2 \times 512$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$14^2 \times 512$
5.3	$14^2 \times 512$	Conv. (k: 3^2) + ReLU	$14^2 \times 512$

5.4	$14^2 \times 512$	Max Pooling (k: 2^2)	$7^2 \times 512$
6.1	$7^2 \times 512$	Fully Connected + ReLU	1×4096
6.2	1×4096	Fully Connected + ReLU	1×4096
6.3	1×4096	Fully Connected + ReLU	1×1000
6.4	1×1000	Softmax	1000

Tablo 1’de görülen orijinal Vgg16 mimarisinde 6.1 seviyesine kadarki operatörler görüntülerden çeşitli özellik haritaları çıkarmaktadır. 6.1 ve sonrasındaki operatörler ise sınıflandırma görevini yerine getirmektedir. Operatörler içerisinde görünen “k: X^2 ” ifadeleri kernel (çekirdek) boyutunu belirtmektedir.

Vgg16 üzerinde yapılan özelleştirme 6.1 ve sonrasındaki operatörleri kapsamaktadır. 6.1 ve 6.2 operatörleri çıkarılarak yerine tek bir ortalama havuzlama katmanı getirilmiştir. Ortalama havuzlama katmanı modelin görüntü üzerinde aranan nesneyi bulması için katkı sağlamaktadır [25]. Bu görevde kusur tespiti yapıldığı için model çıkışının kusurlu ya da kusursuz iki seçeneği olması gerekir. Bu nedenle Softmax operatöründe model çıkışı 2 olarak değiştirilmiştir. Vgg16 sınıflandırıcı katmanlar üzerinde yapılan özelleştirmeler Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Vgg16 Modeli sınıflandırıcı kısmında yapılan özelleştirme

Seviye	Giriş Boyutu	Operatör	Çıkış Boyutu
6.1	$7^2 \times 512$	Avg Pooling (k: 7^2)	$1^2 \times 512$
6.2	$1^2 \times 512$	Fully Connected	1×2
6.3	1×2	Softmax	2

Tablo 2’de özelleştirilen Vgg16 modelinin sonunda bulunan sınıflandırıcı kısmı görülmektedir. Ortalama havuzlama (Avg Pooling) operatöründe 7×7 ’lik kernel (k: 7^2) kullanılmıştır. Operatördeki görüntü giriş boyutu 7×7 ’lik olduğu için aynı boyutta ayarlanan çekirdek, giriş görüntüsündeki tüm piksel değerlerinin ortalamasını alarak tek bir değer elde eder. Bunun sonucunda 7×7 ’lik 512 adet görüntü için 512 sayısal değer elde edilir. Ayrıca yapılan özelleştirmede negatif değerler açıklama haritalarında önem arz ettiği için ReLU fonksiyonu çıkarılmıştır. ReLU fonksiyonu sıfırın altındaki değerleri elemine etmektedir [26]. Derin öğrenme modellerinin ilk katmanları genellikle kenar, köşe bilgisi gibi basit özellikleri çıkarmaktadır [27]. Bu nedenle modelin tamamını eğitmek yerine, önceden eğitilmiş modelin ilk katmanlarını dondurup, sadece son katmanlarının eğitilmesi sağlanmıştır. Yapılan bu işleme literatürde “Transfer Öğrenme” denilmektedir. Bu çalışmadaki transfer öğrenme yaklaşımı “Özellik Çıkarıcı Metot” olarak ifade edilmektedir [28]. Çalışmada Tablo 1’de görülen 4.3 operatörüne kadarki (4.3 dahil) katmanlar dondurulmuş, gerisi eğitim için ayrılan etiketsiz ray görüntüsü verileriyle eğitilmiştir.

2.3 Özelleştirilmiş MobileNetV3 Small modeli

MobileNetV3 Small, Howard vd. [29] tarafından 2019 yılında özellikle cep telefonu CPU’ları için tasarlanmış bir ağıdır. MobileNetV3 Small, özellikle düşük kaynak tüketimi ile ön plana çıkmaktadır. Modelin orijinal mimarisi Tablo 3’te görülmektedir.

Tablo 3. MobileNetV3 Small mimarisi

Seviye	Giriş Boyutu	Operatör	Çıkış Boyutu
1.1	$224^2 \times 3$	Conv. (k: 3^2) + h-swish	$112^2 \times 16$
2.1	$112^2 \times 16$	Bottleneck* (k: 3^2) + ReLU	$56^2 \times 16$

3.1	$56^2 \times 16$	Bottleneck (k: 3^2) + ReLU	$28^2 \times 24$
3.2	$28^2 \times 24$	Bottleneck (k: 3^2) + ReLU	$28^2 \times 24$
4.1	$28^2 \times 24$	Bottleneck* (k: 5^2) + h-swish	$14^2 \times 40$
4.2	$14^2 \times 40$	Bottleneck* (k: 5^2) + h-swish	$14^2 \times 40$
4.3	$14^2 \times 40$	Bottleneck* (k: 5^2) + h-swish	$14^2 \times 40$
4.4	$14^2 \times 40$	Bottleneck* (k: 5^2) + h-swish	$14^2 \times 48$
4.5	$14^2 \times 48$	Bottleneck* (k: 5^2) + h-swish	$14^2 \times 48$
4.6	$14^2 \times 48$	Bottleneck* (k: 5^2) + h-swish	$7^2 \times 96$
4.7	$7^2 \times 96$	Bottleneck* (k: 5^2) + h-swish	$7^2 \times 96$
4.8	$7^2 \times 96$	Bottleneck* (k: 5^2) + h-swish	$7^2 \times 96$
5.1	$7^2 \times 96$	Conv. * (k: 1^2) + h-swish	$7^2 \times 576$
6.1	$7^2 \times 576$	Avg Pooling (k: 7^2)	$1^2 \times 576$
6.2	$1^2 \times 576$	Conv. (k: 1^2) + h-swish	$1^2 \times 1024$
6.3	$1^2 \times 1024$	Conv. (k: 1^2)	$1^2 \times 1000$
6.4	$1^2 \times 1000$	Softmax	1000

Tablo 3'te görülen mimaride “Darboğaz (Bottleneck)” olarak adlandırılan yapı kendi içerisinde 1×1 'lik çekirdeğin uygulandığı evrişim katmanlarını, 3×3 ya da 5×5 'lik çekirdeğin uygulandığı evrişim katmanlarını barındırmaktadır. “Bottleneck*” yapısı ise içerisinde Squeeze and Excitation olarak adlandırılan bir dizi operatör bulundurmaktadır. Bu yapı içerisinde Ortalama Havuzlama (Avg Pool.), Conv. operatörleri ile ReLU ve hard-sigmoid aktivasyon fonksiyonları bulunmaktadır [29]. MobileNetV3 Small üzerinde yapılan özelleştirme Tablo 3'te görülen 6.1 ve sonraki operatörleri kapsamaktadır. Tablo 3'e bakıldığında modelde 6.1 operatörüne kadarki kısmı görüntü özelliğini çıkarırken 6.1 ve sonrası sınıflandırma görevini yerine getirmektedir. Bu çalışmada MobileNetV3 Small modeli sınıflandırıcısı üzerinde Tablo 4'teki özelleştirmeler yapılmıştır.

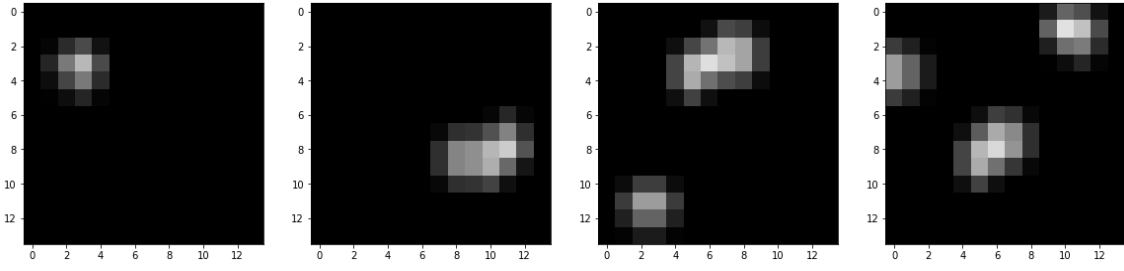
Tablo 4. MobileNetV3 Small Modeli sınıflandırıcı kısmında yapılan özelleştirme

Seviye	Giriş Boyutu	Operatör	Çıkış Boyutu
6.1	$7^2 \times 576$	Avg Pooling (k: 7^2)	$1^2 \times 576$
6.2	$1^2 \times 576$	Fully Connected	1×2
6.3	1×2	Softmax	2

Tablo 4'teki özelleştirmeler yapıldıktan sonra modelin Tablo 3'te görülen 4.6 seviyesine kadarki (4.6 dahil) operatörlerin ağırlıkları dondurulmuş, gerisi eğitim için ayrılan etiketsiz ray görüntüsü verileriyle eğitilmiştir. Burada ağırlıkların dondurulması için belirlenen katman, deneysel olarak en iyi sonucun alındığı katmandır.

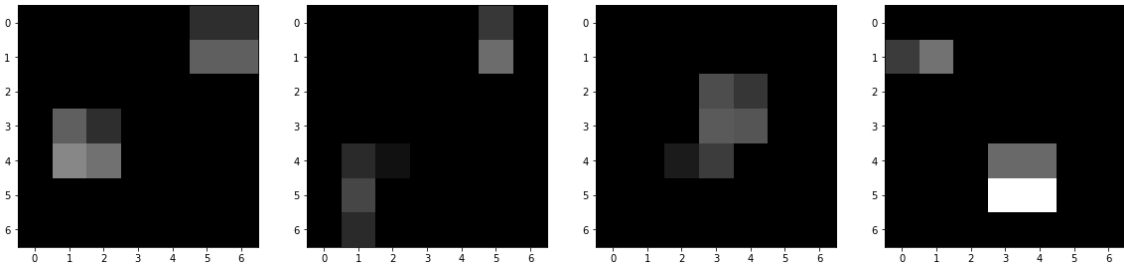
2.4. Açıklama haritalarının oluşturulması

Derin ağlarda basit kenar-köşe bilgileri ilk katmanlarda, daha önemli bilgiler ise son katmanlarda ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada Vgg16 modeli için Tablo 1'de görülen 5.3 operatöründeki evrişim (Conv.) katmanı çıktısı seçilmiştir. Seçilen katman 14×14 'lük 512 adet özellik haritası vermektedir. Şekil 3'te bunlardan birkaçı görülmektedir.



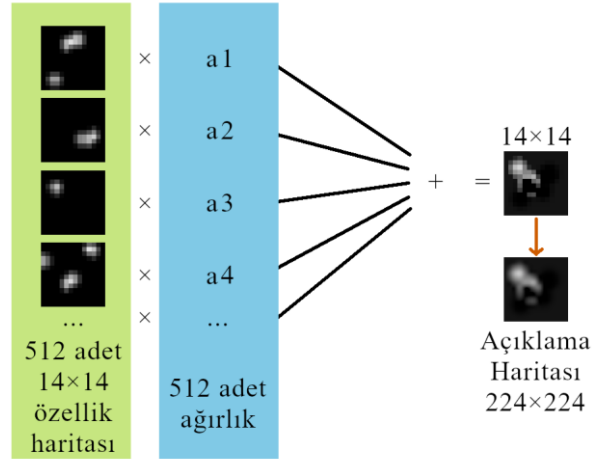
Şekil 3. Vgg16'dan elde edilen bazı özellik haritaları

Benzer biçimde MobileNetV3 Small ağında özellik haritası çıkarımı için Tablo 3'te görülen 5.1 operatöründeki evrişim katmanı seçilmiştir. Bu katman ise 7×7 'lik 576 adet özellik haritası vermektedir. Şekil 4'te bunlardan birkaçı görülmektedir.



Şekil 4. MobileNetV3 Small'dan elde edilen bazı özellik haritaları

Tablo 2'de görülen Vgg16 sınıflandırıcı özelleştirmesinde 6.2 operatörü 512 adet ağırlık değerine sahiptir. Bu ağırlıklar ağ tarafından öğrenilmişlerdir. Vgg16 modeli için özellik haritalarının çıkarılma sürecinde yapılan, bu ağırlık verileri ile Şekil 3'te birkaçı görülen toplamda 512 adet özellik haritasının çarpılarak toplanmasıdır. Şekil 5'te bu süreç gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5. Vgg16 modelinde açıklama haritasının oluşturulması

Şekil 5'ten anlaşılacağı gibi özellik haritalarındaki her bir piksel değeri ile karşısındaki ağırlık değeri çarpılarak yeni haritalar elde edilir. Elde edilen 512 adet harita toplanarak tek bir harita elde edilir. Nihayetinde ortaya çıkan açıklama haritası 224×224 boyutuna getirilerek ekranda gösterilir.

MobileNetV3 Small modeli için de açıklama haritalarının ortaya çıkarılma süreci Şekil 5'teki gibidir. Vgg16'dan farkı, Tablo 3'te görünen 5.1 operatörü özellik haritalarının 576 adet ve 7×7'lik boyutta olmasıdır. Elbette ki bu haritalara karşılık gelen ağırlıklar (Tablo 4'te 6.2 operatörü) da 576 adettir. Şekil 5'teki işlemin aynı uygulandığında sonuçta ortaya çıkacak 7×7'lik açıklama haritası 224×224 boyutuna getirilerek kullanıcıya gösterilir. Şekil 3 ve Şekil 4'teki özellik haritaları, Tablo 1 ve Tablo 3'te mimarileri verilen ağların görüntü verileri üzerinde çıkardıkları çeşitli özellikleri göstermektedir. Kullanıcıya gösterilen açıklama haritasının oluşturulmasında ağırlıklar etkili olmaktadır. Ağırlık ne kadar büyük ise kendisiyle çarpılan özellik haritası, açıklama haritasının biçimine o oranda etkili olmaktadır. Dolayısıyla küçük ağırlıklarla çarpılan özellik haritaları, açıklama haritasının biçiminin belirlenmesinde pek fazla etkili olmamaktadır. Esasında açıklama haritası olarak ifade edilen yapı, farklı ağırlıklardaki özellik haritalarının birleşimidir.

3. Bulgular

ImageNet verileriyle önceden eğitilmiş Vgg16 ve MobileNetV3 Small derin öğrenme modellerinin dondurulmayan katmanları 10 epoch eğitilmiştir. Modeller, Tesla T4 GPU ile 27,3 Gb RAM donanım kaynaklarına sahip Google Colab Pro ortamında eğitilmişlerdir. Her bir devir için ortalama eğitim süresi Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. Modellerin bir devir için ortalama eğitim süresi

Model	Süre (sn)
Vgg16	6,11
MobileNetV3 Small	5,62

Tablo 5'te görüldüğü gibi MobileNetV3 Small daha hızlı öğrenmektedir. Çapraz doğrulamalı eğitim sonucunda modellerin sınıflandırma başarısını gösteren karmaşıklık matrisi Şekil 6'da görülmektedir.

		Tahminler		Tahminler	
		Sağlam	Kusurlu	Sağlam	Kusurlu
Gerçekler	Sağlam	96	2	91	7
	Kusurlu	3	266	5	264
		a)		b)	

Şekil 6. Karmaşıklık matrisleri a) Vgg16 b) MobileNetV3 Small

Şekil 6 incelendiğinde Vgg16'nın etiketsiz görüntü verilerini daha iyi sınıflandırdığı anlaşılmaktadır. Modellerin doğruluk, kesinlik ve hassasiyet oranları Denklem 1, Denklem 2 ve Denklem 3'teki bağlantılarla bulunabilir.

$$\text{Doğruluk (Accuracy)} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

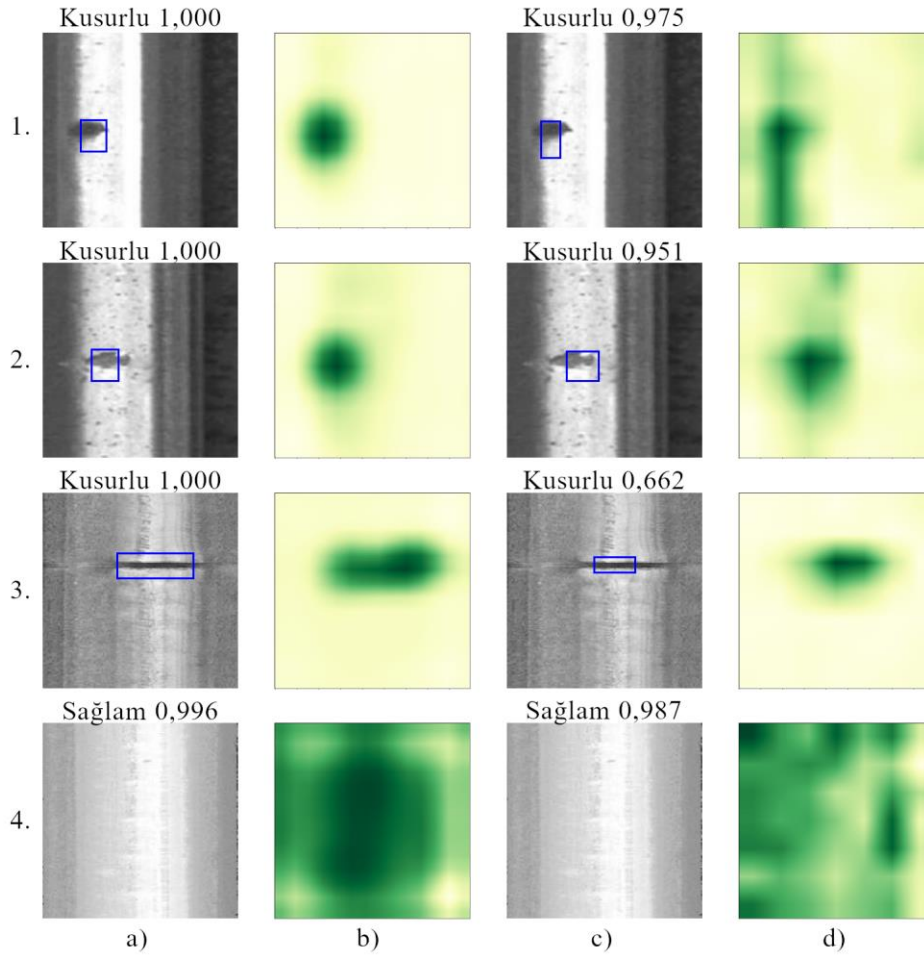
$$\text{Duyarlılık (Recall)} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

Şekil 6’da görülen karmaşıklık matrisinde gerçekte sağlam olup modeller tarafından sağlam olarak tahmin edilenler TP (True Positive), gerçekte kusurlu olup kusurlu tahmin edilenler TN (True Negative), gerçekte sağlam olup kusurlu tahmin edilenler FN (False Negative), gerçekte kusurlu olup sağlam tahmin edilenler FP (False Positif) olarak adlandırılmaktadır. Buna göre karmaşıklık matrisindeki verilerle Tablo 6’daki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6. Modellerin değerlendirme metrikleri

Metrik	Vgg16	MobileNetV3 Small
Doğruluk	0,98	0,96
Kesinlik	0,96	0,94
Duyarlılık	0,97	0,92

Tablo 6 incelendiğinde Vgg16’nın tüm metriklerde üstün geldiği görülmektedir. Şekil 7’de modellerin test görüntüleri için tahminleri ve açıklama haritaları görülmektedir.



Şekil 7. Modellerin test sonuçları a) Vgg16 kusur tespitleri b) Vgg16 açıklama haritaları c) MobileNetV3 Small kusur tespitleri d) MobileNetV3 Small açıklama haritaları

Şekil 7 incelendiğinde mavi çerçeve ile kusur tespiti yapan modellerin bu çerçeveyi neye göre çizdiği hemen yanındaki açıklama haritaları yardımıyla anlaşılmaktadır. Dördüncü satırdaki sağlam ray görüntüsü için modellerin ürettiği açıklama haritalarında yeşil renk, alanın geneline yayılmış iken kusurlu görüntülerde yeşil rengin belirli bir bölgede toplandığı gözlemlenmektedir. Bu durum denetimsiz öğrenme yaklaşımı ile öğrenen ağ modelleri için kusur olarak değerlendirilmekte ve ilgili kusur mavi sınırlayıcı kutu içerisine alınmaktadır. Vgg16'nın açıklama haritaları ve sınırlayıcı kutusunun daha isabetli olduğu, sınıf tahmini yüzdelerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada açıklanabilir yapay zekâ temelli bir yaklaşım ile ray yüzey kusurları tespit edilmiştir. Vgg16 ve MobileNetV3 Small modellerinin sınıflandırıcı katmanlarının özelleştirilmesiyle yapılan uygulamada, etiketsiz verilerle öğrenme ve ray yüzey kusurlarının açıklama haritaları ile tespitinde Vgg16 modeli 0,98 doğruluk oranı ile daha iyi başarı elde etmiştir. Sonuçlar demiryolları güvenliği için ileride geliştirilebilecek otonom sistemlerin alt yapısında açıklanabilir yapay zekâ uygulamalarının verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Asıl karar verici olan insan için önemli veriler sunan açıklanabilir yapay zekâ, olası hataları önleme adına daha fazla katkı sağlayabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından ADEP.22.02 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] V. Çakmak and A. Altaş, "Sosyal Medya Etkileşiminde Tren Yolculukları: DOĞU EKSPRESİ İle İlgili Youtube Paylaşım Videolarının Analizi," *Journal of Tourism and Gastronomy Studies*, vol. 6, no. 1, pp. 390–408, Mar. 2018, doi: 10.21325/jotags.2018.194.
- [2] P. Ravishankar, X. Zhang, and S. Hwang, "Detecting Defects of Railway Tracks by Using Computer Vision Methodology," in *IIE Annual Conference. Proceedings. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE)*, 2021, pp. 572–577.
- [3] O. Yaman, "Demiryolu Rayları İçin Gerçek Zamanlı Bulanık Otomata ile Görme Tabanlı Arıza Teşhis Sisteminin Geliştirilmesi," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [4] J. McCarthy, *What is AI?*, 2007. [Online]. Available: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/>
- [5] M. S. Bingöl, Ç. Kaymak, and A. Uçar, "Derin Öğrenme Kullanarak Otonom Araçların İnsan Sürüşünden Öğrenmesi," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 31, no. 1, pp. 177–185, 2019.
- [6] J. Gleichauf, J. Vollet, C. Pfitzner, P. Koch, and S. May, "Sensor Fusion Approach for an Autonomous Shunting Locomotive," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 495, no. January, Springer International Publishing, 2020, pp. 603–624. doi: 10.1007/978-3-030-11292-9_30.
- [7] R. A. S. Deliloğlu and A. Çakmak Pehlivanlı, "Hibrit Açıklanabilir Yapay Zeka Tasarımı ve LIME Uygulaması," *European Journal of Science and Technology*, no. 27, pp. 228–236, Aug. 2021, doi: 10.31590/ejosat.959030.
- [8] R. Terzi, "Sağlık Sektöründe Açıklanabilir Yapay Zeka," in *Yapay Zeka ve Büyük Veri Çalışmaları, Siber Güvenlik ve Mahremiyet*, Ş. Sağıroğlu and U. Demirezen, Eds. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 2021, pp. 157–175.
- [9] H. U. Dike, Y. Zhou, K. K. Deveerasetty, and Q. Wu, "Unsupervised Learning Based On Artificial Neural Network : A Review," in *2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*, 2018, pp. 322–327.
- [10] Z. Ghahramani, "Unsupervised Learning," in *Summer School on Machine Learning*, 2003, pp. 72–112.
- [11] M. Bilgin, "Gerçek Veri Setlerinde Klasik Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Performans Analizi," *Breast*, vol. 2, no. 9, pp. 683–688, 2017.

- [12] C. Mızrak, "Peridinamik Tabanlı Bulanık Mantık Algoritması Yardımıyla Ray Yüzeyindeki Kusurların Tam Spektrum Görüntü İşleme ile Tespiti," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 9, pp. 16–27, Jan. 2020, doi: 10.29130/dubited.831852.
- [13] A. Çelik, "Demiryolu Ray ve Kusurlarını Tespit Etmek İçin Geliştirilen İki Yeni Yöntem," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 12, pp. 52–63, Jul. 2020, doi: 10.47072/demiryolu.737624.
- [14] İ. Aydın, S. S. Kırat, and E. Akın, "Detection of Rail Surface Defects with Two Deep Learning Methods: Comparative Analysis," in *2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, May 2022, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU55565.2022.9864863.
- [15] Y. Wu, Y. Qin, Y. Qian, F. Guo, Z. Wang, and L. Jia, "Hybrid deep learning architecture for rail surface segmentation and surface defect detection," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 227–244, Feb. 2022, doi: 10.1111/mice.12710.
- [16] D. Zhang, K. Song, J. Xu, Y. He, M. Niu, and Y. Yan, "MCnet: Multiple Context Information Segmentation Network of No-Service Rail Surface Defects," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3040890.
- [17] M. Nieniewski, "Morphological Detection and Extraction of Rail Surface Defects," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 9, pp. 6870–6879, Sep. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.2975454.
- [18] J. H. Feng, H. Yuan, Y. Q. Hu, J. Lin, S. W. Liu, and X. Luo, "Research on deep learning method for rail surface defect detection," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 10, no. 4, pp. 436–442, Dec. 2020, doi: 10.1049/iet-est.2020.0041.
- [19] H. Wang, M. Li, and Z. Wan, "Rail surface defect detection based on improved Mask R-CNN," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 102, no. April, p. 108269, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.108269.
- [20] X. Ni, H. Liu, Z. Ma, C. Wang, and J. Liu, "Detection for Rail Surface Defects via Partitioned Edge Feature," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 6, pp. 5806–5822, Jun. 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3058635.
- [21] H. Zhang et al., "MRSDI-CNN: Multi-Model Rail Surface Defect Inspection System Based on Convolutional Neural Networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 11162–11177, Aug. 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3101053.
- [22] F. Guo, Y. Qian, D. Rizos, Z. Suo, and X. Chen, "Automatic Rail Surface Defects Inspection Based on Mask R-CNN," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2675, no. 11, pp. 655–668, Nov. 2021, doi: 10.1177/03611981211019034.
- [23] L. Kou, "A Review of Research on Detection and Evaluation of the Rail Surface Defects," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 19, no. 3, pp. 167–186, 2022, doi: 10.12700/APH.19.3.2022.3.14.
- [24] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition," *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*, pp. 1–14, Sep. 2014, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1409.1556>
- [25] B. Zhou, A. Khosla, A. Lapedriza, A. Oliva, and A. Torralba, "Learning Deep Features for Discriminative Localization," in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Jun. 2016, vol. 2016-Decem, pp. 2921–2929. doi: 10.1109/CVPR.2016.319.
- [26] A. F. Agarap, "Deep Learning using Rectified Linear Units (ReLU)," no. 1, pp. 2–8, Mar. 2018, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1803.08375>
- [27] G. Özbek and H. K. Ekenel, "Initialization of convolutional neural networks by Gabor filters," in *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, May 2018, no. May, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU.2018.8404757.
- [28] K. Fırıldak and M. F. Talu, "Evrişimsel Sinir Ağlarında Kullanılan Transfer Öğrenme Yaklaşımlarının İncelenmesi," *Anatolian Journal of Computer Science*, vol. 4, no. 2, pp. 88–95, 2019.
- [29] A. Howard et al., "Searching for MobileNetV3," in *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Oct. 2019, vol. 2019-Octob, pp. 1314–1324. doi: 10.1109/ICCV.2019.00140.

Özgeçmiş**Selçuk Sinan KIRAT**

1987 yılında Elazığ'da doğdu. 2009 yılında Fırat Ün. / Teknik Eğitim Fakültesi / Bilgisayar Öğretmenliği lisans programından, 2021 yılında Fırat Ün. / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği lisans programından mezun olmuştur. Fırat Ün. / Fen Bilimleri Enstitüsü / Bilgisayar Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans yapmaktadır. Elazığ İl Milli Eğitim Müdürlüğü bünyesinde Bilişim Teknolojileri ve Yazılım Öğretmeni olarak görev yapmaktadır. Bilgisayarlı görü uygulamaları ile ilgilenmektedir.

E-Posta: selcuk.s.kirat@gmail.com

**İlhan AYDIN**

1981 yılında Elazığ'da doğdu. Lisans ve Yüksek Lisans derecelerini Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde 2001 ve 2006 yıllarında aldı. Doktora derecesini 2011 yılında Fırat Üniversitesi, Elazığ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden aldı. Halen Fırat Üniversitesi'nde Bilgisayar Mühendisliği bölümünde Doçent 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

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: İlhan AYDIN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Selçuk Sinan KIRAT: Kaynaklar, Doğrulama, Yazılım, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Yüksek Hızlı Demiryolu Yatırımlarının Bölgesel Kalkınma Etkisinin ARAS Yöntemiyle Değerlendirilmesi

Furkan AKDEMİR^{ID}

Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Ankara, Türkiye

akdemirfurkan10@gmail.com

(Alınış/Received: 17.12.2022, Kabul/Accepted: 24.03.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Yüksek hızlı demiryolu gelişmiş bir teknoloji içeren üst ölçek planlama çalışmalarında kent ve bölge mekanlarını birbirine bağlayan, sosyal ve çevresel etkilere sahip çok boyutlu bir ulaşım aracıdır. Yüksek hızlı demiryollarının gündeme alındığı planlama ölçeklerinden birisi de bölge planlamasıdır. Bölge planlama çalışmaları ile bir ülke içindeki yerleşimlerde yaşanan kalkınma sorunlarına ışık tutulmakta ve yeni arayışlar geliştirilmektedir. Literatürde yapılan birçok çalışma yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının kalkınmaya olumlu etki ettiğini belirtmektedir. Bu çalışmada Türkiye’de Yüksek Hızlı Demiryolu yatırımlarının etkisinde kalan kentlerin kalkınma durumu 2013-2018 yılları için incelenmiştir. Çalışmada yapılan literatür incelemesi sonucu yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının kişi başı gelir, girişim sayısı, ihracat büyüklüğü gibi ekonomik, nüfus yoğunluğu gibi sosyal, enerji tüketimi gibi çevresel konular üzerindeki etkileri çalışmanın odaklandığı hususlardandır. Çalışma kapsamında Türkiye’de Yüksek Hızlı Demiryolu yatırımlarının etkisinde kalan kentlerin odaklanılan perspektiflerde yaşam kalitesi performansı incelenmektedir. İnceleme yapılırken ekonomik, sosyal ve çevresel birçok boyut ve kriteri inceleme kapasitesine sahip bir teknik olan ARAS metodu tercih edilmektedir. ARAS Metodu çalışma için belirlenen göstergelerin fayda fonksiyonu değerlerini hesaplayarak performans belirlemeye yardımcı olan bir metottur. Çalışma sonucunda incelenen 12 ilden 7’sinde (Karaman, Sakarya, Kütahya, Konya, Antalya, Bilecik, Adana) kentlerin performans açısından yüksek hızlı demiryolu yolcu taşıma etkinliğinin değişimine paralel olarak bir performans değişikliği yaşandığı görülmektedir. Yüksek hızlı demiryolu yatırımının etkilediği en önemli ilk üç performans göstergesi ise nüfus yoğunluğu, toplam girişim sayısı, toplam ihracat olarak tespit edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Bölge Planlama, Yüksek Hızlı Demiryolları, ARAS

Evaluating the Impact of High Speed Railways Investments on Regional Development with ARAS Method

Abstract: In terms of planning, high-speed rail is a multi-dimensional transportation system with advanced technology, economic, social and environmental effects that connects urban and regional spaces in upper-scale planning studies. Many studies in the literature indicate that high-speed railway investments have a positive effect on the development. In this study, the quality of life of the provinces affected by High Speed Railway investments in Turkey was examined for the years 2013-2018. As a result of the literature review, it is determined that high-speed railway investments have an impact on economic indicators such as per capita income, entrepreneurship, exports, social indicators such as population density, and environmental perspectives such as energy consumption. Within the scope of the study, the development performance of the provinces that are under the influence of High Speed Railway investments in Turkey is examined in the focused perspectives. While examining, the ARAS method, which is a technique that has the capacity to examine many economic, social and environmental dimensions and criteria, is preferred. The ARAS Method is a method that helps to determine performance by calculating the utility function values of the indicators determined for the study. As a result of the study, it is seen that 7 of the 12 provinces (Karaman, Sakarya, Kütahya, Konya, Antalya, Bilecik, Adana) experienced a change in performance in parallel with the change in the efficiency of high-speed rail passenger transport in terms of performance. The three most important performance indicators affected by high-speed railway investment are population density, total number of enterprises and total exports.

Atıf için/Cite as: F. Akdemir, “Yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının bölgesel kalkınma etkisinin ARAS yöntemiyle değerlendirilmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 14-25, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1220471

Keywords: Regional Planning, High Speed Railways, ARAS

1. Giriş

İnsan hayatının olmazsa olmazlarından olan ulaşım hizmetleri ülkeler açısından bölgeler arasında önemli bir entegrasyon aracıdır. Literatürde yaşam kalitesinin pozitif ilerlemeler kaydetmesi ve bu durumun kentler için devamlılığının sağlanması için özellikle yüksek hızlı trenlerin ekonomik, sosyal ve çevresel olumlu sonuçları beraberinde getiren entegrasyon gücü yüksek sistemler olarak tanımlanması dikkat çekmekte, teknolojik gelişmelerin büyük bir ivme kazanması ile küresel bir paydada buluşan ülkelerin ortak hedeflerinden birisinin de sürdürülebilirlik kavramı olduğu sıklıkla vurgulanmaktadır [1]. Ulaştırma, inşaat ve kentleşme gibi birçok dinamiğin etkinliğini yükselttiğinden ekonomide önemli bir kalkınma aracı olarak görülmektedir. Bu iki dinamikte yaşanan gelişmeler sonucunda bugün insanların önemli bir kısmının yaşadığı kentler gelişmekte ve büyümektedir [2].

Ulaşım yatırımlarının ekonomik, sosyal, çevresel boyutta sağlamış olduğu birçok fayda daha fazla insanın bu hizmeti talep etmesini sağlamaktadır. Ulaşım yatırımları birden fazla insana hizmet verilebilmesini sağlayacak hizmeti bünyesine katan teknolojiden kaynaklı olarak çoğunlukla pahalı yatırımlardır ve bundan dolayı büyük ekonomik güce sahip olan kamu otoriteleri tarafından gerçekleştirilmektedir. Önemli bir kamusal yatırım olarak görülmesinin sebeplerinden biri çok boyutlu oluşunun verdiği çarpan etkisinin üst düzey olmasından kaynaklanmaktadır [3,15]. Literatürde demiryolu yatırımlarının bölgeler arasında erişebilirlik bağlarının niteliğini yükselten bir araç olduğu da vurgulanmaktadır. Kentler arasında artan bağların bölgeler arası etkileşimleri de arttırdığı ve bu durumun oluşmasında demiryolunun payı da sık sık vurgulanmaktadır.

Bölge planlama çalışmaları bölgelerin kalkınma durumuna odaklanmakta çeşitli analiz çalışmalarının yapılması aracılığıyla farklı ekonomik koşullarda ortaya çıkan sorunlara ışık tutarak çözüm arayışının oluşmasına destek vermektedir. Fonksiyonel olarak bu planlama faaliyetleri ülkede yaşanan büyüme gelişmelerinin bölgeler arasında kıyaslanamaz oranlardan eşit seviyelere indirgenmesine ve bölgelerin birbirine entegre olmasına çalışmaktadır. Bölge kavramı boyut açısından üst düzey bir niceliğe sahiptir. Bundan dolayı bu kavramın kapsadığı sınırları tespit edebilmek oldukça zor bir iş olarak değerlendirilmektedir. Bölge kavramı kimi günümüz araştırmalarında coğrafi, kültürel, mekânsal, ekonomik bir harmoni içinde çözümlenip bir bütünsellik arz edebilen yerleşimlerin kümesini işaret etmek için kullanılmaktadır. Günümüzde teknoloji başta olmak üzere birçok alanda yaşanan gelişmeler küreselleşme konusunda ekonomi, ekoloji vb. yeni kulvarlar oluşturmakta ve devletler kendi yerleşim kümelerinin bölgeselleşme potansiyeline odaklanmaktadır. Şehir ve Bölge Planlama disiplini açısından bölge kavramı ekonomik yaklaşımlar kullanılarak yorumlanmaktadır. Bu yorumlarda genellikle değerlendirilen yerleşimler kümesinin insan yaşamı standartları çok boyutlu değerlendirmesi yapılmaktadır. İnsan yaşam standartlarının gelişmesi durumu olan kalkınma sadece ekonomik perspektifte yaşanan gelişmeleri değil ayrıca sosyal ve çevresel açıdan da yaşanan pozitif gelişmeleri de işaret etmektedir. Her ne kadar bölgeselleşme, adında benzer yerleşimlerin kümelenmesine yönelik bir çağrışım içerse de bölge konusunu tartışan bazı araştırmacılar bölgenin çok boyutlu olmasından ötürü bir ülkede kalkınmanın tüm bölgelerde aynı şekilde olamayacağını avantaja sahip olan yerlerin ön planda yer alacağını ve bunun kutuplaşma etkisi yaratacağını vurgulamaktadır [1]. Bu dengesizliklerin tespiti sonrasında yönetim otoriteleri planlama faaliyetleri aracılığıyla bölgeler arası oluşan farkları yatırım ve kaynakları yönlendirerek azaltmaya çalışmaktadır [5].

Bölge planlama perspektifinde özellikle ulaştırma sektörünün ekonomik, sosyal, çevresel ve politik faktörlerin denge üzerinde etkisi olması onu önemli bir yatırım aracı yapmaktadır. Hizmetler sektörünün önemli bir yatırım aracı olan ulaştırma bir yerleşimde iki ana hususa odaklanmaktadır. Bunlardan birisi doğal kaynakların kontrolünün sağlanıp tasarruf edilmesi, diğeri ise erişebilirlik bağı sağlanan bölgeler arasında bütünleşmeye ve dengeye katkı verilmesi

şeklinde. Bu hususların haricinde ise tarihi süreç içinde yurt savunmasındaki önemine sık sık vurgu yapıldığı görülmektedir. Kamunun ekonomik istikrarda daha etkin olduğu Keynesyen ekonomi politikalarını baz alan ülkelerde ulaşım önemli bir gider kalemi olarak karşımıza çıkmaktadır Yatırım türlerinin yaygınlaşmasında tetikleyici vazifesi gören bazı unsurlar bulunmaktadır. Ulaşım yatırımlarında bu konuda özellikle etkisi vurgulanan hususlardan birisi nüfus konusudur. Ulaşım yük ve yolcu taşınımının hizmet perspektifinde bir ifadesi olduğundan nüfusun fazla olduğu bölgeler dolayısıyla bu yatırımların yapılabileceği, potansiyel olarak gelişebileceği alanlar olarak değerlendirilmektedir. Nüfusun fazla olduğu bölgeler istihdama konu olmakta istihdam ise yük- yolcu dağıtımı açısından ulaşım yatırımlarına ihtiyaç duymaktadır. Bundan dolayı özellikle bahsi geçen fonksiyonlar açısından büyük ölçekli kullanımlara sahip olan ya da büyük ölçekli pozisyona ulaşmak isteyen kentlerin merkezlerinde, fonksiyonel düğüm odaklarında ulaşım yatırımlarının büyük önemi bulunmaktadır. Birim zamanda söz konusu kapsamda üst düzey faydaların elde edilmesi sistem kanallarında üst düzey kapasiteye sahip bileşenlerin yer alması aracılığı ile mümkün olabilmektedir. Üst düzey kapasite açısından ise bileşenlerin öncelikle zamana karşı yüksek hız, ekonomik kısıtlara karşı yüksek kapasite, çevresel kısıtlara karşı ise yüksek güvenli sistemler olması beklenmektedir. Günümüz teknolojilerinin ışığında bugün özellikle bölgeler arasında bu ulaşım için ulaştırma altyapısı ihtiyacı yüksek hızlı demiryollarının yatırımı aracılığıyla karşılanmaktadır [3].

Yüksek hızlı demiryolları geleceğin yük taşıma sistemleri olarak da görülmektedir. Avrupa Birliğinin gelecekte 2030-2050 yılları arasında özellikle yüksek hızlı demiryolu açısından %80'lere varan büyümeler hedeflediği vurgulanmaktadır. Benzer şekilde önemli bir ihtiyaç olan ulaşımın yolcu taşımacılığı bileşeni kapsamında ise belirtilen aralıklar sırasıyla önce %34 daha sonra ise %51'e varan hedefler olarak belirtilmektedir. Avrupa Birliğinin yüksek hızlı demiryolu oluşturmak için gündeminde olan konular sadece yolcu ve yük sayısında artışlar meydana getirmek değildir. Bunun haricinde özellikle raylı sistemin hinterlandını geliştirmek için 30.000 km'lik yüksek hızlı demiryolu ağı oluşturmak, AB dışındaki ülkeler ile bütünleşme sağlanması, üst düzey işletim hızlarına kavuşmak gibi hedefler de vurgulanmaktadır [4].

Yüksek hızlı demiryolları bünyesindeki tüm elemanları ile birlikte kalkınma açısından önemli katkılar vermektedir. Japonya demiryolu ağının yüksek hızlı treni Shinkansen'in gelişmeye olan etkisini inceleyen bir rapora odaklanan bir araştırmada Japonya'nın Tokyo kentine yüksek hızlı trenle bağlanan bir yerleşmenin yatırımdan sonra 4 yılda yüksek hızlı demiryolu istasyonundan kaynaklı olarak %8'lik bir büyüme kaydettiği belirtilmektedir [4].

Türkiye tarihinde demiryollarının tarihi süreç içerisinde diğer türlere kıyasla daha sonra geliştiği görülmektedir. Gelişim sürecini üst seviyeye taşıyan ülkelerde ulaşım açısından demiryolunun payı %10'larda seyretmekteyken bu oranın Türkiye'de %1,5'larda olduğu belirtilmektedir. Literatürde demiryolu yatırımlarının özellikle ülkede en fazla olumsuzluk yaşanan ekonomik alanlardan birisi olan enerji sektörü açısından olumlu sonuçlar getirebilecek kapasitede olduğunun altı çizilmektedir. Bu yönüyle yüksek hızlı demiryolu yatırımları ülkede büyüme, kalkınma için önemli bir araç olarak görülebilir. Araştırmalarda sıklıkla vurgulandığı üzere ulaşım yatırımları çok boyutlu olmasından dolayı insan hayatı üzerinde sosyo-ekonomi yapı başta olmak üzere birçok önemli etkiye sahiptir. Yatırımların bölge planlama yazınında sektörel ekonomik gelişmelerin tetikleyicisi olduğu ve bölgelerarası dengesizlikleri giderdiği vurgulanmaktadır. Ulaştırma sektörünün dolaylı etkilerinin arasında bölgelerarası iş bölümü konusunda entegrasyon sağlayıcı bir niteliğe sahip olduğu belirtilmektedir [3].

Türkiye'nin Yüksek Hızlı Demiryolu konusuna ağırlıklı olarak 10. Kalkınma planında yer verdiği görülmektedir. Öngörü olarak ülkede 2023 yılına kadar 11.000 km hızlı demiryolu hattının tamamlanması ön plana çıkan hedefler arasında yer almaktadır. Bunun haricinde uluslararası öngörülerde ise ülkeler arası bağlantı sağlayacak yüksek hızlı demiryolu yatırımları arasında

Türkiye’de doğu ve batı arasında önemli bir yük ve yolcu taşıma aksının bileşenini içermek hedeflenmektedir [2].

Literatürde kalkınma ve yüksek hızlı tren yatırımları arasında pozitif ilişkilere işaret edilmektedir. Ancak yüksek hızlı tren yatırımlarının etkilediği kalkınma unsurları üzerine hangi unsurun diğerine göre daha önemli olduğuna dair derinlemesine bir sayısal irdeleme bulunmamaktadır. Bu yüzden bu çalışmada hem literatürde işaret edilen göstergelerin önem değerine yönelik sayısal bir değerlendirme yapılmakta hem de yatırıma konu olan illerin göstergeler açısından kalkınma performansı sorgulanmaktadır. İşaret edilen göstergelerden hangileri diğerinden daha fazla önem arz etmektedir? Bu göstergeler bazında yüksek hızlı tren yatırımlarının etkisi altından olan illerin performansı zaman içinde olumlu veya olumsuz olarak etkilenmekte midir? Bu performansta yüksek hızlı trenlerin bir rolü var mıdır? Çalışmada bu soruların cevabı aranmaktadır. Tabloda daha önce yapılan benzer çalışmalar bu çalışmaların birbirinden farklılık arz eden odaklarına yer verilmektedir.

Tablo 1. Literatür İrdelemesi

Çalışma Adı	Odak Noktası
“Küreselleşen Dünyada Bölgesel Kalkınma Dinamikleri, Kamu Politikaları ve Bölgesel Kalkınma Ajansları”, 2011 [1]	Ağırlıklı olarak kalkınma göstergeleri,
“Yüksek Hızlı Demiryolları, Üretim ve Ekonomik Kalkınmaya Etkisinin İncelenmesi.”, 2020 [2]	Göstergelerin bazı ülkeler ve bazı şehirler için karşılaştırılması
“Demiryolu Ulaşımı ve Türkiye’de Hızlı Tren Yatırımlarının Etkileri: Eskişehir-Konya Örneği”, 2017 [3]	İki şehir bazında performans ölçümü
“Bir Planlama Sorunsalı Olarak Bölgelerarası Dengesizlik: Türkiye Örneği”, 2018 [5]	Bölgelerarası dengesizlik

Yüksek hızlı demiryolu yatırımları konusunda literatür üzerinde yapılan incelemeler yatırımların etki ettiği bölgelerde ekonomik hareketliliklerin olduğuna işaret etmektedir. Kavramsal olarak bölgelerde ekonomik hareketlilikler ile birlikte yerleşim alanları gelişmekte yeni yatırımlar oluşmaktadır. Yeni yatırımlar, yeni işyerlerini ve konutları oluşturmakta bu alanların oluşumu ve gelişimi ile enerji tüketimi giderek artmaktadır. Bu gelişim sürecini takiben toplam ihracat ve gelir konularında bir artış yaşanmaktadır. Literatürde değişim yaşanan bu hususlar bölgeler arası farklılıkların olup olmadığını hangi bölgenin kalkınmış olduğunu anlamayı sağlayan birer indikatör görevi görmektedir. Örneğin; Toplam ihracat ve gelir indikatörü bölgenin ekonomik gelişmişliğini anlamaya yönelikken kişi başı enerji tüketimi konusu bir bölgenin diğer bölgeye kıyasla daha fazla insana ev sahipliği yaptığını, daha fazla enerji tüketimine konu olacak yatırımları, konut alanlarını bünyesinde ihtiva ettiğini işaret edebilir. Böyle bir farklılık arz eden durumda iki bölgenin birbirinden farklı özellikler taşıdığı farklı kalkınma düzeyinde olduğu anlaşılabilir. Çalışmada literatürde işaret edilen ve ifade edilen farklılığın anlaşılmasını sağlayacak bazı bölgesel kalkınma kriterleri kullanılmaktadır. Bu sayede incelenen örneklem alanları bazında bir karşılaştırma yapılmaktadır. Kullanılan bölgesel kalkınma göstergeleri şu şekildedir.

Tablo 2. Bölgesel Kalkınma Göstergeleri

Bölgesel Kalkınma Göstergeleri	Literatür
Kişi Başı Toplam Enerji Tüketimi	Tekin,2021 [1] , İncekara ve Kılınç Savrul , 2011 [13]
Kişi Başı GSYİH (\$)	Tekin,2021 [1] , İncekara ve Kılınç Savrul , 2011 [13]
Nüfus Yoğunluğu	Tekin,2021 [1] , İncekara ve Kılınç Savrul , 2011 [13]
Girişimcilik	Yılmaz ve İncekaş , 2018 [14], Tekkanat ve Mermer 2018 [5]
Toplam İhracat	Tekin,2021 [1] , İncekara, Kılınç Savrul , 2011 [13]

Bölgesel kalkınma, birçok boyutta yaşanan pozitif gelişmelerin toplam sonucu olarak belirlenmektedir. Bu gelişmelerin içinde ülkenin toplam geliri, kişi başına düşen gelir, rekabet kapasitesi, ülke vatandaşlarının yaşam kalitesinin nicelik ve niteliği gibi konular yer almaktadır.

Ekonomi üzerinde daha büyük ölçeği ilgilendiren değişimleri mercek altına alan bu parametreler üzerinde sağlanan eşitlikler ile ülkenin bölgeleri arasında farklılıklar azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu hususun işleyiş mekanizması şu şekildedir. Gelirin oluşmasını sağlayan faktörler ne tarafa yönlendirilirse gelişimde o bölgelerde gerçekleşmektedir. Gelişimin olması için yatırımcıların bu bölgede yer alması onların o bölgede yüksek kazançları elde edebileceği pozisyonların oluşturulması ile mümkün olmaktadır. Ulaşım konusunda yapılan yatırımların bölgesel kalkınmaya olan etkileri literatürde incelenen konular arasında yer almaktadır. Yapılan bir araştırmada ulaşım yatırımlarının bölgesel planlama ile birlikte kalkınma sürecine olan etkileri tartışılmaktadır. Aynı çalışmada sağlık endeksi, eğitim endeksi, gelir endeksi, insani gelişme endeksi gibi endeksler ile ulaşım ağına ait çeşitli veriler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda bulguların ulaşım altyapısı ile insani gelişmişlik değerleri arasında anlamlı ve pozitif yönlü bir ilişki olduğu ifade edilmektedir [6]. Bu çalışmada farklılıkların birbirinden değişiklik arz etmesinden ötürü yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının literatürde vurgusu yapılan yaşam kalitesi göstergeleri açısından oluşturduğu etkinin sayısal karşılığını anlamaya yönelik olarak çok ölçütü bir arada değerlendirebilen bir performans değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu yönüyle değerlendirildiğinde yüksek hızlı demiryolu yatırımı Türkiye için önemli bir potansiyele sahiptir. Bunun temelinde Türkiye’de bölgesel sosyo-ekonomik gelişmişliğin farklı olduğu ifade edilebilir. Özellikle yatırımın geçtiği bölgelerde büyük ölçekli ekonomik göstergeler açısından değişimlerin yaşanabileceği söylenebilir.

2. Metot

Çalışma yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının yatırımın geçtiği ve etkisi altına aldığı bölgeleri değerlendirmeye yöneliktir. Bu değerlendirme yapılırken literatürde daha önce vurgulanan hususlar kriterler olarak ele alınmaktadır. Göstergelerden oluşturulan kriterler ekonomik, sosyal ve çevresel niteliğe sahip değişkenlerin bileşenidir. Bu husustan dolayı çalışmada fazla sayıda kriteri değerlendirebilecek bir teknik olan ARAS (Additive Ratio Assesment – Eklemeli Oran Değerlemesi) yönteminden yararlanılmıştır [7, 8].

Çok ölçütlü kriter değerlendirme metotlarının; performans değerlendirme, her bir kriterin önemini anlama, alternatiflerin sıralanması, tercihlere yönelik sıralama yapma, bilgi toplama ve karar vermede senaryo geliştirme açısından kullanışlı olduğu vurgulanmaktadır [8]. Çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarına ait yüksek hızlı trenlerin geçtiği bölgeler ve yakın ilişkide bulunduğu yerleşimler özelinde bir performans değerlendirme yapılmaktadır. Bu kentler belirlenirken hem yüksek hızlı tren istasyonuna sahip bölgeler hem de TCDD’nin YHT’ye Tren ve Otobüs bağlantısı sağladığı kentler baz alınmıştır [9].



Şekil 1. Çalışma Alanı Haritası

Tablo 3. YHT Hatları [12]

Hat İsmi	Açıldığı Yıl
Ankara – Eskişehir	2009
Ankara – Konya	2011
Eskişehir – Konya	2013
Ankara – İstanbul	2014

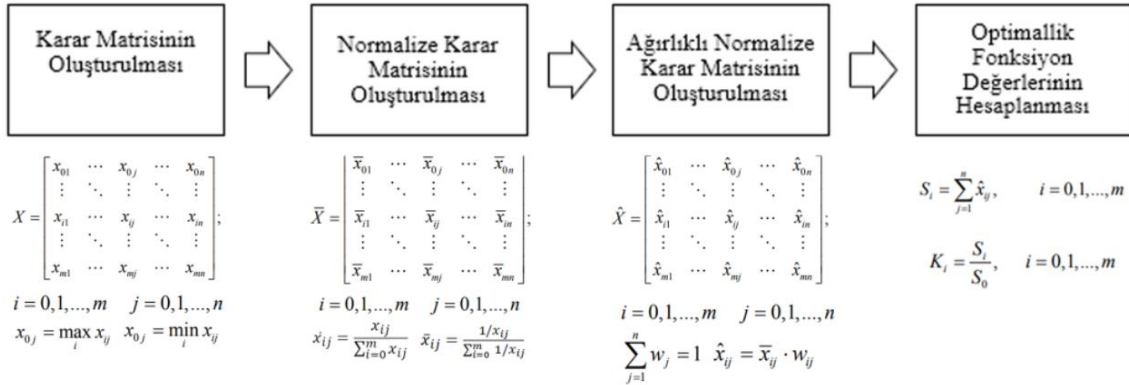
Çalışma alanı kapsamında değerlendirmeye konu olan kentler belirlendikten sonra TÜİK veri tabanından ve TCDD istatistik raporlarından, literatürden söz konusu kentlere yönelik verilerin temin edilmesi çalışmanın izleyen adımıdır. Bahsi geçen kaynaklardan elde edilen veriler şu şekildedir.

Tablo 4. Çalışma Verileri

Veri Kaynakları	Bileşenler
TÜİK (2013-2018)	Kişi Başı Toplam Enerji Tüketimi Kişi Başı GSYİH (\$) Nüfus Yoğunluğu Toplam Girişim Sayısı Toplam İhracat
(Statista 2020, Global Railway Review 2020; İrmak Karakaya ve Arıkan Öztürk, 2021) [10]	Taşıyan Yolcuların Hatlara Göre Dağılımları

Çalışma kapsamında derlenen veriler ile birlikte öncelikle bileşenlerin önem değeri tespit edilmekte ve daha sonra kentlerin performansı ARAS metodu ile değerlendirilmektedir. Çalışmada, çok kriter kullanıldığı, kriterler arası karşılaştırma yapma kabiliyetine sahip olduğu, oransal benzerlik kurulabilmesini sağladığı için bu metod kullanılmaktadır.

ARAS metodu sonucunda ortaya çıkan sonuçlar bu çalışma kapsamında Tablo 1’de yer alan veriler açısından kentlerin gösterdiği performans değişikliklerine işaret etmektedir. ARAS Metodundan çalışmada işlem akışı şeklinde gösterildiği gibi yararlanılmaktadır [11].

**Şekil 2.** ARAS Metodu İşlem Akışı

Buradan elde edilen değerler sonucunda alternatiflerin, senaryoların, durumların optimal fonksiyonel değerlerinden bir alternatif sıralaması oluşmaktadır. İlk sırada gelen alternatif kendinden önce gelenlere kıyasla daha üst düzey bir performansı ifade etmiş olmaktadır. Çalışma kapsamında iki farklı karar problemine yoğunlaşılmaktadır. Birinci karar verme problemi yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının etkilediği konular arasında optimal fonksiyon fayda derecesi belirlemek şeklindedir. Yüksek hızlı demiryolu kişi başı toplam enerji tüketimi, kişi başı gayri safi milli hasıla, nüfus yoğunluğu, yıllık toplam girişim sayısı, toplam ihracat miktarı ile ilişkili olduğu literatürden tespit edilmiş olup bu kavramlar arası önem dereceleri tespit edilmeye çalışılmaktadır. Bu aşamadan sonra ARAS tekniği bir kez daha uygulanmış olup kentlerin bu

parametreler bazında ortaya çıkan performansları ayrıca değerlendirilmekte ve yorumlanmaktadır. Bölgesel kalkınma göstergeleri konusunda yapılan çalışmalarda birbirinden farklı göstergeler incelenmekte ve değerlendirilmektedir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen bölgesel kalkınma göstergelerine ilişkin verilerin zaman aralıkları birbiri ile belirli dönemlerde kesişmektedir. Metoda uygun bir şekilde çalışma alanı için aynı dönemi kapsayabilen veri zaman aralıkları (2013-2018) üzerinden sınırlı bir değerlendirme yapılabilmektedir.

ARAS tekniğinin kullanıldığı ilk aşamada yüksek hızlı demiryolu yatırımının etkilediği ekonomik, sosyal ve çevresel kriterlerin yer aldığı kriter havuzu değerlendirilmektedir. Değişkenlerin Öneminin Tespit Edilmesine Yönelik Oluşturulan Karar Matrisinde TÜİK Veri tabanı Türkiye düzeyinde 2013-2018 yılına devam eden süre zarfında değişkenlerin değeri üzerinden hesap yapılmaktadır.

Tablo 5. Değişkenlerin Öneminin Tespit Edilmesine Yönelik Oluşturulan Karar Matrisi

Karar Matrisi				
	Optimal Değer Yönü	2013	2014	2015
Kişi Başı Toplam Enerji Tüketimi	Maksimum	2583	2669	2760
Kişi Başı GSYİH \$	Maksimum	12582	12178	11085
Nüfus Yoğunluğu	Maksimum	99,62	100,96	102,31
Toplam Girişim	Maksimum	3.397.724	3.434.912	3.498.586
Toplam İhracat	Maksimum	161.480.915	166.504.862	150.982.114
Karar Matrisi (Tablo 4'ün Devamı)				
Optimal Değer Yönü	2016	2017	2018	Optimal Değer
Maksimum	2897	3082	3149	3149
Maksimum	10964	10696	9792	12582
Maksimum	103,71	105	106,55	106,55
Maksimum	3.608.470	3.696.004	3.845.951	3.845.951
Maksimum	149.246.999	164.494.619	177.168.756	177.168.756

Tabloda görüldüğü üzere 2013-2018 yılları arasında optimal değerler farklı yıllara denk gelmektedir. Toplam enerji tüketimi yıl geçtikçe artarken kişi başı gayri safi hasıla değeri son yıllara yaklaştıkça azalmaktadır.

Karar matrisinin oluşturulması aşamasını fayda yönlü dönüştürülmüş değerlerin hesaplanmasını kapsayan karar matrisinin oluşturulması izlemektedir. Söz konusu matrisin oluşturulması ile birlikte daha sonraki normalizasyon değerlerinin sağlanması kolaylaştırılmaktadır.

Tablo 6. Normalize Karar Matrisi

Karar Matrisi								
	Optimal Değer Yönü	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Optimal Değer
Kişi Başı Toplam Enerji Tüketimi	Maksimum	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16
Kişi Başı GSYİH \$	Maksimum	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,16
Nüfus Yoğunluğu	Maksimum	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
Toplam Girişim	Maksimum	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
Toplam İhracat	Maksimum	0,14	0,15	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15

Normalize karar matrisi hesabını ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin hesaplanması izlemektedir. Bu aşamada yılların önem dereceleri eşit olduğu düşünülerek hesaplanan ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi şu şekildedir.

Tablo 7. Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi

		Karar Matrisi							
	Optimal Değer Yönü	Kriter Ağırlığı	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Optimal Değer
Kişi Başı Toplam Enerji Tüketimi	Maks	0,20	0,025	0,026	0,027	0,029	0,030	0,031	0,03104
Kişi Başı GSYİH \$	Maks	0,20	0,032	0,030	0,028	0,027	0,027	0,025	0,03150
Nüfus Yoğunluğu	Maks	0,20	0,027	0,028	0,028	0,029	0,029	0,029	0,02941
Toplam Girişim	Maks	0,20	0,027	0,027	0,028	0,028	0,029	0,030	0,03037
Toplam İhracat	Maks	0,20	0,028	0,029	0,026	0,026	0,029	0,031	0,031

Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşumunu optimallik fonksiyonu fayda derecelerinin oluşumu ve fayda derecelerinin sıralaması takip etmektedir. Optimal değer kriter ağırlığına bölünmesiyle elde edilen fayda dereceleri şu şekildedir.

Tablo 8. Optimallik Fonksiyonu Fayda Dereceleri

Kriterler	Optimallik Fonksiyonu Fayda Dereceleri	
	Ki	Sıralama
Kişi Başı Toplam Enerji Tüketimi	6.44	4
Kişi Başı GSYİH\$	6.35	5
Nüfus Yoğunluğu	6.80	1
Toplam Girişim	6.59	2
Toplam İhracat	6.47	3

Çalışma kapsamında yoğunlaşılan diğer problem birinci problemde önem sıralaması ortaya çıkarılan konular açısından 2013-2018 yılları arasında yüksek hızlı demiryolu ve onun etkisinde kaldığı değerlendirilen kentler bazında gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen ikinci uygulamada kentler ve kriterler bazında 2013 ve 2018 yılları arası için hesaplamalar tüm kentler kapsanacak şekilde 6 kez tekrar edilmektedir. Her yıl için kriterler bazında kentler sıralanarak en iyi performanslar elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu kapsamda ikinci uygulama için tüm Türkiye kentleri arasında çalışmada baz alınan kentler öncelikle sıralanarak 2013 yılı karar matrisi hazırlanmıştır. Altı ayrı yıl için yapılan hesaba örnek teşkil etmesi için örnek olarak 2013 yılı değerleri tabloda verilmektedir.

Tablo 9. İl Performans Hesabı İçin Oluşturulan Karar Matrisi (2013)

Karar Matrisi					
	Kişi Başı Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Toplam İhracat (Bin \$)	Kişi Başı GSYİH (\$)	Nüfus Yoğunluğu (kişi/km ²)	Toplam Girişim (Sayı)
	Maksimum	Maksimum	Maksimum	Maksimum	Maksimum
Adana	2.331	1.901.578	9.073	154,46	83.880
Ankara	2.117	7.921.971	18.362	205,75	241.646
Antalya	2.865	1.289.253	14.788	104,15	134.438
Bilecik	6.101	80.079	15.332	48,56	7.742
Bursa	3.427	9.456.295	14.282	263	126.554

Eskişehir	3.278	818.979	14.445	57,78	32.637
İstanbul	2.396	81.576.600	20.883	2725,26	806.378
Kocaeli	7.318	9.346.061	20.565	464,06	69.454
Konya	2.650	1.353.485	9.693	53,49	89.258
Kütahya	2.362	172.286	9.550	47,76	23.184
Sakarya	2.995	2.352.657	10.849	189,62	41.944
Karaman	2.585	334.817	12.564	26,9	9.802
.
.
.
Optimal Değer	8.258	81.576.600	20.883	2725,26	806.378

Her bir kritere ilişkin olarak optimal değerler farklılık arz etmektedir. Karar matrisinin oluşturulması aşamasını diğer uygulamada olduğu gibi fayda yönlü dönüştürülmüş değerlerin hesaplanmasını kapsayan karar matrisinin oluşturulması izlenmektedir. Söz konusu matrisin oluşturulması ile birlikte daha sonraki normalizasyon değerlerinin sağlanması kolaylaştırılmaktadır.

Bir önceki karar probleminde olduğu gibi normalize karar matrisi hesabını ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin hesaplanması izlenmektedir. Bu aşamada kriter havuzundaki kriterlerin eşit ağırlığa sahip olduğu kabulü yapılarak ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi hesabı yapılmaktadır.

Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşumunu optimallik fonksiyonu fayda derecelerinin oluşumu ve fayda derecelerinin sıralaması takip etmektedir. Bu analiz kapsamında ortaya çıkan değerler bir önceki uygulamadan farklı olarak kentlerin performansının bir sıralamasını ifade etmektedir.

Tablo 10. Optimallik Fonksiyonu Fayda Dereceleri

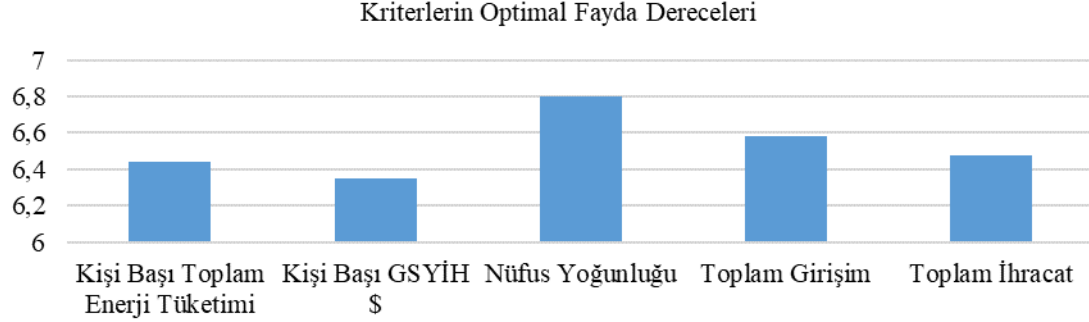
Kentler	Optimallik Fonksiyonu Fayda Dereceleri	
	Ki	Sıralama
Adana	0.08	13
Ankara	0.17	4
Antalya	0.10	8
Bilecik	0.07	18
Bursa	0.15	5
Eskişehir	0.06	24
İstanbul	0.96	1
Kocaeli	0.19	3
Konya	0.07	17
Kütahya	0.04	39
Sakarya	0.08	12
Karaman	0.04	35

Optimal fayda dereceleri tabloda görüldüğü şekliyle elde edilebilmektedir. Çalışma kapsamında her yıl için sıralamalar elde edilerek değişiklikler karşılaştırmalı bir şekilde yorumlanmaya çalışılmaktadır.

3. Bulgular

Çalışmada yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının etkilediği yaşam kalitesi ölçütleri ve bu ölçütler çerçevesinde yüksek hızlı demiryolu yatırımlarına doğrudan ve dolaylı olarak konu olan kentlerin performansı değerlendirilmektedir. Yapılan değerlendirme sonucunda yaşam kalitesi ölçütleri arasında önem düzeyinde en ön planda yer alan kriterden önem düzeyi en az olana bir sıralama

yer almaktadır. Ancak kentlerin performansında 2013-2018 yılları için performans düzeyindeki değişime odaklanılmaktadır. Bu performans düzeyindeki değişim konusunda yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının tüm demiryolu taşımadaki yolcu taşıma payındaki aktifliği ve söz konusu kentlerin o dönemki performansı karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmanın daha rahat anlaşılması için rakamlar normalizasyon yapılmış haliyle değerlendirilmektedir. Kriterlerin optimal fayda dereceleri ve performans değişimleri şu şekildedir.



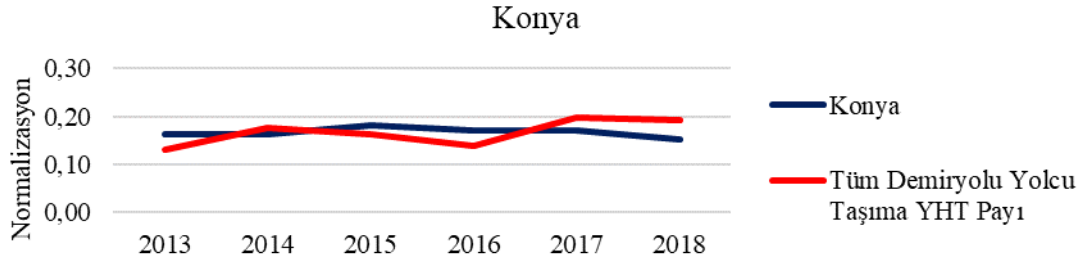
Şekil 3. Fayda Derecesi

Grafik incelendiğinde yüksek hızlı demiryollarının etkileşimi açısından en fazla fayda sağlayan husus nüfus yoğunluğu olarak çıkmaktadır bu unsuru toplam girişim, toplam ihracat, enerji tüketimi ve kişi başı gelir izlemektedir.

Tablo 11. Yıllara Göre Performans Değişimleri

Kentler	Yıllar					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Tüm Demiryolu Yolcu Taşıma YHT Payı	0.13	0.18	0.16	0.14	0.20	0.19
Adana	0.18	0.16	0.15	0.18	0.16	0.16
Ankara	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Antalya	0.16	0.16	0.16	0.16	0.18	0.16
Bilecik	0.16	0.16	0.16	0.18	0.17	0.17
Bursa	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Eskişehir	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
İstanbul	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Karaman	0,16	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16
Kocaeli	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Konya	0.16	0.16	0.18	0.17	0.17	0.15
Kütahya	0.17	0.16	0.18	0.16	0.16	0.17
Sakarya	0.20	0.17	0.17	0.17	0.14	0.15

Yıllara göre kentlerin performansı tüm demiryolu yolcu taşımada yüksek hızlı demiryolu payı ile değerlendirildiğinde Ankara, Bursa, Eskişehir, İstanbul, Kocaeli gibi kentlerde stabil bir durum görülmektedir. Bu kentlerin dışındaki kentlerde ise tüm demiryolu yolcu taşımada YHT'nin payına odaklanılarak performans değerlendirilmesi yapıldığında yüksek hızlı demiryolu yolcu taşımada artış azalışlar ile birlikte kentlerin performansında da değişim görülmektedir. Tablo 8'de performans değişimi normalizasyona uygun olarak şöyle okunmalıdır. Herhangi bir ilin herhangi bir performansı eğer kendisinden önceki seneden düşük bir değere sahipse bu performansın geçen seneye göre daha üst düzey bir duruma ulaştığını göstermektedir. Eğer kendisinden önceki seneden yüksek bir değere sahipse bu performansın geçen seneye göre daha alt düzey bir duruma düştüğünü işaret etmektedir. Örnek şekilde bu durum şöyle ifade edilebilir.



Şekil 4. Konya İli Performansı

Grafikte görüldüğü üzere örneğin Konya ili yüksek hızlı tren taşıma payı azaldıkça performans azalma eğiliminde olmakta yüksek hızlı tren taşıma payı arttıkça performans artma eğilimine yaklaşmaktadır.

4. Sonuç

Yapılan çalışmada beklendiği üzere yüksek hızlı demiryolu yatırımlarının kentlerin ekonomik, sosyal ve çevresel perspektifteki performansına etki ettiği görülmektedir. Yüksek hızlı demiryolunun doğrudan ve dolaylı olarak etkilediği 12 kentin 7'sinde bu etki üst düzeyde hissedilirken diğer 5 ilde bu etki yeterince iyi gözlemlenmemektedir. Bu çalışma kapsamında kriter ağırlıklandırılması için her kriter için eşit ağırlık kullanılmış olup gelecek çalışmalarda uzman görüşüne dayalı yeni yaklaşımlar geliştirilebilir. Çalışmada birçok kriter kullanılmış olması ve bu kriterlere dayalı olarak veri temini sadece 2013-2018 yılları arasında mümkün olduğundan 6 yıllık bir değerlendirme periyodu limiti söz konusudur. Çalışmanın en önemli çıkarımları arasında yüksek hızlı bir demiryolu yatırımının kentlerin gelişimine katkı verdiği belirtilebilir. Bununla birlikte yüksek hızlı demiryollarının bölgesel gelişime erişebilirlik sağlama ve fırsat oluşturma açısından katkı verdiği ifade edilebilir. Çalışmada performans açısından olumlu değişimler yani performans artışları özellikle yüksek hızlı tren sistemine entegrasyon bağlantısına sahip olan kentlerde görülmektedir. Türkiye'deki yüksek hızlı demiryollarının diğer Dünya ülke örneklerinde olduğu gibi bölgeler arası ekonomik, sosyal ve çevresel dengeyi sağlamada kalite performansı artırıcı önemli bir planlama aracı olduğu anlaşılmaktadır.

Kaynakça

- [1] A. Tekin, "Küreselleşen dünyada bölgesel kalkınma dinamikleri, kamu politikaları ve bölgesel kalkınma ajansları," Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, vol. 29, pp. 37-48, 2011
- [2] M.Ç. Kızıldaş, "Yüksek hızlı demiryolları, üretim ve ekonomik kalkınmaya etkisinin incelenmesi," Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 9, no. 4, pp. 1844-1853, 2020
- [3] M. İnan ve M. Demir, "Demiryolu ulaşımı ve Türkiye'de hızlı tren yatırımlarının etkileri: Eskişehir-Konya örneği," Fırat University Journal of Social Sciences/Sosyal Bilimler Dergisi, vol. 27, no. 1, 2017
- [4] M.F. Altan ve M.Ç. Kızıldaş, "Yüksek hızlı demiryolları, Avrupa Birliği demiryolu politikaları ve bu bağlamda Türkiye'deki gelişmelerin incelenmesi," Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, vol. 8, no. 2, pp. 635-642, 2020
- [5] S.S. Tekkanat ve H. Mermer, "Bir planlama sorunsalı olarak bölgelerarası dengesizlik: Türkiye örneği," Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, vol. 10, no. 4, pp. 91-106, 2018
- [6] R. Telli, "Türkiye'de ulaşım altyapısının bölgesel kalkınmaya Etkileri," Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, vol. 5, no. 1, pp. 53-69, 2020
- [7] M. Bakır ve Ö. Atalık, "Entropi ve Aras yöntemleriyle havayolu işletmelerinde hizmet kalitesinin değerlendirilmesi," İşletme Araştırmaları Dergisi, vol. 10, no.1, pp. 617-638, 2018

- [8] E. K. Zavadskas, ve Z. Turskis, “A New Additive Ratio Assessment (ARAS) Method in Multicriteria Decision-Making,” Technological and economic development of economy, vol. 6, no. 2, pp.159-172, 2010
- [9] TCDD. “YHT Bağlantı Saatleri” 2022. [Çevrimiçi] Erişim: <https://www.tcddtasimacilik.gov.tr/seferler/yuksek-hizli-tren/> [Erişim tarihi:4 Aralık 2022]
- [10]F. Irmak Karakaya ve E. Arıkan Öztürk, “Türkiye’de yüksek hızlı demiryolu (YHD) gelişimi, gelir gider durumu ve maliyet karşılama kapasitesi” Atlas Journal, vol. 7, no. 43, pp. 2052-2065, 2021
- [11]R. Erturgut, ve N.K. Ustalı, “Kent içi raylı ulaşım performansını değerlendirmede Swara ve Aras yöntemleri ile bir model önerisi,” Verimlilik Dergisi, vol. 3, pp. 35-53, 2021
- [12]TCDD “Konya-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Seferleri Başladı” 2022. [Çevrimiçi] Erişim: <https://www.tcdd.gov.tr/haberler/konya-istanbul-yuksek-hizli-tren-seferleri-basladi/> [Erişim tarihi:17 Aralık 2022]
- [13]A. İncekara ve B. Savrul, “Bölgesel kalkınma politikaları ve Türkiye açısından bir değerlendirme,” İstanbul Journal of Sociological Studies, no. 44, pp. 91-13, 2011
- [14]Z. Yılmaz, ve E. İncekaş, “Türkiye’de inovasyon ve bölgesel kalkınma,” Kırklareli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, vol. 2, no. 1, pp. 154-169, 2018
- [15]E. Poşluk, “dünyadaki son gelişmeler çerçevesinde yüksek hızlı demiryolu tünel tasarımı ve Türkiye’deki durum,” Demiryolu Mühendisliği, no. 15, pp. 13-29, 2022

Özgeçmiş



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.



Demiryollarında Kullanılan Ağır Hizmet Dizel Motorlarında Viskozite Ölçümüyle Motor Yağı Yakıt Seyreltmesinin Teşhisi

Mustafa Ertunç TAT^{*1}, Emine DORU²

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Raylı Sistemler Anabilim Dalı, Eskişehir, Türkiye

*metat@ogu.edu.tr

(Alınış/Received: 22.03.2023, Kabul/Accepted: 10.04.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Kestirimci bakım yöntemleriyle karmaşık mühendislik sistemlerinde ortaya çıkabilecek arızalar önceden kontrol altına alınabilir. Titreşim analizi, ultrasonik test, termal kamera ile görüntüleme ve yağ analizi gibi uygulamalar kestirimci bakım yöntemleridir. Bu yöntemlerle, arıza henüz meydana gelmeden veyahut ciddi boyutlara ulaşmadan, sensörler aracılığıyla sistem ve ekipman gerekliliklerine göre belirlenmiş verilerin elde edilip incelenmesiyle muhtemel arızaların önüne geçilebilir. Bu çalışmada bir ağır dizel motor yağının (10W-40) içerisine ağırlıkça %1, %2, %5 ve %10 oranlarında biyodizel yakıtı konularak seyreltilmiştir. Yakıtla seyreltilmiş ağır dizel motor yağının viskozite ve yoğunluk performansları Anton Paar Automated Micro Viscometer ve DMA 4500 Density Meter kullanılarak 40, 60, 80 ve 90 °C, sıcaklıklarında ölçülmüştür. Yağın içerisindeki yakıt miktarı seyreltmesinin viskozite ve yoğunluk değerleri üzerinden gözlemlenebildiği, seyreltmenin artmasıyla viskozitenin düştüğü fakat yoğunluğun arttığı ve yoğunluk üzerindeki değişimin sıcaklıktan etkilenmediği fakat viskozite değerlerindeki ayrışmanın sıcaklıktan etkilendiği görülmüştür. Özellikle yakıt seyreltmesinin viskozite üzerindeki sıcaklığa bağlı etkisi %5 oranına kadar sabitken, seyreltme oranı artıkça sıcaklığa bağlı davranış değişikliği göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Viskozite, Ağır hizmet dizel motoru, Motor yağı, Kestirimci bakım

Diagnosing Engine Oil Fuel Dilution by Viscosity Measurement in Heavy-Duty Diesel Engines Used in Railways

Abstract: Predictive maintenance methods allow failures that may occur in complex engineering systems to be controlled beforehand. Vibration, ultrasonic testing, thermal imaging, and oil analysis are predictive maintenance methods. These methods prevent possible malfunctions by obtaining and examining the data determined according to the system and equipment requirements through sensors before the malfunction occurs or reaches profound dimensions. In this study, heavy diesel engine oil (10W-40) was diluted by adding %1, %2, %5, and 10% by weight of biodiesel fuel. Viscosity and density performances of heavy diesel engine oil diluted with biofuel were evaluated using Anton Paar Automated Micro Viscometer and DMA 4500 Density Meter at temperatures 40, 60, 80, and 90 °C. It was observed that the amount of fuel in engine oil could be detectable through the viscosity and density values. As the dilution increases, the viscosity decreases, but the density increases and the change in density is not affected by the temperature, but the temperature affects the change in the viscosity values. In particular, while the temperature-dependent effect of fuel dilution on viscosity was constant up to 5%, the temperature-dependent behavior changed as the dilution increased.

Keywords: Viscosity, Heavy-duty diesel engine, Engine oil, Predictive maintenance

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı maliyet, zaman ve güvenilirlik açısından önemli taşımacılık yöntemlerinden biridir. Demiryolu uygun maliyetli yolcu taşımasıyla ve ağır tonajlı, hacimli

Atıf için/Cite as: M.E. Tat, E. Doru, "Demiryollarında kullanılan ağır hizmet dizel motorlarında viskozite ölçümüyle motor yağı yakıt seyreltmesinin teşhisi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 26-35, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1268973

yüklerin taşınmasına elverişli olmasıyla ön plana çıkar. Kötü hava koşullarından en az şekilde etkilenen tek taşımacılıktır. Demiryolu taşımacılığı, güvenilir olması, insana bağımlılığın ve dolayısıyla hata riskinin asgariye indirilmiş olması, rekabetçi maliyetler oluşturulabilmesi, güzergâh üzerindeki avantajları ve çevre dostu bir çözüm oluşturması itibarıyla son dönemlerde artarak ilgi gören bir taşıma modelidir. Ulaşım ve taşıma sistemleri açısından demiryolu ile toplu taşımacılık ve yük taşımacılığı anlayışı bu sebeplerle ekonomik kalkınmanın önemli bir unsurudur [1].

Demiryolu endüstrisi de diğer teknolojiler gibi güncel teknolojiye entegre edilmeye ihtiyaç duyar. Endüstri 4.0 veya dördüncü nesil endüstriyel faaliyet, bu sektörlerde verimlilik, güvenilirlik ve emniyet sağlar. Gelişmiş akıllı sistemlerle mevcut durumları izlemek ortaya çıkan istenmeyen durumların önceden tespitinde yardımcı olur. Endüstri 4.0'ın verimlilik, kapasite ve maliyet açısından faydalarını demiryolu endüstrisinde de görmek mümkün olacaktır. Ulaştırma sistemleri, çok çeşitli insan faktörlerinden, organizasyonlarından ve teknik çözümlerden meydana geldiği için karmaşıktır. Akıllı sistemler ve internet tabanlı çözümleri kapsayan endüstri 4.0 ile karmaşık sistemleri daha anlaşılır bir şekilde indirgemek mümkündür. Kestirimci bakım uygulamaları ve nesnelerin internetini (IoT) kullanarak arızaları tahmin edebilir kılan akıllı sistemler oluşturulabilir. Dünya genelinde en çok tercih edilen ulaşım ve taşıma yöntemlerinden biri olan demiryollarında arızalar oluşabilir ve bu arızalar yüksek can ve mal kaybıyla sonuçlanan kazalara neden olabilir. Bu nedenle bu sistemlerin belirli periyotlar ile denetlenmesi hasarların önlenmesi ve oluşabilecek kazaların önüne geçilebilmesi kritik derecede önemlidir. Sistemin sağlıklı çalışması açısından üç ana bakım yaklaşımından söz edilebilir. Bu bakım yaklaşımları düzeltici, önleyici ve kestirimci bakım olarak ele alınıp kategorize edilebilir. Bakım maliyetleri işletmelerin mali durumunu büyük ölçekte etkileyen faktörlerden biridir. Bakım yöntemleri ekipman duruşlarını en aza indirerek ve beklenmeyen arızaları önleyerek işletmeleri mali kayıp ve işletim süreci aksamaları gibi birçok açıdan korur.

Bu çalışmada kestirimci bakım kapsamında, özellikle ağır hizmet dizel motorlarında karşılaşılan, zamanla ya da yakıt enjektör sistemindeki arızalardan kaynaklı motoryağına yakıt karışarak yakıt seyrelmesinin durumunda motor yağının performansının viskozite ve yoğunluk değişimi üzerinden değerlendirilmesi yapılmıştır. Yakıt seyrelmesi ağır dizel motorlarında yaygın karşılaşılan bir durumdur. Benzer şekilde soğutma suyu da motor yağına karışabilir. Bu durumda veya bu durumun belirli kritik eşik değerinin üzerine çıkması durumunda çok kısa bir sürede ağır motor hasarı ortaya çıkacaktır. Motor yağının durumu ve hatta dolaylı olarak yakıt sisteminin durumu motor yağı viskozite ve yoğunluğu üzerinden dolaylı olarak kestirilebilir ve gerekli kararlar verilebilir.

Bu konuda yapılan çalışmalara örnek olarak; Abusaad vd. [2] elektriksel parametrelerin ölçümlerine dayalı olarak madeni yağ bozulmasını teşhis etmek için uygun maliyetli yeni bir yöntem geliştirdikleri çalışmada, yağın bozulmasına bağlı olarak yağ viskozitesindeki değişiklik, bir dişli kutusu transmisyon sisteminin hem statik güç tüketiminde hem de dinamik davranışında değişikliklere neden olduğu bu çalışmada tespit edilmiştir. Bu değişiklikler, bir değişken hız sürücüsü (VSD) tarafından beslenen 10 kW'lık bir dişli kutusu ile deneysel olarak doğrulanmıştır. Spesifik olarak, yağ viskozitesindeki artışın, viskoz sürtünme ve çalkalama etkisinden dolayı güç tüketiminde ölçülebilir bir artışa yol açtığı bulunmuştur. Aynı zamanda, etki, sönmüleme etkisini azalttığı ve atalet momentlerinin dengesizliğini artırdığı için dişli şanzıman sisteminin dinamiklerini de değiştirmiştir. Dinamik davranışlardaki değişiklik üzerine oluşturulan bir sistemin yağ viskozitesi değişikliklerini ayırt edebiliyor oluşu bu sistemin beklenen tam performansını uzmanlara verebileceğini [2] göstermiştir.

Seçilmiş toplu taşıma araçlarından periyodik olarak yağ numunelerinin alındığı bir çalışmada, bu numuneler, aracın ve motor yağının özellikleriyle birlikte a laboratuvara gönderilmiştir; araç numarası, marka, model; araç cinsi; motor; ekipman kilometre sayısı; yağın kilometre sayısı;

numune tarihi; numune teslim tarihi. Çalışmada birçok değişken için değerler toplanmış olsa da, yalnızca yağın bozulması için daha önemli olduğu düşünülen, kurum (karbon maddesi), viskozite, toplam baz sayısı (Total Base Number, TBN), aşınma ve kirlenme metalleri, parçacık değişkenlerine odaklanılmıştır. En önemli kabul edilen değişkenlerden biri kurum veya karbonlu maddeler ve metal aşınma parçacıkları olmuştur. Çalışma, kurum ve demir içeriği gibi bazı değişkenlerin dizel motorların durumunu gözlemlememize olanak sağladığını öne sürmüştür. Yağ durumunun izlenmesinin ekipmanın kullanılabilirliğini artırabileceğini ve bozulmaya erken müdahaleye izin vererek arıza önlemenin gerçekleştirilebileceği saptanmıştır [3].

Mevcut yağlama yağı durum izleme çözümlerinin kapsamlı bir incelemesinin ve sınıflandırmasının araştırıldığı bir çalışmada, tekniklerin değerlendirilmesi ve incelenmesiyle yağ analiz teknikleri dört kategoride sınıflandırılmıştır. Bu teknikler elektriksel (manyetik), fiziksel, kimyasal ve optik teknikler olarak sıralanabilir. Her tekniğin karakteristiği ve algılama yöntemi, yağın durumunu izlemek ve yağdaki değişiklikleri teşhis etmek için bir takım özelliklere göre değerlendirilmiştir ve bu teknikler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır [4]. Guan [5] yağlama yağının oksidasyon oranını ölçmek için dielektrik sabitini dielektrik spektroskopisi adı verilen analitik bir yöntemle birleştirmiştir. Dielektrik spektroskopisi, dielektrik malzeme için güçlü bir yapısal algılama tekniği olan radyo frekansı ve mikrodalga aralığında dielektrik malzeme ile elektromanyetik enerji arasındaki etkileşim üzerine analitik bir tekniktir. Bu teknik oksidasyon süresini, toplam asit sayısını (TAN) ve çözünmeyen içeriği (IC) tespit etme yeteneğine sahiptir.

Viskozite çeşitli çalışma koşullarından bağımsız olması nedeniyle genellikle yağlayıcı bozunma karşılaştırma standardı olarak kabul edilir. Agostonet [6], otomotiv uygulamaları için viskoziteyi elektriksel olarak ölçmek için bir mikro akustik sensör kullanmıştır. Bu sensör küçüktür ve dayanıklı olduğu için ağır endüstriyel ortamlarda kullanılabilir.

Schmitgal ve Moyer'in [7] dizel motorları üzerindeki araştırması, bir kinematik viskozimetrenin yağlayıcı kurum partikülü, su kirliliği ve oksidasyon bozulma tespiti yapabildiğini göstermiştir. Kinematik viskozimetrelerin veri işleme karmaşıklığı düşük ve bakım maliyeti ile tüm yağ temel bozunma özelliklerini anlık olarak izleyebilir. Sensörlü ve alıcılı bir sistem geliştirilmiştir. Turner ve Austin'in [8] çalışması temiz hidrolik sıvıdaki katı parçacıklar tarafından saçılan ultrasonu algılamıştır. Bu teknik, anlık durum izlemeyi mümkün kılmıştır.

Kuntner [9] madeni yağdaki su kirlenmesi ve bozunma süreçlerinin artan bir termal iletkenliğe yol açtığını tespit etmiştir. Bu çalışma, yağ durumu izlemede termal iletkenlik sensörlerinin potansiyelini göstermiştir.

Mann [10], kimyasal reaksiyona bağlı oksidasyonun etkilerinin yanı sıra yanmanın yan ürünlerinin bir motor içinde nispeten yüksek asidik bileşikler ürettiğinden bahsetmiştir. Bu bileşikler, dahili motor bileşenlerinde korozyona, tortulara ve yağ viskozitesinde, vernikte, çamurda ve diğer çözünmeyen oksidasyon ürünlerinde değişikliklere neden olur ve bu da motorun belirli bir süre boyunca performans ve dayanıklılığında azalmaya neden olabileceğini belirtmiştir.

İnce film kirlenme izleme yaklaşımının incelendiği bir çalışmada, yağlama yağındaki partikül kirlenmesini izlemek için bir elektrik devresinin parçasını oluşturan ince bir metalik film kullanılmıştır [11]. Halderman [12], film tabakası yağ akışına maruz kalır ve yağ bozunurken katı parçacıklar tarafından sürekli olarak aşınır. Sonuç olarak, direnç yükselir. Bu teknik, sık bakım gerektiren partikül boyutuna ve konsantrasyonuna bağlıdır.

Kumar ve Mukherjee [13] çalışmalarında yağın görsel şeffaflığını kaydetmek ve daha sonra onu dirence dönüştürmek için ışığa bağımlı dirençli (LDR) bir optik sensör geliştirmişlerdir. Sensör, altı silindireli bir benzinli motorda test edildi. Araştırmacılar, direnç verilerini çalışma saatleri,

viskozite ve oksidasyon (pH ölçümü ile ölçeklendirilmiş) ile ilişkilendirdi ve tasarlanan sensörün etkinliğini kanıtladı.

Turner ve Austin'in [8] gerçekleştirdikleri çalışmaya göre yağ bozulduğunda nitrat bileşiği oluşur. Bu bileşik kızılötesi (IR) radyasyonu emer. Bu etki, IR emilimini ölçen ve yağ durumuyla ölçümü ilişkilendirmeye çalışan bir sensörde kullanılmıştır. Anlık olarak yağ bozulmasını izleyebilse de bu teşhis sistemi için tekrarlanabilirlik sorunlarının üstesinden gelmek ve üretim maliyetini azaltmak için gelecekte bazı iyileştirmelere ihtiyaç duyabileceği öngörülmüştür.

Yakıt enjektörlerinin zamanla aşınması veya kurum yapması sonucu yakıtın tam olarak atomize edilmeden püskürtülmesi sonucunda yakıtın silindir duvarlarına sıvaşması ve tam olarak yanmaması, özellikle ağır dizel motorlarında yaygın bir arıza ve endişe kaynağıdır. Bu durumda yakıt motor yağına karışır ve motor yağının seyrelmesi durumu ortaya çıkar. Yakıt ile seyrelen motor yağı bozulur, yağlama performansını kaybeder. Bu da motorda aşınmalara ve gittikçe şiddetlenen arızalara yol açar. Bu çalışmanın amacı motor yağının yakıt seyrelmesiyle karşılaştığı durumda yağın viskozite ve yoğunluk davranışının sıcaklığa ve yakıt seyrelmesine bağlı olarak nasıl değiştiğini gözlemlemek ve anlamlandırmaktır. Ayrıca motor yağı yoğunluk ve viskozite değerleri üzerinden kestirimci bakım sağlayabilmektir.

2. Metot

Bu çalışmada ticari bir 10W-40 motor yağı ve motor yağının seyreltilmesi için ESOGÜ Makine Mühendisliği Yakıt Laboratuvarında üretilmiş Ayçiçek yağı biyodizel yakıtı kullanılmıştır. Deney kapsamında 200 ml' lik şişelerde ağırlıkça %100 motor yağı, %1 oranında biyodizel seyreltilmiş motor yağı, %2 oranında biyodizel seyreltilmiş motor yağı, %5 oranında biyodizel seyreltilmiş motor yağı, %10 oranında biyodizel seyreltilmiş motor yağı olarak hazırlanmış ve 10 dakika süreyle 100 °C de karıştırılmıştır. Numunelerin viskoziteleri ve yoğunlukları 40 °C, 60 °C, 80 °C ve 90 °C sıcaklıklarda ölçülmüş ve değerleri kaydedilmiştir. Hazırlanan numunelerin viskozite değerleri Anton Paar Automated Micro Viscometer AMVn cihazında, Şekil 1, ölçülmüştür. Kullanılan cihaz, Höppler'in düşen top prensibine göre şeffaf ve opak sıvılar içinde bir topun yuvarlanma süresini ölçen düşen bir top viskozimetresidir. Yoğunluk değerleri ise Anton Paar DMA 4500 Density Meter (Şekil 1) cihazıyla elde edilmiştir.



Şekil 1. Anton Paar Automated Micro Viscometer AMVn ve Anton Paar DMA 4500 Density Meter

3. Bulgular

Dinamik viskozite ölçüm değerleri Tablo 1’de, kinematik viskozite ölçüm değerleri Tablo 2’de ve yoğunluk ölçüm değerleri de Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 1. Dinamik viskozite (mPa.s) ölçüm değerleri tablosu

Sıcaklık (°C)	Motoryağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	81,6551	80,0676	78,3498	69,8538	57,5583
60	36,2392	35,5120	35,0161	31,3752	27,1283
80	19,2342	19,0373	18,6689	16,9379	15,2411
90	14,7202	14,5134	14,2519	13,0857	11,9401

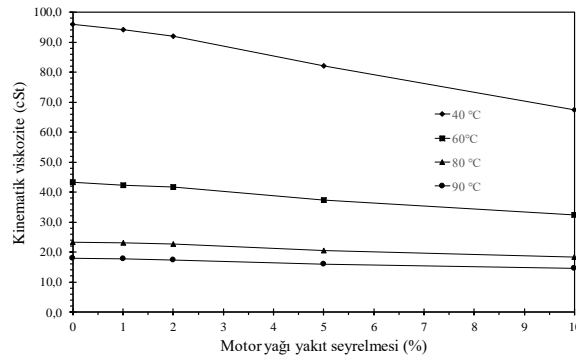
Tablo 2. Kinematik viskozite (mm²/s) ölçüm değerleri

Sıcaklık (°C)	Motoryağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	95,9903	94,0943	92,0636	82,0169	67,5075
60	43,2366	42,3574	41,7559	37,3911	32,2983
80	23,2964	23,0517	22,6010	20,4937	18,4247
90	17,9659	17,7092	17,3870	15,9554	14,5468

Tablo 3. Yoğunluk (g/cm³) ölçüm değerleri

Sıcaklık (°C)	Motoryağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	0,85066	0,85093	0,85104	0,85170	0,85262
60	0,83816	0,83839	0,83859	0,83911	0,83993
80	0,82563	0,82585	0,82602	0,82649	0,82721
90	0,81934	0,81954	0,81969	0,82014	0,82081

Şekil 2’de motor yağı biyodizel yakıt seyrelmesi (%) nin kinematik viskoziteye etkisi farklı ölçüm sıcaklıklarında sunulmuştur. Şekil incelendiğinde yakıt seyrelme miktarı arttıkça viskozitenin azaldığı her sıcaklıkta gözükmektedir. En yüksek seyrelme etkisi 40 °C deki ölçümlerde gözükmektedir ve sıcaklık arttıkça seyrelmenin viskozite üzerine etkisinin azaldığı gözükmektedir.

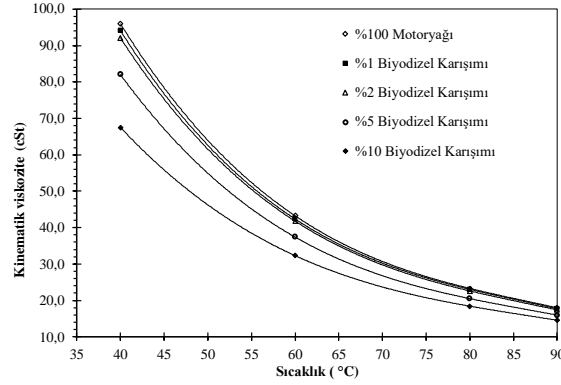


Şekil 2. Farklı sıcaklıklarda motor yağı yakıt seyrelmesinin (w-%) kinematik viskozite (cSt) üzerine etkisi

Şekil 3’te ise farklı yakıt seyrelme oranlarında sıcaklığa bağlı kinematik viskozite değerleri gösterilmiştir. Beklenildiği gibi sıcaklık yükseldikçe viskozite değerleri düşmektedir. Motor

yağının içine Biyodizel yakıtının motor yağına karıştırarak motor yağının seyrelmesiyle motor yağının viskozite değeri de şiddetle azalmaktadır. Çok düşük oranda (%1) seyrelme olsa bile viskozite üzerinden anlamlı bir şekilde anlaşılabilir. Karışım oranına bağlı sıcaklık-kinematik viskozite değerleri üçüncü dereceden polinom denklemleri kullanılarak regresyon katsayıları Excel programı kullanılarak grafik noktaları üzerinden belirlenmiştir. Karışım oranına bağlı sıcaklık-kinematik viskozite regresyon formülasyonu aşağıda Denklem 1’de verilmiştir.

$$y = A x^3 + B x^2 + C x + D \quad (1)$$



Şekil 3. Farklı yakıt seyrelme oranlarındaki motor yağı kinematik viskozite (cSt) değerlerinin sıcaklığa (°C) bağlı olarak değişimi regresyon değerleri

Tablo 4’te sıcaklık-kinematik viskozite regresyon katsayıları verilmiştir. Regresyon denklemleri kullanılarak kinematik viskozite değerleri 40 °C’den 100 °C sıcaklıklar için hesaplanabilir. Tablo 5’deki değerler bu katsayıları ve Denklem 1 formülasyonu uygulanarak yeniden hesaplanmıştır. Tablo 5’de hesaplanan viskozite değerleri görülmektedir.

Tablo 4. Kinematik viskozite regresyon denklemleri katsayıları

Test numuneleri	A	B	C	D	R ²
%100 Motor yağı için	-0,000511	0,133020	-12,054087	398,055861	1
%1 Biyodizel seyrelmesi	-0,000523	0,134756	-12,084406	395,360118	1
%2 Biyodizel seyrelmesi	-0,000488	0,126767	-11,483888	379,818585	1
%5 Biyodizel seyrelmesi	-0,000433	0,112514	-10,195554	337,497812	1
%10 Biyodizel seyrelmesi	-0,000329	0,085974	-7,853890	265,190924	1

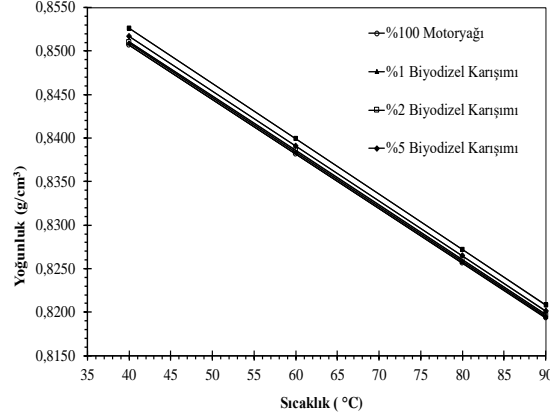
Tablo 5. Denklem 1 formülasyonu ve Tablo 4 katsayıları kullanılarak hesaplanan kinematik viskozite (mm²/s) değerleri

Sıcaklık (°C)	Motoryağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	95,9916	94,1215	92,0583	81,9861	67,537724
60	43,2418	42,4494	41,7385	37,2870	32,399924
80	23,3097	23,2700	22,5603	20,2471	18,665324
90	17,9852	18,0202	17,3294	15,6044	14,889224
100	11,6672	11,4795	11,0998	10,0824	10,541924

Şekil 4’de farklı seyrelme seviyelerinde sıcaklığa bağlı yoğunluk değerleri ölçüm sonuçları sunulmuştur. Seyrelme oranı arttıkça orantılı olarak yoğunluk da artmaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak farklı seyrelme grafikleri Denklem 2’deki gibi bir doğru denklemleri kullanılarak sıcaklık-yoğunluk regresyon denklemleri elde edilmiştir.

$$y = A x + B \quad (2)$$

Regresyon denkleminin katsayıları Tablo 6’da verilmiştir. Elde edilen bu sabit katsayı değerleri regresyon denklemlerinde kullanılarak yoğunluk değerleri 40 °C, 60 °C, 80 °C, 90 °C ve 100 °C sıcaklıklarda tekrar hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar Tablo 7’de hesaplanan yoğunluk değerleri olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Karışım oranına bağlı sıcaklık-yoğunluk regresyon grafiği

Tablo 6. Yoğunluk regresyon denklemleri katsayıları

	A	B	R ²
%100 Motor yağı için	-0,0006	0,8757	1
%1 Biyodizel Seyrelmesi için	-0,0006	0,8760	1
%2 Biyodizel seyrelmesi için	-0,0006	0,8762	1
%5 Biyodizel seyrelmesi için	-0,0006	0,8770	1
%10 Biyodizel seyrelmesi için	-0,0006	0,8781	1

Tablo 7. Hesaplanan yoğunluk (g/cm³) değerleri

Sıcaklık (°C)	Motoryağı	% 1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	% 10 Biyodizel Seyrelmesi
40	0,85170	0,85200	0,85220	0,85300	0,85410
60	0,83970	0,84000	0,84020	0,84100	0,84210
80	0,82770	0,82800	0,82820	0,82900	0,83010
90	0,82170	0,82200	0,82220	0,82300	0,82410
100	0,81570	0,81600	0,81620	0,81700	0,81810

Farklı oranlarda yakıt seyreltilmiş motor yağlarının seyreltilmemiş motor yağı viskozitesine nispet hangi oranda düştüğünü ve sıcaklığa bağlı nasıl değişim gösterdiğini incelemek için viskozite oranları Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu relatif kinematik viskozite bozulma oranları Tablo 8 de listelenmiştir.

$$\text{Kinematic viskozite oranı} = \frac{\text{Yakıt seyreltilmiş motor yağı viskozite değeri (A)}}{\text{Motor yağı viskozite değeri (B)}} \quad (3)$$

Tablo 8. Kinematik viskozite oranları

Sıcaklık (°C)	Motoryağı viskozite (cSt)	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	95,9916	0,9805	0,9590	0,8541	0,7036
60	43,2418	0,9817	0,9652	0,8623	0,7493
80	23,3097	0,9983	0,9679	0,8686	0,8008
90	17,9852	1,0019	0,9635	0,8676	0,8279
100	11,6672	0,9839	0,9514	0,8642	0,9036

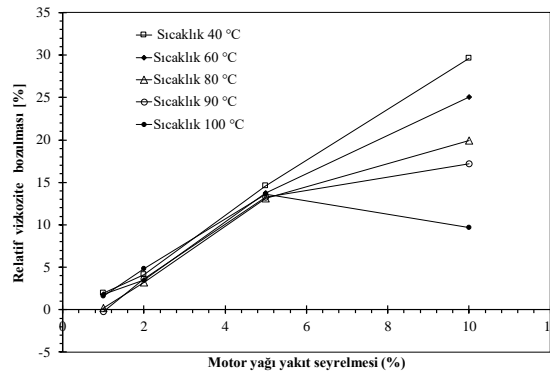
Denklem 3'te verilen viskozite oranı bir tam değerinden çıkartılarak ve yüz ile çarpılarak yüzde relatif bozulma değeri Denklem 4'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Formül üzerinde A değeri değişen sıcaklıklara karşılık gelen seyreltilmiş motor yağı viskozitelerini temsil ederken B değeri değişen sıcaklıklara karşılık gelen motor yağı viskozitelerini temsil etmektedir. Tablo 9'da relatif bozulmanın Denklem 4 formülasyonu ile hesaplanmış yüzdelik cinsinden değerleri sunulmaktadır.

$$y = \left[1 - \left(\frac{A}{B} \right) \right] \times 100 \quad (4)$$

Tablo 9. Kinematik Viskozite için Relatif Bozulma (%)

Sıcaklık (°C)	Motoryağı viskozite (cSt)	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	95,9916	1,9482	4,0976	14,5904	29,6420
60	43,2418	1,8327	3,4766	13,7711	25,0727
80	23,3097	0,1702	3,2148	13,1388	19,9247
90	17,9852	-0,1943	3,6467	13,2380	17,2142
100	11,6672	1,6083	4,8630	13,5830	9,64450

En yüksek bozulmanın %10 Biyodizel seyrelmesi için 40 C'de yaklaşık %30 olduğu gözlemlenmektedir. Bu sapmanın sıcaklık yükseldikçe %9 seviyesine kadar düşmüştür. Yani düşük sıcaklıklarda viskozite bozulması daha iyi gözlemlenmektedir. Farklı sıcaklıklarda relatif viskozite bozulmasının yakıt seyrelmesine bağlı grafiği Şekil 5'de verilmiştir.

**Şekil 5.** Motoryağı yakıt seyrelmesinin sıcaklığa bağlı relatif viskozite bozulmasına etkisinin grafiği

Farklı yakıt seyrelmeleri için tüm sıcaklıklar %5 yakıt seyrelme seviyesine kadar ortak davranış göstermişler ve tüm sıcaklıklarda seyrelme oranının üç katı kadar (% Relatif viskozite

bozulması/%Motor yağı yakıt seyrelmesi) viskozite değerlerinde bozulma ortaya çıkmıştır. Fakat relatif viskozite bozulumunda %5 yakıt seyrelme oranını geçtikten sonra, grafiklerde sıcaklığa bağlı saçılma gözlemlenmiş olup, relatif viskozite bozulumu değişikliği görülmüştür. Bu durumlarda yakıt seyrelme oranı %5'i geçtikten sonra sıcaklığa bağlı bozulma ortak davranışı değişmiştir. Sıcaklık arttıkça bozulmadaki artış oranı düşmüştür. En yüksek bozulma oranı tüm seyrelme miktarlarında 40 °C de gözlemlenmiştir, üç oranı korunmuştur. Bu sebeple %5 seyrelme oranı, bozulma oranındaki kritik değer olarak ortaya çıkmıştır. Bu seyrelme oranından sonra motor yağında seyrelmeden dolayı yapısal değişikliklerin olabileceği değerlendirilmiştir.

4. Sonuç

Raylı sistemler gibi karmaşık mühendislik yapılarını içeren sistemlerde gerçekleşen arızalar maddi ve zamansal açıdan büyük kayıplara yol açabilmektedirler. Bu arızaların gerçekleşmeden önce tespit edilmesi daha büyük kayıpların meydana gelmesini önleyecektir. Bu arızaların oluşumu kestirimci bakım yöntemlerinden olan titreşim, ultrasonik ve termal kamera ile görüntüleme ve yağ analizi gibi uygulamalarla tespiti mümkündür.

Bu çalışmada yağ analizi ile kestirimci bakım uygulaması kapsamında motor yağına belirli oranlarla karıştırılan biyodizel yakıtın yağın ayırt edici özelliklerinden olan viskozite ve yoğunluk değerlerine etkisi gözlemlenmiştir. Yapılan araştırmada, yakıt seyrelmesinin motor yağının yoğunluğunu arttırırken viskoziteyi de düşürdüğü gözlemlenmiştir. Viskozite düşüşünde ki fark yoğunlukta ki artıştan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Viskozite düşüşü %5'e kadar tüm seyrelme oranlarında sıcaklığa bağlı ortak davranış göstermiştir. Yakıt seyrelme oranı %5'e çıktığında, viskozitedeki bozulma oranı da tüm sıcaklıklar için %15'e çıkmıştır. Yakıt seyrelmesi %5 oranını geçtikten sonra, relatif bozulma sıcaklığa bağlı olarak saçılma göstermiştir. Viskozite bozulumunda davranış değişikliği görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda bozulma oranında düşme gözlemlenmiştir. Bu durum, yakıt seyrelme oranının %5'i geçmesi hali motor yağının karakteristiğinin bozulması olarak değerlendirilmiştir. Böylelikle, motor yağı yakıt seyrelme oranı ve sıcaklığa bağlı viskozite parametrelerinin izlenmesiyle yağın durumu gözlemlenebilir ve yağın karakteristiğinin davranış değişikliği takip edilerek motordaki aşınma kontrol altına alınırken, yakıt sisteminin arızası da tespit edilebilir. Dolayısıyla gerçekleşmeden önce arızaların önüne geçilebilir. Teşhis ve kestirimci bakım gözüyle ise; yağın viskozite değerleri üzerinden tanımlı bozulma hızı ile bilgi edinilebilecektir.

Teşekkür

Viskozite ve yoğunluk ölçümlerinde destek veren Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Cansel TUNCER'e teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Moslojistik, “Demiryolu taşımacılığının avantajları,” 2016. [Online]. Available: <http://www.moslojistik.com/demiryolu-tasimaciliginin-avantajlari>. [Accessed: 08-April-2022].
- [2] S. Abusaad, K. Brethee, M. Assaeh, R. Zhang, F. Gu, and A.D. Ball, “The detection of lubricating oil viscosity changes in gearbox transmission systems driven by sensorless variable speed drives using electrical supply parameters,” *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1-9, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/628/1/012078
- [3] H. Raposa, J. T. Farinha, I. Fonseca, and D. Galarb, “Predicting condition based on oil analysis – A case study,” *Tribology International*, pp. 65-74, 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.01.041
- [4] J. Zhu, D. He, and E. Bechhoefer, “Survey of lubrication oil condition monitoring, diagnostics, and prognostics techniques,” *Journal of Chemical Science and Technology and Systems*, pp. 100-115, 2013.
- [5] L. Guan, X.L. Feng, G. Xiong, and J.A. Xie, “Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation,” *Sensors and Actuators A*, Vol. 168, pp. 22 – 29, 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.03.033

- [6] Agostonet Agoston, C. Otsch, and B. Jakoby, “Viscosity sensors for engine oil condition monitoring- Application and interpretation of results,” *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 121, no. 2, pp. 327 – 332, 2005, doi: 10.1016/j.sna.2005.02.024
- [7] J. Schmitgal and S. Moyer, “Evaluation of sensors for on-board diesel oil condition monitoring of U.S. Army ground equipment,” *TACOM/TARDEC*, Report No. 14113, 04 JAN 2005.
- [8] J.D. Turner and L. Austin, “Electrical techniques for monitoring the condition of lubrication oil,” *Measurement Science and Technology*, vol. 14, no. 10, pp. 1794 – 1800, 2003, doi: 10.1088/0957-0233/14/10/308.
- [9] J. Kuntner, R. Chabicovsky, and B. Jakoby, “Oil condition monitoring using a thermal conductivity sensor,” *Proceedings of the GMe Forum*, Vienna, Austria, March 17 - 18, 2005, pp. 203 – 209.
- [10] D. Mann, “*Motor oils and engine lubrication*”, USA, Motor Oil Engineers, L.L.C., pp. 4, 2003.
- [11] B.C. Sharma and O.P. Gandhi, “Performance evaluation and analysis of lubricating oil using parameter profile approach,” *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 60, no. 3, pp. 131 – 137, 2008, doi: 10.1108/00368790810871057.
- [12] J. D. Halderman, *Automotive Technology*, New York: McGraw-Hill. A 1996
- [13] S. Kumar, P.S. Mukherjee, and N. M. Mishra, “Online condition monitoring of engine oil,” *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 57, no. 6, pp. 260 – 267, 2005 doi: 10.1108/00368790510622362
- [14] J.D. Turner and L. Austin, “Electrical techniques for monitoring the condition of lubrication oil,” *Measurement Science and Technology*, pp. 1794 – 1800, 2003, doi: 10.1088/0957-0233/14/10/308

Özgeçmiş



Mustafa Ertunç TAT

Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Makine Eğitimi, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini Amerika Birleşik Devletleri Iowa Eyalet Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümlerinde tamamlamıştır. Aynı üniversitede doktora sonrası çalışma da gerçekleştirmiştir. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi (Doç. Dr.) olarak görevine devam etmektedir. İlgi alanına giren araştırma konuları termodinamik, sürdürülebilir enerji, verimlilik, pistonlu motorlar, egzoz emisyonları, motor test ve en iyileştirme, alternatif ve çevre dostu yakıtlar ve makine yağlarıdır.

E-Posta: metat@ogu.edu.tr



Emine DORU

Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği bölümünden 2018 yılında mezun oldum. 2018-2019 yılları arasında Osmangazi Üniversitesi'nde İş Sağlığı ve Güvenliği tezsiz yüksek lisans programını bitirdim. Osmangazi Üniversitesi'nde 2019 yılında başladığım Raylı Sistemler yüksek lisans programını 2022 senesinde tamamladım. Raylı Sistemler yüksek lisans öğrenimim boyunca ağır hizmet dizel motor yağı yakıt seyreltmesi viskozite ölçümü ile incelenmesi konusu üzerine çalıştım. Bakım, kontrol ve sinyalizasyon, kalite kontrol alanlarında iş arayışım mevcut. E-Posta: E-Posta: doruemine@gmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Emine DORU: Uygulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme. Mustafa Ertunç TAT: Kavramsallaştırma, Doğrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Modal Parametre Belirleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Demiryolu Traverslerinin SISO-tipi Vibro-akustik Modal Analizlerle Tahribatsız İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN*¹, Bekir AKTAŞ², Ahmet ÖZBAYRAK²

¹TCDD Beton Travers Fabrikası Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

*ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 10.03.2023, Kabul/Accepted: 11.04.2023, Yayınlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Bilgisayar ve sensör teknolojilerindeki gelişmeler, titreşim ve ses verilerinin, yüksek çözünürlük ve örnekleme hızlarıyla, ağır iklimsel şartlar altında dahi kayıt altına alınabilmesini sağlamıştır. Bu kritik verilerin, uzay, havacılık, savunma, tıp, afet yönetimi ve her çeşit mühendislik branşında farklı amaçlarla kullanılabilmesi için sürekli yeni yöntemler geliştirilmektedir. Bunlardan biri de tahribatsız modal parametre belirleme yöntemleridir. Bu yöntemler içerisinde ise, günümüzde dünyada en yaygın kullanılan ve kabul göreni, titreşim esaslı deneysel modal analizlerdir (EMA). Ancak bu metodun, temaslı ölçüm gerektirmesi ve lokal ölçüm alması gibi önemli dezavantajları söz konusudur. Bu dezavantajlar, çeşitli sektörlerde analizleri yapılan birçok unsur için geçerli olup, demiryolu taşıt bileşenlerinin veya demiryolu yapı elemanlarının analizleri de buna örnek teşkil etmektedir. Bu çalışmada, literatürde ender incelenmiş bir metod olan, vibro-akustik modal analizlerin (VMT), bu bağlamda, EMA için uygun bir alternatif olup olmayacağı araştırılmıştır. Bu kapsamda, literatürde tespit edilen eksiklikler dikkate alınarak hazırlanan VMT ve EMA test düzenekleri kullanılarak demiryolu traversleri üzerinde karşılaştırmalı modal analizler yapılmıştır. Sonuç olarak, hazırlanan SISO-tipi VMT test metodunun; belirli bir frekans aralığındaki rezonans frekansı, sönümlenme oranı ve mod şekillerinin tahminlerinde, EMA metodu kadar hassas ve tutarlı sonuçlar verebildiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu traversleri, Modal sönümlenme oranı, Frekans yanıt fonksiyonu, FRF FFT grafikleri karşılaştırması, Logaritmik azalma sönümlenme oranı, Modal daire metodu

Comparison of Modal Parameter Estimation Methods and Investigation of Railway Sleepers by Non-Destructive SISO-type Vibroacoustic Modal Analyses

Abstract: Recent developments in computer and sensor technologies have enabled vibration and sound data recording with high resolution and sampling rates, even under severe climatic conditions. New methods are constantly being developed to use these critical data in space, aviation, defense, medicine, disaster management and all kinds of engineering branches. One of them is non-destructive modal parameter estimation methods. Today, among these methods, vibration-based experimental modal analysis (EMA) is the most widely used and accepted one globally. However, this method has significant disadvantages. For example, it requires sensor mounting and takes local measurements. These disadvantages are valid for many elements analyzed in various sectors, and the analysis of railway vehicle components or track elements are two examples. This study investigated whether vibroacoustic modal testing (VMT), a rarely studied method, would be a suitable alternative for EMA in this context. Comparative modal analyses were made on the railway sleepers, using VMT and EMA test setups, reorganized considering the deficiencies identified in the literature. As a result, it has been determined that the prepared SISO-type VMT setup can provide as accurate and consistent results as the EMA in estimating the resonance frequencies, damping ratios and mode shapes in a certain frequency range.

Keywords: Railway sleepers, Modal damping ratio, Frequency response function, FRF FFT graphs comparison, Logarithmic decrement damping ratio, Modal circle method

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, A. Özbayrak, "Modal parametre belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması ve demiryolu traverslerinin siso-tipi vibro-akustik modal analizlerle tahribatsız incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 36-49, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1263277

1. Giriş

Titreşim ve ses, geçmişten günümüze birçok yapı ve ekipmanın tasarım, kalite kontrol ve kullanım süreçlerinde yararlanılan en önemli veriler arasındadır. Günümüzde, titreşim ve ses (akustik) analizleri, iki ayrı disiplin olarak değerlendirilmektedir. Bunun nedeni, bu iki farklı etkiyi ölçmek için kullanılan ekipmanların ve teorik arka planlarının bir takım önemli farklılıklara sahip olmasıdır. Ancak titreşen cisimlerin ses üretebilmesi veya ses dalgalarının tesir ettikleri cisimlerde titreşimlere neden olabilmesi nedeniyle bu iki disiplin birbiriyle iç içedir. Bu yüzden çok zaman “vibro-akustik analizler” adında tek bir çatı altında analizler birleştirilmektedir [1]. Bilindiği üzere, titreşim analizlerinde en yaygın kullanılan sensörler ivmeölçerlerdir. Akustik analizlerde en yaygın kullanılan sensörler ise, ses basıncı transformatörleri veya daha yaygın tabiriyle mikrofonlardır. Bu sensörler kullanılarak, zaman-bazında ve frekans-bazında, çeşitli birçok analizler yürütülebilmektedir. Bu analizler içerisinde en önemlilerden biri deneysel modal analizlerdir [2]. Bu analizler sayesinde, çeşitli yapı, sistem ve elamanların istenilen modal parametreleri (rezonansa uğradıkları frekanslar, dinamik yükleri sönümlenme performansları, çeşitli frekanslarda sergiledikleri mod şekilleri vb.), gerek laboratuvar ortamında, gerekse kullanım yerinde, tahribatsız olarak belirlenebilmektedir [2-4]. Tablo 1’de, söz konusu ivmeölçer ve mikrofonlar kullanılarak uygulanabilen dört farklı modal test metodunun; en yaygın girdi, yanıt ve çıktı birimleri, literatürden yararlanılarak [2-5] özetlenmiştir. Sunulan bu modal analiz yöntemlerinin dışında, birçok farklı yöntem de söz konusudur. Ayrıca, sensör ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelerle, gelecekte yeni yöntemlerin ortaya konulması da mümkündür.

Tablo 1. Titreşim ve akustik esaslı modal test yöntemlerine ait girdi, yanıt ve çıktılarının birimleri

Parametre	Titreşim Esaslı Modal Analiz (EMA)	Akustik Esaslı Modal Analiz (AMT)	Akustik-titreşim Esaslı Modal Analiz (AVMT)	Vibro-akustik Modal Analiz (VMT)
Girdi	Kuvvet (N)	Akustik kuvvet (m^3/s^2)	Akustik kuvvet (m^3/s^2)	Kuvvet (N)
Yanıt	İvme (m/s^2)	Basınç (Pa)	İvme (m/s^2)	Basınç (Pa)
Çıktı (FRF)	$(m/s^2)/N$	$Pa/(m^3/s^2)$	$(m/s^2)/(m^3/s^2)$	Pa/N

Tablo 1’de sunulan modal test yöntemlerinde girdi uygulanması ve yanıt alınması esnasında kullanılan ekipman ve sensörler ve ölçülen veriler farklı olsa da, genel hatlarıyla üç ortak aşamaya sahiptir [2-5]: İlk aşamada, Tablo 1’de “girdi” olarak tanımlanan bir etki ile test elemanı tahrik edilmekte, aynı zamanda, “yanıt” olarak tanımlanan tepki ölçülmektedir. Bu iki parametre, saniyede binlerce veri okuyabilen veri toplama cihazlarıyla, birbiriyle senkronize bir şekilde kayıt altına alınmaktadır. Bu zaman-bazlı kayıtlar, ileride işlenecek ham verileri oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bir takım önemli kontrol ve optimizasyonlarda da kullanılır. Örneğin, modal testlerde istenilmeyen “çift vuruş (double hit)” problemi oluşup oluşmadığı, bu kayıtlar sayesinde kontrol edilmektedir. Bu ham veriler, bazı çalışmalarda “genel sönümlenme” performansı analizinde de kullanılmaktadır. Örneğin, Gidrao ve ark. [6], beton numunelerin sönümlenme oranlarını, kuvvet sensörsüz çekiçle tahrikler uygulayıp, mikrofonla kayıt altına aldıkları ses basıncı-zaman verisine logaritmik azalma yöntemiyle eğri uydurarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Benzer yöntem Guesser ve Martins [7] tarafından, çeşitli demir alaşımların sönümlenme performanslarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Bu yöntemin pratik olması ve az ekipman gerektirmesi gibi çeşitli avantajları vardır. Ancak, uygun şekilde kullanılmazsa, önemli dezavantajları da söz konusudur. Çünkü bu yöntemle elde edilen sönümlenme oranı, hem genel, hem de tahrik-endekslidir. Genel olarak nitelendirilmesinin nedeni, bu yöntemle, çeşitli frekanslardaki farklı sönümlenme oranları ayrı ayrı incelenememektir. Oysaki birçok malzemenin, yüksek ve düşük frekansları sönümlenme performansı birbirinden farklıdır. Tahrik-endeksli olarak nitelendirilmesinin nedeni ise, olası değişken tahrik şiddetlerinin ve frekans yoğunluklarının düzgünleştirilmeden kullanılmasıdır. Hâlbuki bu parametreler, aynı kişinin aynı test şartlarında uyguladığı farklı tahrikler arasında dahi az-çok değişmektedir. Farklı kişilerin, farklı ekipmanlar kullanarak, farklı şekillerde uyguladığı farklı tahriklerin etkisi ise çok daha fazla

olacaktır. Bu farklılıkların kısmen giderilmesi için çeşitli otomatik tahrik uygulayıcılar geliştirilmiştir. Buna rağmen, aynı darbenin, farklı elastisite modülüne sahip malzemelere uygulanması halinde, ortaya farklı şiddette ve farklı frekans dağılımına sahip dinamik kuvvetler ortaya çıktığı literatürde belirtilmektedir [8-10]. Özetlenirse, zaman-bazlı ham verilerle, frekans-bazlı sönümlenme analizi yapılamamakta ve ileride açıklanacak tahrik düzgünleştirmeli analizler kadar hassas ve evrensel sonuçlar elde edilememektedir [3].

İkinci aşamada, bir önceki aşamada elde edilen zaman-bazlı, ham girdi ve yanıt verileri, uygun modal analiz teknikleriyle (örneğin Hızlı Fourier dönüşümü, Fast Fourier Transform, FFT) işlenmektedir. Bu şekilde zaman-bazlı ham veriler, yarı-işlenmiş, frekans-bazlı veriler hâline dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm ardından elde edilen FFT grafiklerinin yatay eksenini frekans (Hz) cinsinden olup, dikey eksenini, Tablo 1'in 3. satırında örnekleri verilen yanıt birimlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu FFT grafikleri yarı-işlenmiş halde olsa da, bir takım önemli kontrollerin ve test süreci optimizasyonlarının yapılmasında da kullanılmaktadır. Örneğin girdi kaydının FFT grafiği incelenerek, test örneğinin istenilen rezonans frekanslarını tahrik etmek açısından yeterli olup olmadığı tahkik edilmektedir. Yanıt kaydının FFT grafiğinden ise, teste tabi tutulan nesnenin (girdi uygulanan ve yanıt alınan noktalarına bağlı olarak bazı) rezonans frekansları belirlenebilmektedir. Nitekim ASTM C215-19 [11], standart ebatlı test numunelerinin temel (ilk) rezonans frekanslarını belirlerken bu FFT grafiklerini kullanmaktadır. Literatürde, bu metodu kullanan birçok çalışma mevcuttur. Örneğin Matsuoka ve Watanabe [12], çeşitli demiryolu beton traverslerinin rezonans frekanslarını, desibel ölçer (mikrofon) ve ivmeölçer kullanarak elde ettikleri FFT grafikleriyle incelemiştir. Çalışma sonunda, bu iki farklı yöntemin birbiriyle oldukça benzer sonuçlar sağladığı raporlanmaktadır. Ayrıca ses bazlı analizlerin, herhangi bir sensör montajı gerektirmediğinden, demiryolu bakım personeline, çatlak içeren traverslerin rezonans frekanslarındaki düşüşlerden yola çıkarak, hasar tespit çalışmalarında oldukça pratik olarak kullanılabileceği belirtilmektedir. Ancak çalışmada kullanılan desibel ölçerin, saha çalışmalarına uygunluğu, örneğin çevredeki gürültülerden etkilenip etkilenmediği araştırılmamıştır. Öte taraftan, demiryolu traverslerinin rezonans frekanslarının yalnızca çatlak içerikleriyle değişmediği, bu durumun çok daha kompleks olduğu unutulmamalıdır. Örnek verilecek olursa; travers geometrisi, beton karakteristikleri, beton yaşı, nem içeriği, donatılendirme metodu, travers altındaki balast tabakası ve altyapı karakteristikleri rezonans frekanslarını değiştirmektedir. Dolayısıyla bazı traverslerin hasarlı, bazı traverslerin hasarsız olduğunu belirlemek için konunun tüm detaylarıyla daha derinlemesine incelenmesi gerektiğini ifade etmekte yarar vardır. Literatürde, söz konusu FFT grafiklerini kullanarak, modal sönümlenme oranlarını belirlemeyi amaçlayan bazı çalışmalar da söz konusudur. Örneğin, Bekele ve ark. [13], çeşitli asfalt ve beton numunelerin modal sönümlenme oranlarını, akustik kuvvet ölçümü olmayan bir hoparlörle, giderek artan frekansta ses basınçları uygulayarak elde ettikleri ivme değişim kaydı üzerinden incelemektedir. Bu metod FFT grafiği elde etmenin farklı bir yolu olup, İngilizce literatürde "sweep" olarak adlandırılmaktadır. Çalışmada, akustik kuvvet ölçümü olmayan hoparlör kullanıldığından ve girdi kaydı mevcut olmadığından, yanıt FFT şiddetinin tahrik FFT şiddetine oranlanarak düzeltilmesi mümkün olmamıştır. Bu düzeltme işlemi, hassas sönümlenme oranı tespitleri için büyük önem taşımaktadır. Çünkü kullanılan ekipmana bağlı olarak, uygulanan akustik kuvvetin şiddetinin az-çok değişme ihtimali söz konusudur. Nitekim çalışma sonunda, hoparlör ses seviyesi artıp azaldığında veya tahrik unsuru olarak hoparlör değil de kuvvet ölçümsüz tokmak darbeleri kullanıldığında, rezonans frekanslarının kısmen değiştiği raporlanmıştır. Özet olarak, FFT analizleriyle elde edilen modal sönümlenme oranı, zaman-bazlı analizlerle elde edilen genel sönümlenme oranından farklı olarak, frekans-bazında analiz imkânı sağlamaktadır. Ancak, düzgünleştirme eksikliği, bu analizlerde de hâlen geçerlidir. Dolayısıyla bu yöntemle belirlenen modal parametreler de tahrik-endekslidir ve ileride açıklanacak tahrik düzgünleştirmeli analizler kadar hassas ve evrensel sonuçlar elde edilememektedir [3].

Modal test ve analizlerin üçüncü aşamasında, önceki iki aşama ardından elde edilen yanıt FFT'leri, uygun modal analiz teknikleriyle, girdi FFT'lerine oranlanarak, Tablo 1'in 4. satırında

verilen çıktılar, yani frekans yanıt fonksiyonları (Frequency Response Function, FRF) elde edilmektedir. Bu FRF grafiklerinin yatay eksen, FFT grafikleriyle benzer şekilde frekans (Hz) cinsindedir. Ancak dikey eksen, FFT grafiklerinden farklı olarak, tahrik şiddeti ve frekans yoğunluğu düzgünleştirilmesi (normalization) yapılarak evrenselleştirilmektedir.

Günümüzde dünya genelinde en yaygın uygulanan ve kabul gören deneysel modal test yöntemi, Tablo 1'in ikinci sütunda verilen, titreşim esaslı modal analizlerdir. Bu yüzden, deneysel modal analiz (experimental modal analysis, EMA) tabiri yalnız olarak kullanıldığında, genellikle bu yöntem işaret edilmektedir. Bu yöntem, alternatif modal test yöntemlerinin geçerliliğinin değerlendirilmesinde de kullanılmaktadır [14]. Bu yöntemde, girdi, kuvvet sensörleri ile Newton (N) cinsinden, yanıt ise, ivmeölçer sensörleri ile genellikle m/s^2 cinsinden tespit edilmektedir. Dolayısıyla elde edilen FRF grafiğinin dikey eksen birimi yanıt/girdi, yani $(m/s^2)/N$ olmaktadır. Bu ifade bazen $m/(N.s^2)$ şeklinde de geçmekte olup, aynı şeyi ifade etmektedir. İvme değerinin yer çekim ivmesi (g) biriminden tespit edilmesi halinde ise FRF şiddeti g/N olmaktadır. Titreşim esaslı EMA günümüze kadar birçok çalışmada kullanılmıştır [2-4, 9].

İkinci yöntem, Tablo 1'in üçüncü sütununda verilen akustik esaslı modal testlerdir (AMT). Bu yöntemde girdi şiddeti, akustik tahrik sağlayıcılar (hoparlör) üzerine yerleştirilen ivmeölçer sensörleri ile belirlenmektedir. Bu ivmeölçerin birim alan için ölçtüğü ivme değeri (m/s^2), tüm hoparlör diyafram alanıyla çarpılarak akustik kuvvet veya hacimsel ivme değeri belirlenmektedir ($m^2 \times m/s^2 = m^3/s^2$). Bu akustik kuvvet kaynağı ile analiz edilecek frekans aralığını kapsayan bir "beyaz gürültü" belirli bir süre müddetince test elemanına yönlendirilmektedir. Ses basıncı test elemanına bağlı olarak artırılıp azaltılmakta olup, büyük/rijit test elemanları için güçlü hoparlörler gerekmektedir. Bu yöntemde, yanıt, mikrofonlar ile tespit edilmekte olup, metrik SI birimi doğrultusunda Pascal (Pa) cinsinden ifade edilmektedir. Sonuç olarak AMT metoduyla elde edilen nihai FRF grafiğinin dikey ekseninin birimi $Pa/(m^3/s^2)$ olmaktadır [5]. Guimaraes ve ark. [15] yanma odalarını AMT metoduyla incelemişlerdir. Diğer bir yöntem, Tablo 1'in dördüncü sütunda verilen akustik-titreşim esaslı modal testlerdir (AVMT). Bu yöntemde girdi birimi, AMT metodu ile aynıdır (m^3/s^2). Yanıt ise, EMA metodu gibi ivmeölçer sensörleriyle, m/s^2 cinsinden tespit edilmektedir. Dolayısıyla elde edilen nihai FRF grafiğinin dikey ekseninin birimi yanıt/girdi, yani $(m/s^2)/(m^3/s^2)$ olmaktadır. Bu ifadenin sadeleştirilmiş hâli ise $1/m^2$ 'dir [5].

Tablo 1'de sunulan son yöntem ise, beşinci sütunda verilen vibro-akustik modal testlerdir (VMT). Bu yöntemde girdi, EMA metodundaki gibi kuvvet sensörleri ile N cinsinden belirlenmektedir. Yanıt ise, AMT metodundaki gibi mikrofon sensörleri ile (SI cinsinden) Pascal birimiyle tespit edilmektedir. Dolayısıyla bu yöntemle elde edilen nihai FRF grafiğinin dikey ekseninin birimi yanıt/girdi, yani $Pa/(m^2)$ olmaktadır. Basınç birimi olan Pascal, $1 m^2$ alana uygulanan 1 N kuvveti ifade etmektedir ($1 Pa=1 N/m^2$). Dolayısıyla VMT metoduyla elde edilen FRF grafiklerinin şiddetleri aynı zamanda $(N/m^2)/N$ cinsinden de ifade edilebilmekte olup, bunun sadeleştirilmiş hâli ise, AVMT metoduyla aynı, $1/m^2$ 'dir [5]. VMT metodunun, AMT ve AVMT metodlarına karşı avantajı, bu testler sayesinde (sönümlenme düzeyi veya rijitliği yüksek ve/veya boyutları büyük ve/veya açık alandaki) yapısal elemanların daha kolay tahrik edilebilmesidir [16]. Bu yüzden EMA ve VMT testlerinde uygulanan tahrik için yapısal, AMT ve AVMT testlerinde uygulanan tahrik için akustik tanımlamaları yapılmaktadır. VMT metoduyla ilgili erişilebilen çalışmalardan en kapsamlısı Zhu ve ark. [14]'a aittir. Araştırmacılar, otomobil fren diski ve devre kartı üzerinde yürüttükleri VMT analiz sonuçlarını, EMA sonuçlarıyla karşılaştırmaktadır. Çalışma sonucunda VMT ve EMA metoduyla elde edilen rezonans frekanslarının birbirlerinden en fazla %1 farklı oldukları ve mod şekillerine ait Modal Güvenirlik Kriteri değerlerinin %90'ın üzerinde olduğu belirlenmiştir. Ancak VMT düzenekleriyle belirledikleri modal sönümlenme oranlarının, EMA sonuçlarından kayda değer (%700'e varan) düzeyde farklı olduğu belirtilmektedir. Bu farklılığın, test numunesi ile mikrofonlar arasındaki hava moleküllerinin sönümlenme düzeyini artırmasından kaynaklandığını düşünmektedirler. Ancak sunulan sönümlenme oranları incelendiğinde, analiz edilen 18 rezonanstan yalnız 6 adedinde VMT

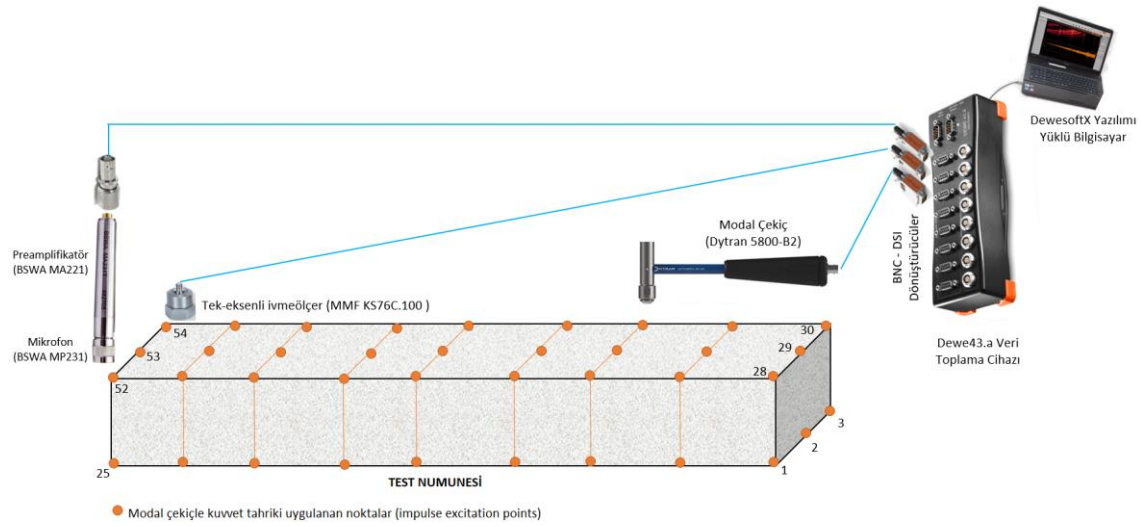
metoduyla belirlenen sönümlenme oranlarının daha yüksek çıktığı, 9 adedinde EMA metoduyla belirlenen sönümlenme oranlarının daha yüksek çıktığı, 3 adedinin ise eşit sonuç verdiği görülmektedir. Dolayısıyla düşünülen bu nedenin dışında veya bunun yanı sıra, başka artırıcı ve azaltıcı etkilerin de araştırılması gerektiğini söylemek yanlış olmayacaktır. Nitekim, çalışmada analiz edilen simetrik ve dairesel test elemanının rezonans frekansları birbirine oldukça yakın olduğundan, kullanılan tek serbestlik dereceli analizlerin (SDOF) bu rezonanslara ait sönümlenme oranlarını belirlerken yetersiz kalabileceği literatürde belirtilmektedir [17]. Test ve analiz düzeneklerindeki eksiklikler nedeniyle VMT metodunun sönümlenme oranlarını belirlemede yetersiz kalacağı çıkarımında bulunmak yanlış olacaktır. Araştırmacılar, hava molekülleri kaynaklı sönümlenme artışlarını sorumlu tutmakla birlikte, bu farklılığın, mikrofonların test numunesine daha yakın konumlandırılması ile giderilip giderilmeyeceğini araştırmamışlardır. Araştırmacılar, ortam gürültüsünün analizleri etkilemesi nedeniyle, oldukça sessiz bir ortamda test yapılmasını önermektedir. Ancak, herhangi bir önlem alınarak bu dezavantajın giderilip giderilemeyeceği çalışma kapsamında araştırılmamıştır. Ayrıca, çalışmada sunulan FRF grafikleri karşılaştırıldığında, EMA testlerine ait FRF şiddet ($m/(N.s^2)$) değerlerinin, VMT testlerine ait şiddet (Pa/N) değerlerinden, ilk rezonans frekansında yaklaşık 100 kat daha zayıf iken, diğer rezonans frekanslarında yaklaşık 100 kat daha güçlü olduğu görülmektedir. Her ne kadar, farklı test yöntemlerine ait FRF şiddet değerlerinin birbiri ile karşılaştırılması doğru olmasa da, frekans değeri değişmesiyle birbiriyle zıt ve 10^4 kata ulaşan bu farklılığın nedeni araştırılmalıdır.

Bu çalışmada, en önemli demiryolu üstyapı elemanlarından biri olan demiryolu traversleri üzerinde deneysel modal testler yapılacaktır. Sunulan literatür özetinden, yaklaşık 270 kg kütleyle sahip demiryolu traversleri için en uygun yöntemin, yukarıda izah edilen “yapısal tahriklerle” yürütülen EMA metodu olduğu, alternatif bir metod uygulanması gerektiğinde ise ikinci en uygun seçeneğin yine “yapısal tahrikler” kullanılan VMT olduğu anlaşılmaktadır. Titreşim esaslı EMA metodunun birçok avantajı bulunmasına rağmen, bazı uygulamalarda çeşitli dezavantajları da söz konusu olmaktadır. Örneğin EMA metodu temaslı ölçüm, yani ivmeölçer yapıştırma işlemi gerektirmekte, yüksek frekansların okunabilmesi için ise daha detaylı (vidalama, özel yapıştırma malzemeleri vb.) işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Öte yandan, yapıştırıcı tarzı bağlantıların birçoğunun çeşitli iklimsel şartlar altında frekans iletkenlik katsayıları düşmektedir. Bu sayılan faktörler, birçok uygulamada mümkün ve pratik olmamaktadır. Örneğin kirli/yağlı/ıslak (demiryolu traversleri vb.) numunelerin, çeşitli iklimsel şartlar altında, saha ölçümleri yapılırken bu durum önemli bir dezavantajdır [3, 12, 14]. Yine EMA metodunda, ivmeölçer kaynaklı kütle artışları söz konusudur. Bu durum ise, çok sayıda ivmeölçer kullanılan ve/veya küçük/hafif test elemanlarında sonuçların olumsuz etkilenmesine neden olmakta [3, 14], ayrıca fazladan emek, zaman ve maliyet gerektirmektedir. Yine kullanılan ivmeölçerler noktasal (lokal) ölçüm almaktadır. Bu ise ivmeölçerlerin bağlandıkları noktanın, herhangi bir rezonansa ait modal düğüm noktasına denk gelmesi halinde, bu rezonansın okunamamasına sebebiyet vermektedir [3, 14]. Sonuç olarak, özellikle saha muayenelerinde, temassız ve global ölçüm imkanı sağlayan modal test metodlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sunulan literatür özetinden anlaşıldığı üzere, temassız ve global ölçüm alan mikrofon sensörleri kullanılan VMT test metodu, bu açılarından önemli avantajlar sağlayabilecektir. Ancak bu konunun öncelikle laboratuvar ortamında yürütülecek testlerle tahkik edilmesi gerekmekte olup, bu çalışmanın amacı da budur. Literatürde VMT metodu kullanılarak modal test yapılan araştırma sayısı oldukça azdır. Demiryolu traverslerini bu metodla inceleyen yayınlanmış herhangi bir çalışmaya ise rastlanılmamıştır.

2. Materyal ve Metot

Titreşim esaslı deneysel modal test ve analizler (EMA), girdi ve yanıt sensörü sayısına ve uygulanma biçimine bağlı olarak çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Bunlardan ilkinde, teste tabi tutulacak nesne, kuvvet sensörlü, metal uçlu bir modal çekiç ile analiz noktalarından (DOF) sırayla tahrik edilmekte (roving hammer) ve tek bir ivmeölçerle, bu nesnenin verdiği yanıt ölçülmektedir (single input-single output, SISO). SISO tipi deneysel modal analizlerin bir diğer

uygulanma biçimi bunun zıddı olup, modal çekiç tahrikinin sürekli sabit bir noktadan yapılmasına karşın ivmeölçerin analiz noktalarına (DOF) sırayla yapıştirılmasıyla (roving response) yapılması şeklindedir. İkinci metot, pratik olmaması ve hafif test unsurlarında hataya sebebiyet verebilmesi nedeniyle zorunlu durumlar haricinde tercih edilmemektedir [17]. EMA için verilen bu yöntemler VMT tipi modal testler için de benzerdir. Tek fark, yanıt verisi alırken ivmeölçer yerine mikrofon sensörü kullanılmasıdır. Bu çalışmada gerek VMT testleri, gerekse EMA testleri esnasında modal çekiç gezdirmeli (roving hammer), SISO-tipi (tek-sensörle, tek eksenle) analiz yapılacaktır. Her iki test için ortak bir test numunesi (LCR-8-tipinde [4, 8, 9, 10] beton demiryolu traversi) kullanılacak, bu ortak test numunesi üzerinde, tüm test aşamaları senkronize halde yürütülecektir (aynı çekiç darbeleri, aynı zamanda, hem mikrofon, hem de ivmeölçerle kayıt altına alınacaktır). Çalışma kapsamında hazırlanan VMT ve EMA test düzenekleri Şekil 1’de sunulmuştur.

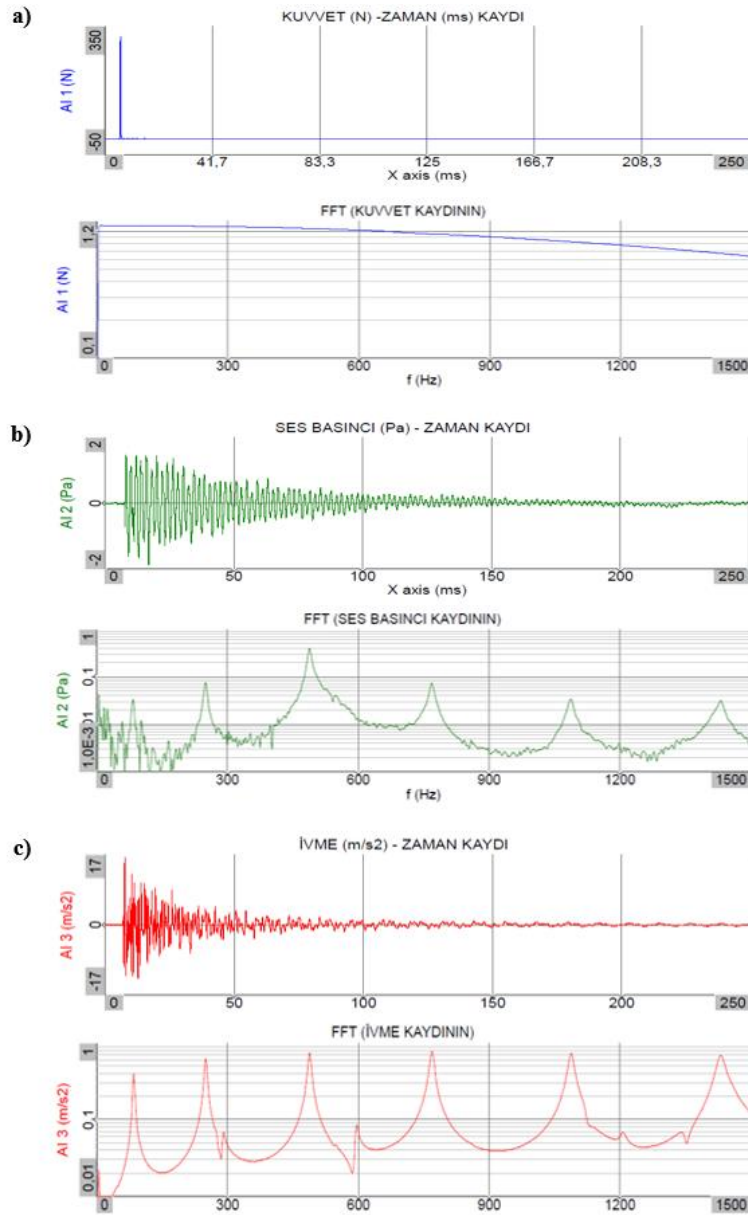


Şekil 1. Çalışma kapsamında hazırlanan VMT ve EMA test düzenekleri

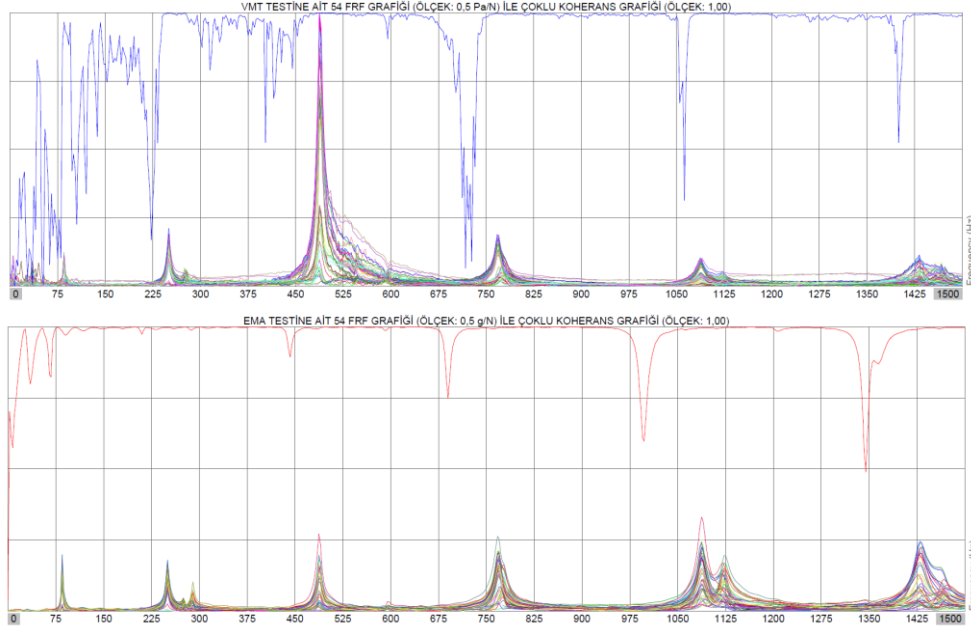
Şekil 1’den görüldüğü üzere, travers numunesi, literatür doğrultusunda [2-4], 600 mm kenar uzunluğuna sahip yumuşak poliüretan küpler üzerine konarak serbest salınım yapmasına imkân tanınmıştır. VMT testleri esnasında, BSWA-MPA-231 modeli, ½ inch diyafram alanına sahip, ön-polarizasyonlu-kapasitif, ICP enerji beslemeli, dış-alan (free-field) tipi mikrofon kullanılmıştır. Kapasitif mikrofonların frekans okumaları, dinamik mikrofonların aksine, mesafeye bağlı olarak değişmemektedir [18]. Ayrıca dış tip mikrofonların, odaklandığı doğrultunun dışından gelen ses dalgalarına karşı duyarlılıkları düşüktür. Bu nedenle aşırı titreşim veya gürültü oluşturan sistemlerde arıza kaynağının tespitinde ve otomobil geçiş testlerinde (pass-by) tercih edilmektedir [19]. Şekil 1’de görüldüğü üzere, teste tabi tutulacak travers 9 düzleme ayrılarak, toplamda 54 analiz noktası (DOF) oluşturulmuştur. Mikrofon sensörü, analiz edilecek frekans bandındaki tüm rezonansları görebileceği bir uç noktaya (52. nokta), travers üst yüzeyine dik (z-ekseninde ölçüm alacak) şekilde konumlandırılmıştır. Test süresince, modal çekiçle, bu 54 analiz noktasından mümkün olanların her birine, sırasıyla 5’er defa, mikrofon sensörüyle aynı (z) ekseninde tahriker uygulanmış, mikrofon standında herhangi bir değişiklik yapılmadan ölçümler

devam ettirilmiştir (roving hammer SISO-type). Testlerin yapıldığı alan olarak, çevresel titreşim ve gürültülerin sürekli mevcut olduğu (yaklaşık 60 dB(A) ortam gürültüsü) bir fabrika atölyesi seçilmiştir. Böylece test alanının, birçok saha ölçümü için yeterli simülasyonu sağlaması durumu gözetilmiştir. Mikrofonun korumasız ve/veya uzak bir noktaya konulmasıyla yapılan ön testlerde, rezonans frekanslarının tespiti mümkün olsa da, sönümlenme oranlarının literatürdeki önceki çalışmalara [14] benzer tutarsız sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle, mikrofon, Şekil 1’de görüldüğü şekilde, polipropilen bir hazne (ağız çapı: 8,6 cm, taban çapı: 6,5 cm, derinlik: 17 cm) içine yerleştirilmiştir. Haznenin iç çeperlerine herhangi bir yalıtım malzemesi konulmayarak titreşen traverten gelecek ses dalgalarının mikrofonu kolayca iletilebilmesi amaçlanmıştır. Ancak mikrofonun bağlandığı taban kısmına 2,5 cm’lik polystyrene tabaka konarak ses dalgalarının yankı etkisiyle traverse, oradan da tekrar mikrofonu dönmeye elimine edilmiş/ötelenmiştir. Haznenin dış kısmı poliüretan sünger ve EVA ile (yapıştırılmaksızın) esnek kauçuk lastiklerle kaplanmış, bu şekilde düşük ve yüksek frekanslı ses dalgalarının ölçümleri olumsuz etkilememesi amaçlanmıştır. Mikrofonun çevresel titreşimlerden etkilenmemesi ve sağlıklı ölçüm alabilmesi için uygun bir standla bağlantısı yapılmıştır. Ayrıca mikrofon numuneye yakın konumlandırılarak çevresel gürültülerden daha az etkilenmesi ve hava moleküllerinin sönümlenme parametrelerini olumsuz etkilemesinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. EMA testlerinde ise 1 adet MMF-KS76C.100 modeli ivmeölçer (± 60 g ölçüm kapasitesine sahip ve %5’e kadar hata payı sınırlamasıyla ölçebildiği frekans aralığı ($f_{5\%}$) 0,4-18000 Hz olan), VMT testleriyle aynı (z) eksenindeki titreşimleri okuyabilecek şekilde ve analizi edilecek frekans bandındaki tüm rezonansları görebileceği simetrik bir noktaya (54. noktaya) yapıştırılmıştır. Yüksek frekans iletkenliği için, ivmeölçerlerin traverse bağlantısı esnasında balmumu kullanılmıştır [3]. Senkronize bir şekilde yürütülen VMT ve EMA testlerinde, travers numunesinin tahriki için Dytran 5800-B2 modeli, kuvvet sensörlü modal çekiç kullanılmıştır. Kullanılan tüm bu ekipmanlar Şekil 1’de görüldüğü şekilde, Dewe43a tipi veri toplama cihazına bağlanmış ve 50 kHz örnekleme hızıyla testlere başlanmıştır. Şekil 2’de, EMA ve VMT testleri esnasında, uygulanan modal çekiç darbesiyle elde edilen örnek girdi ve yanıt kayıtları ile bu ham verilerin işlenmesiyle elde edilen FFT grafikleri sunulmaktadır. Spektral sızıntıyı (leakage) düşürmek için birçok uygulamada tercih edilen [17] Hanning tipi pencere (window) kullanılmıştır. Bu grafiklerden tahrik şiddetlerinin ve frekans yoğunluğunun, analiz edilen 0-1500 Hz aralığında yeterli geldiği ve çifte vuruş sorunu bulunmadığı görülebilmektedir. Şekil 2’de sunulan ham ve yarı işlenmiş grafikler, travers numunesinin yalnız bir analiz noktasına uygulanan, yalnız bir adet modal çekiç darbesine aittir ve henüz tahrik düzgünleştirilmesi de yapılmamıştır. Giriş kısmında özetlenen FRF hazırlama süreci ile tahrik düzgünleştirilmesi yapılarak FRF grafikleri elde edilecektir. Bu esnada, literatürde önerildiği üzere [3], her bir analiz noktasına 5’er adet tahrik uygulanarak ve elde edilen 5’er adet FRF grafiği sentezlenerek, her analiz noktası için sentezlenmiş tek bir FRF grafiği elde edilmiştir. Bu şekilde, hesaplanacak modal parametrelerin güvenilirliği artırılmış ve her bir ölçüm esnasında elektriksel veri iletimi kaynaklı gürültülerin etkisi azaltılmıştır [3]. Bu sayede ayrıca ölçüm güvenilirliğini gösteren koherans grafikleri de elde edilmiştir. Şekil 3’te VMT ve EMA testleriyle elde edilen 54’er adet FRF grafiği ile bunlara ait çoklu koherans (multiple coherence [17]) grafikleri sunulmaktadır. Şekil 3’teki grafiklerin üst kısımlarında görülen, mavi (VMT) ve kırmızı (EMA) renkli, çoklu koherans grafikleri (MCOH), girdi ile yanıt arasındaki ilişkiyi, frekans bazında vermektedir. Bu ilişki en ideal şekildeyken, grafik zirve noktasına yakın (1,00) seyretmekte, çeşitli nedenlerle ilişki düşünce koherans değeri de düşmektedir. Koherans grafikleriyle asıl amaçlanan, girdi ile yanıt arasındaki ilişkinin çeşitli nedenlerle (elektriksel gürültü, çift-darbe, yetersiz tahrik, sensör hataları vb.) tutarsız olduğunun erken süreçte tespit edilmesidir [3, 17]. Ancak koherans grafiklerindeki her düşüş, yukarıda örnekleri verilen ölçüm hatalarından kaynaklanmamaktadır. Örneğin, Şekil 3’te 0-75 Hz bandında görülen koherans düşüşleri, ölçüm sistemiyle ilgili bir hatadan değil, mesnetleme yönteminin, tam olarak (uzayda) serbest salınım sağlayamadığını gösteren düşüşlerdir. Bu tarz düşüşler istenilirse de, uygulama zorlukları nedeniyle kabul edilebilir limitlerde tutulmaya çalışılmaktadır. Literatürde belirtildiği üzere, ölçüm yapılan nesnenin analiz edilen rezonans frekansları yeterince uzaksa bu durum önemli bir sorun teşkil etmemektedir [4, 20]. Öte taraftan,

VMT çoklu koherans grafiğinde, EMA'dan daha fazla koherans düşüşleri görülmektedir. Bu farklılığın iki nedeni şu şekilde sayılabilir: İlk neden, VMT metodunda, tek eksenli ve lokal ölçüm alan ivmeölçer yerine, çok eksenli ve global ölçüm alan mikrofon kullanılmasıdır. Bu yüzden, traversin diğer eksenlerinde meydana gelen (yatay, boyuna, burulma vb.) rezonansların, VMT koherans grafiklerini daha fazla etkilediği düşünülmektedir. İkinci neden ise, ortamda sürekli mevcut olan gürültülerin, frekans değerlerine bağlı olarak, çeşitli koherans düşüşlerine neden olmasıdır. Bu etkilerin en düşük seviyeye indirgenebilmesi için Şekil 1'de görülen ses dalgası yönlendirici siperlik kullanılmıştır. Geline nokta, EMA kadar olmasa da, oldukça azaltılan bu koherans düşüşlerinin, modal parametre belirlemelerinde tutarsızlığa sebebiyet verip vermeyeceği ilerleyen bölümde incelenecektir. Diğer bir husus, Şekil 3'teki VMT FRF şiddet değerlerinin, EMA'nın aksine, frekans değerleri yükseldikçe düşmesidir. Bu düşüş, çoklu koherans grafiğinde görülmemekle birlikte, modal parametre belirlemelerinde hatalara sebebiyet verebileceği düşünülmektedir. Bu konu da ilerleyen bölümde incelenecektir.



Şekil 2. Senkronize bir şekilde yürütülen EMA ve VMT testlerine ait örnek ham ve yarı işlenmiş veri grafikleri: a) Kuvvet (N)-zaman (milisaniye) kaydı ile FFT analizi, b) Ses basıncı (Pa)-zaman (milisaniye) kaydı ile FFT analizi, c) İvme (m/s^2)-zaman (milisaniye) kaydı ile FFT analizi



Şekil 3. VMT ve EMA metoduyla elde edilen 54 FRF ve bunlara ait çoklu koherans (MCOH) grafikleri

3. Bulgular ve Tartışma

Modal test ve analizler ile elde edilmesi istenilen birinci parametre, rezonans frekanslarıdır. Literatürde belirtildiği üzere, rezonans frekansları, genel hatlarıyla teste tabi tutulan nesnenin elastisite modüllerinden, kütesinden, geometrisinden ve mesnetleme biçiminden etkilenmektedir [3, 21]. Bu parametrelerin değişmediği eşdeğer test koşullarında, uygulanan modal test metodu değişse de, tespit edilen rezonans frekansları değişmemelidir. EMA ve VMT testleri sonucunda elde edilen rezonans frekanslarının karşılaştırılması Tablo 2’de sunulmuştur. Bu tablo incelendiğinde, VMT ve EMA sonuçlarının, kendi içlerinde ve birbirleri arasında oldukça düşük (en fazla %0,17) farklılığa sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sapma yüzdesi, literatürdeki [14] önceki VMT-EMA karşılaştırması çalışmasından (%1) da çok daha düşüktür. Ancak dikkat edilmesi gereken bir husus, EMA-VMT farklılığının 1100 Hz’e kadar çok daha düşük seyrederken (en fazla %0,04), bu frekans değerinden sonra giderek artmasıdır.

Tablo 2. EMA ve VMT metotlarıyla belirlenen rezonans frekanslarının karşılaştırılması

Eksen-Rezonans No	EMA Ortalama Frekans (Hz)	EMA Sapma Yüzdesi	VMT Ortalama Frekans (Hz)	VMT Sapma Yüzdesi	EMA-VMT Farkı
Z-1	84,99	0,09%	84,96	0,32%	-0,04%
Z-2	250,22	0,05%	250,15	0,01%	-0,03%
Z-3	488,33	0,02%	488,43	0,05%	0,02%
Z-4	769,19	0,04%	768,92	0,06%	-0,04%
Z-5	1087,30	0,05%	1087,72	0,01%	0,04%
Z-6	1430,32	0,04%	1432,70	0,26%	0,17%

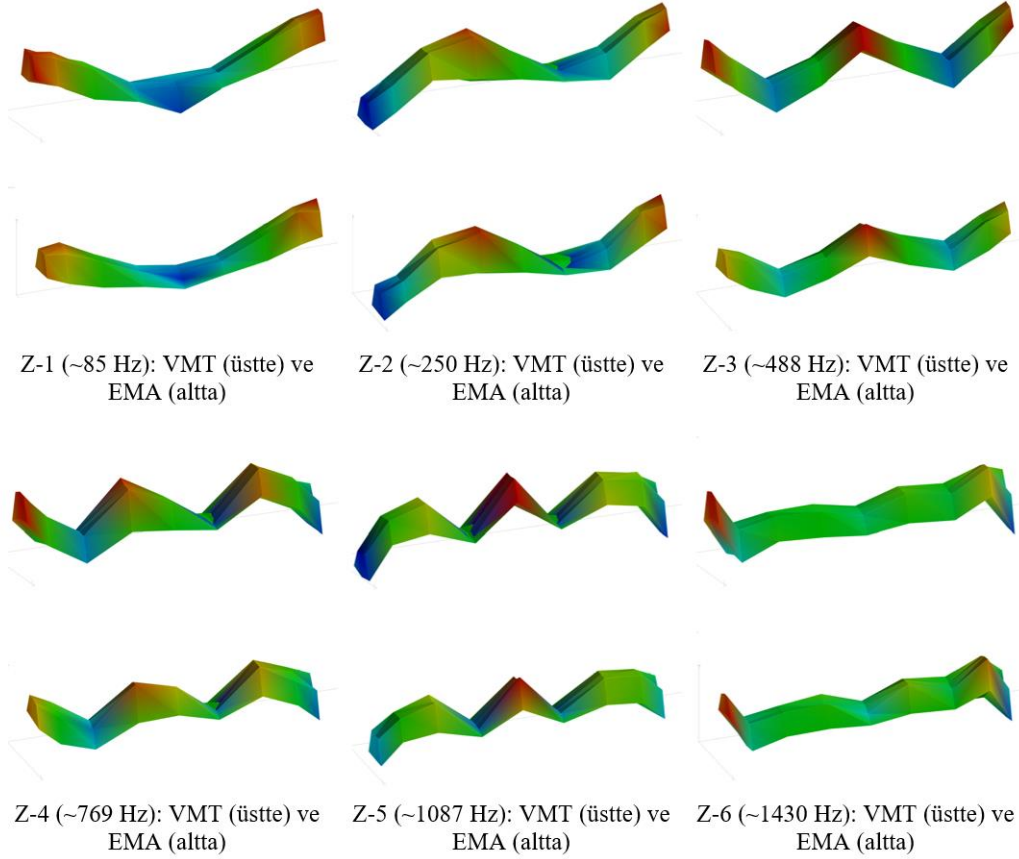
Modal test ve analizler sonucunda elde edilmesi istenilen ikinci parametre modal sönümlenme oranlarıdır. Modal teste tabi tutulan nesnenin FRF grafiğinin, rezonans frekanslarında, zirve çıkma ve inme hızı (yarım-güç metodu için) veya FRF’in kalite faktörünün faz (derece) değerleri ile ilişkisi (modal daire metodu için), yani teste tabi tutulan nesnenin o frekanstaki modal sönümlenme performansı, en önemli modal parametrelerden biridir [3]. Teste tabi tutulan nesnenin sönümlenme davranışında, moleküler bağ kuvvetlerinin, yoğunluğunun, içsel sürtünme ve aderans sağlayıcılarının, elastisite modülünün, hava boşluğu/su/nem içeriğinin ve çatlak muhtevasının

etkileri söz konusudur [3, 21]. Dolayısıyla bu parametrelerin değişmediği eşdeğer test koşullarında, uygulanan modal test metodu değişse de, tespit edilen modal sönümlenme oranları değişmemelidir. Ayrıca, sunulan bilgilerden anlaşıldığı üzere, rezonans frekansının ve sönümlenme oranının birbirleriyle bazı ortak etkileri ve sonuçları olduğu gibi, ayrıştırdıkları birçok parametre de söz konusudur. Bu yüzden, birinin artması, azalması veya sabit kalması, her zaman, diğeri ile ilişkilendirilebilir doğru veya zıt bir davranış sergileyeceği anlamına gelmemektedir. Dolayısıyla, sönümlenme oranlarının da doğru bir şekilde tespit edilebilirliği, modal analiz yöntemleri için önemli bir üstünlüktür. Bu çalışmada yapılan EMA ve VMT testleri sonucunda, Tablo 2'deki rezonanslara ait olmak üzere, "modal-daire" yöntemiyle [3] hesaplanan modal sönümlenme oranı değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere, ilk 3 rezonans frekansında VMT metodu kendi içinde daha tutarlı sonuçlar sağlamakta, VMT ile EMA sonuçları birbiriyle en fazla %1,17'lik farklılık göstermektedir. Ancak dördüncü ve beşinci rezonans (750-1100 Hz) gerek EMA, gerekse VMT sonuçlarının kendi içlerindeki tutarsızlıklarının arttığı ve aralarındaki fark yüzdesinin yaklaşık %21'lere ulaştığı görülmektedir. Altıncı rezonans itibariyle ise VMT sonuçları tamamen tutarsız hale gelmiştir. Sonuç olarak, hazırlanan VMT test düzenine, 75-750 Hz frekans bandında, modal sönümlenme oranlarını tespit etme bakımından, EMA testi kadar, hatta daha hassas sonuçlar sağladığı söylenebilir. Ancak frekans değerleri arttıkça hassasiyeti düşmekte ve 1100 Hz dolaylarından sonra, bu parametre tespiti bakımından, tamamen kullanılamaz hâle gelmektedir. Rezonans frekansı tespiti bakımından düşük yüzdesel değerlere sahip olan bu sapma artışları, sönümlenme oranı tespitlerinde çok daha yüksek hâle gelmektedir. Bu durum, literatürdeki önceki VMT-EMA karşılaştırma çalışmasında [14] görülen %1'e varan rezonans frekansı farklılıkları ve %700'e varan sönümlenme oranı farklılıklarının da ana nedeni olabilir. Ayrıca, Tablo 3'te geçen, ilk üç rezonansa ait "güvenilir" sönümlenme oranları incelendiğinde, kimi rezonans VMT sonuçlarının, kimi rezonans ise EMA sonuçlarının daha yüksek çıktığı, dolayısıyla literatürdeki önceki çalışmada [14] değinilen "hava moleküllerinin VMT metoduna ait sönümlenme oranlarını artırması" çıkarımının, en azından, bu çalışma için hazırlanan VMT test düzeninde söz konusu olmadığı görülmüştür.

Tablo 3. EMA ve VMT metotlarıyla belirlenen sönümlenme oranlarının karşılaştırılması

Eksen-Rezonans No	EMA Ortalama Sönümlenme (Ç)	EMA Sapma Yüzdesi	VMT Ortalama Sönümlenme (Ç)	VMT Sapma Yüzdesi	EMA-VMT Farkı
Z-1	0,008151	3,62%	0,008098	1,42%	-0,65%
Z-2	0,007883	3,76%	0,007933	1,15%	0,63%
Z-3	0,005985	1,47%	0,005915	1,98%	-1,17%
Z-4	0,006651	10,22%	0,005257	8,62%	-20,96%
Z-5	0,005623	2,36%	0,005154	4,70%	-8,34%
Z-6	0,006955	3,49%	0,011720	100,07%	68,52%

Modal test ve analizler sonucunda elde edilmesi istenilen üçüncü parametre, mod şekilleridir (modal salınım şablonları, mode shapes). Mod şekillerini etkileyen unsurlar genellikle teste tabi tutulan nesnenin geometrisiyle ve mesnetleme biçimi ile ilgili olup [3, 4, 20], bu parametrelerin değişmediği test koşullarında, uygulanan modal test metodu değişse de tespit edilen mod şekilleri birbiriyle örtüşmelidir. Bu şablonlar, uygun sonlu eleman analizleriyle kolay ve hassas bir şekilde belirlenebilse de sonlu eleman modellerinin yeterli doğrulukta hazırlanması her zaman mümkün olmamakta ve/veya mesnet rijitliği, yoğunluk, Poisson oranı, rezonans frekansları ve sönümlenme oranları da dahil birçok modelleme parametresine ihtiyaç duyulmaktadır [20]. Bu yüzden, mod şekillerinin de doğru bir şekilde tespit edilebilirliği, modal analiz yöntemleri için önemli bir üstünlüktür. Şekil 4'te bu çalışma kapsamında hazırlanan VMT ve EMA test düzenleri ile elde edilen ve Tablo 2'de geçen rezonanslara ait mod şekilleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görüldüğü üzere, mod şekillerinin belirlenmesinde, kullanılan VMT test düzeni, tüm frekans değerlerinde, EMA ile oldukça benzer sonuçlar sağlamaktadır.



Şekil 4. VMT (üstte) ve EMA (altta) metotlarıyla elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma içerisinde sunulan detaylı literatür taraması ve yürütülen karşılaştırmalı analizler ile ulaşılan sonuçlar, maddeler halinde, aşağıda sunulmuştur:

- Günümüzde dünya genelinde en yaygın uygulanan ve kabul gören deneysel modal analiz metodu, titreşim esaslı modal analizlerdir (EMA). Ancak bu metot, “temaslı” ölçüm gerektirmektedir. Ayrıca yüksek frekansların (>1 kHz) doğru ve tutarlı bir şekilde okunabilmesi için, ivmeölçerlerin test elemanına bağlanması esnasında özel dikkat gerekmektedir, ihtiyaç duyulan yöntemler, özellikle saha çalışmalarına elverişli olmayabilmektedir.
- EMA metodunda kullanılan ivmeölçerler “lokal” ölçüm almaktadır ve test elemanlarının üzerindeki bir noktaya yapıştırılan ivmeölçerlerin, bazı rezonansları görememesi, yani bu rezonanslara ait modal düğüm noktalarına denk gelmesi riski vardır.
- Sayılan bu ve benzeri faktörler nedeniyle EMA metoduyla saha analizleri yapılması çeşitli dezavantajlar içermektedir. Bu dezavantajlar, birçok test elemanı için geçerli olup, demiryolu taşıt bileşenlerinin veya yapı elemanlarının analizleri de buna örnek teşkil etmektedir.
- Bu çalışmada, literatürde ender incelenmiş bir metot olan, vibro-akustik modal analizlerin (VMT), bu bağlamda, EMA için uygun bir alternatif olup olmayacağı araştırılmıştır. Literatürdeki önceki çalışmalarda, bu alternatif metodun, rezonans frekansı tespitlerinde, EMA ile benzer, yüksek doğruluk ve tutarlılıkta sonuçlar sağladığı, ancak sönümlenme oranlarında %700'e varan hatalara sebebiyet verebildiği belirtilmiştir.
- Bu çalışmada kapsamında, yeni bir VMT test düzeneği hazırlanmış ve aynı demiryolu traversi üzerinde senkronize bir şekilde VMT ve EMA testleri yürütülmüştür. Analizler sonucunda, VMT metoduyla, rezonans frekanslarının, sönümlenme oranlarının ve mod şekillerinin, uygun

bir frekans bandında, EMA testleri kadar hassas ve tutarlı bir şekilde belirlenebildiği tespit edilmiştir.

Hazırlanan VMT test düzeneği ile gelecekte saha ölçümleri yürütülmesi planlanmaktadır. Öte taraftan bu metodun, çeşitli test düzeneği değişiklikleri denenerek (örneğin farklı mikrofon türleri ve ses dalgası yönlendirici siperlikler ile) ve farklı demiryolu veya demiryolu taşıtı elemanlarıyla veya uygun görülebilecek başka herhangi bir test elemanı ile denenmesi de mümkün olup, çalışmaların bu yönde sürdürülmesi önerilir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Daire Başkanlığı (ERÜ/BAP) tarafından desteklenmiş (Proje No: FCD-2021-11483) olup, araştırmacılar, destekleri için ERÜ/BAP yetkililerine teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] H. E. D. Bree, "The Microflow Ebook, Chapter-2: Sound & Vibration," 2009. [Online]. Available: https://www.microflow.com/assets/uploads/Publications/ebook_2_sound_and_vibration.pdf [Accessed: 02.03.2023]
- [2] F. Çeçen, B. Aktaş, "B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının Deneysel İncelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 15, pp. 158-169, Ocak 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.990316>
- [3] F. Çeçen, A. Özbayrak, B. Aktaş, "Experimental modal analysis of fly ash-based geopolymer concrete specimens via modal circles, mode indication functions, and mode shape animations," *Cement and Concrete Composites*, vol. 137, ID: 104951, Mart 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104951>
- [4] B. Aktaş, F. Çeçen, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, "Comparison of prestressed concrete railway sleepers and new LCR concrete sleepers with experimental modal analysis," *Engineering Failure Analysis*, vol. 131, ID: 105821, Ocak 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105821>
- [5] Siemens, "What is the acoustic quantity called Q?," 2019, [Online]. Available: <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-the-acoustic-quantity-called-q> [Accessed: 03.03.2023]
- [6] G. M. S. Gidrao, P. A. Krahl, R. Carrazedo, "Characterization of concrete internal damping," in *3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado São Carlos*, São Paulo, Brasil, 2018
- [7] W. L. Guesser, L. P. R. Martins, "Stiffness and vibration damping capacity of high strength cast irons," in *25th SAE BRASIL International Congress and Display*, Brazil, 2016
- [8] F. Çeçen, B. Aktaş, "Yeni LCR Tipi Traverslerin Demiryolu Hat Rijitliğine Etkisinin Araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 16, pp. 36-50, Temmuz 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1105999>
- [9] F. Çeçen, B. Aktaş, "Yeni Yeşil-Travers Modelinin B70 Tipi Öngerilmeli Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 17, pp. 1-13, Ocak 2023, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1107683>
- [10] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, "Behaviour of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers under repeated impact loads," *Construction and Building Materials*, vol. 319, ID: 126151, Şubat 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126151>
- [11] *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*, ASTM C215-19, USA, 30.01.2020
- [12] K. Matsuoka, T. Watanabe, "Application of a Frequency-Based Detection Method for Evaluating Damaged Concrete Sleepers," *Advances in Structural Health Monitoring*, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82711>
- [13] A. Bekele, N. Ryden, A. Gurmarsson, B. Birgisson, "Automated Non-contact Resonance Excitation Method to Assess Low Temperature Dynamic Modulus of Asphalt Concrete," *Journal of Nondestructive Evaluation*, pp. 38-43, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0584-7>

- [14] W. D. Zhu, J. M. Liu, Y. F. Xu, H. Q. Ying, "A modal test method using sound pressure transducers based on vibro-acoustic reciprocity," *Journal of Sound and Vibration*, Vol: 333, pp. 2728-2742, Haziran 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.004>
- [15] G. P. Guimaraes, R. Pirk, C. D. Souto, L. C. S. Goes, "Acoustic Modal Analysis of Cylindrical-Type Cavities," in *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011*, Leuven, Belgium, Temmuz 2011, pp. 3160-3167
- [16] G. Accardo, B. Peeters, F. Bianciardi, K. Janssens, "Experimental Acoustic Modal Analysis of an Automotive Cabin," *Sound & Vibration*, Vo. 49, pp. 10-18, Mayıs 2015, doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-15236-3_4
- [17] S. L. Gjelstrup, "What is Modal Analysis: The Ultimate Guide," 2021. [Online]. Available: <https://dewesoft.com/daq/what-is-modal-analysis#sdf-fitting> [Accessed: 03.03.2023]
- [18] "Condenser (kapasitif) mikrofon nedir?," 2022. [Online]. Available: <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektronik/condenser-mikrofon-nedir-127452/> [Accessed: 03.03.2023]
- [19] G. M. Simith, "Sound and Noise Measurement with Microphone Transducers," 2022. [Online]. Available: <https://dewesoft.com/daq/sound-measurement-with-microphone-sensors> [Accessed: 03.03.2023]
- [20] F. Çeçen, B. Aktaş, "Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers," *Engineering Failure Analysis*, vol. 127, ID: 105471, Eylül 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105471>
- [21] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. Ş. Öztürk, M. B. Navdar, "Comparative modal analysis of B70 and LCR-6 type railway sleepers after repeated impact loads," *Construction and Building Materials*, vol. 336, ID: 127563, Haziran 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127563>

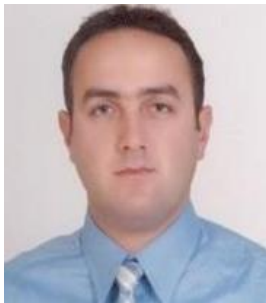
Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD'nin çeşitli birimlerinde 16 yıldan fazla hizmet veren yazar, doktora eğitimini Erciyes Üniversitesi Ulaştırma Bilim Dalında tamamlamıştır. İlgilinin, milli demiryolu traversleri geliştirilmesi amaçlı ar-ge ve patent çalışmaları devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr



Bekir AKTAŞ

Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim dalında öğretim üyesidir. Karayolu ve Demiryolu mühendisliği alanında çalışmaları devam etmekte olup yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr



Ahmet ÖZBAYRAK

1979 tarihinde doğmuştur. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Erciyes Üniversitesinde tamamlamıştır. Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesidir Yapı mekaniği konusunda, betonarme yapılar, çelik yapılar, metalik pasif çelik sönümleyiciler ve geopolimer beton konularında araştırma ve projeler yürütmektedir.

E-Posta: ozbayrak@erciyes.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ferhat ÇEÇEN: Kaynaklar, Görselleştirme, Metodoloji, Yazılım, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Bekir AKTAŞ: Metodoloji, Yazılım, İnceleme, Kontrol, Doğrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Ahmet ÖZBAYRAK: Kavramsallaştırma, Yazılım, İnceleme, Kontrol, Doğrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Alimünotermite Kaynağıyla Birleştirilmiş, Mantarı Sertleştirilmiş “R350HT” Rayın Boyuna Sertlik Taramasının İncelenmesi

Adem ARI¹, Bilge DEMİR², Atila KESKİN³

¹TCDD Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürlüğü, Araç Bakım Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye
²Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye
³TCDD Datem İşletme Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

*demaria06@hotmail.com

(Alınış/Received: 11.05.2023, Kabul/Accepted: 26.05.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Günümüzde ray ömrünü uzatan sıcak hadde sonrası kontrollü ve hızlı soğutmayla ray mantar sertleşmesi sağlanarak önemli ekonomik kazançlar elde edilmektedir. Ray kaynak metodlarından Aluminotermite kaynağı saha birleştirme yöntemi olarak günümüzde de önemini devam ettirmektedir. Kaliteli bir termite kaynağı yapmak için termite alaşımının sıkı denetimi ve ateşlemeden sıvı çeliğin hazneye dolmasına kadar geçen kademelerin kontrollü bir şekilde yapılması gerekir. Bütün bu ön koşullar tavsiye edildiği şekilde yerine getirilmiş olsa bile ve hatta mikro hatalar da olmasa, yine de kaynağın mekanik özellikleri rayın kendi özelliklerinden düşük kalır. Ray termite kaynağı, basitliği, taşınabilirliği ve ekonomisi nedeniyle demiryolu endüstrisi için değerli bir kaynak teknolojisidir. Bununla birlikte özellikle termal işlem ile üretilen R350HT mantarı sertleştirilmiş rayların birleştirmesinde yüksek ısı, kaynağın ulaştığı maksimum sıcaklık derecesine, bu sıcaklıkta kalma süresine ve soğuma hızına bağlı olarak kritik dönüşümlere sebep olabilmekte ve bunlar ray ömür ve performansını oldukça etkilemektedir. Bundan dolayı bu çalışmada R350HT mantarı sertleştirilmiş rayın Aluminotermite kaynaklı birleştirmeden kaynaklanan sertlik yapısının kaynak parametrelerine bağlı olarak değişimi ve gelişimi incelenmiş ayrıca ilgili uluslararası standartlara uygunluğu ve avantajları araştırılmıştır. Bu makale, esas olarak ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) olmak üzere, kaynaklı ray bağlantılarının sertlik değişimini etkileyen faktörler açısından incelemeyi amaçlamıştır. Deneysel çalışmalar da R350HT mantarı sertleştirilmiş ray numuneleri 120 cm uzunluğunda kesilerek hazırlanmış ve bu numunelere sow-5 yöntemi aluminotermite kaynağı uygulanmıştır. Esas kaynak bölgesiyle ITAB bölgesindeki boyuna sertlik taraması TS EN 14730-1+A1 standardı ile de karşılaştırılarak kritik yapılmıştır. SkV Elite L25 ve Pandrol firmasının PLA yöntemi termite kaynaklarının eğme ve yorulma deneyi sonuçları, standartları karşılamadığı için çalışmalara sow5 yöntemiyle kaynaklanmış ray numuneleriyle devam edilmiştir [7] Deney sonuçlarında sow5 yöntemi termite kaynağının istenilen standartlara en uygun yöntem olduğu bulunmuştur. Deneysel sonuçlar bu çalışmada kullanılan parametrelerle üretilen kaynaklı birleştirmelerin bu standartlara uygunluğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: R350HT, Aluminotermite kaynağı, Mantarı sertleştirilmiş ray, Mikroyapı ve mekanik özellikler

Investigation of Longitudinal Hardness Scan of Aluminotermite Welded Head-Hardened “R350HT” Rail

Abstract: Today, significant economic gains are obtained by providing rail head-hardening with controlled and rapid cooling after hot rolling, which prolongs the rail life. Aluminotermite welding, one of the rail welding methods, continues its importance as a field joining method today. In order to make a quality thermite welding, strict control of thermite alloy and the steps from ignition to filling the liquid steel into the chamber must be carried out in a controlled manner. Even if all these prerequisites are fulfilled as recommended, and even without micro-defects, the mechanical properties of the weld still remain inferior to those of the rail itself. Rail thermite welding is a valuable welding technology for the rail industry due to its simplicity, portability and economy. However, especially in the joining of R350HT head-hardened rails produced by thermal process, high heat can cause critical transformations depending on the maximum temperature reached by the weld, the residence time at this temperature and the cooling

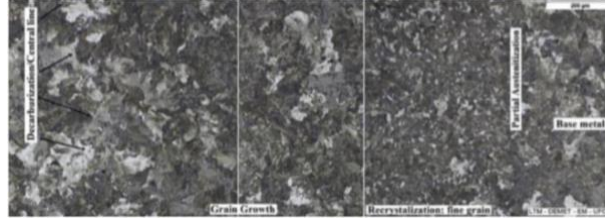
Atıf için/Cite as: A. Arı, B. Demir, A. Keskin, “Alimünotermite kaynağıyla birleştirilmiş, mantarı sertleştirilmiş “R350HT” rayın boyuna sertlik taramasının incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 50-58, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1295654

rate, and these affect the rail life and performance. Therefore, in this study, the change and development of the hardness structure of the R350HT head-hardened rail, resulting from the aluminothermite welded joint, depending on the welding parameters, was examined, and its compliance and advantages with the relevant international standards were investigated. This article aimed to examine the factors affecting the hardness variation of welded rail joints, mainly the heat affected zone (ITAB). In experimental studies, R350HT head-hardened rail samples were prepared by cutting 120 cm in length and sow-5 method aluminothermite welding was applied to these samples. The longitudinal hardness scanning of the main weld area and the ITAB area has been made critical by comparing it with the TS EN 14730-1+A1 standard. Since the bending and fatigue test results of PLA method thermite welds of SkV Elite L25 and Pandrol company did not meet the standards, the studies were continued with rail samples welded with the sow5 method [7]. In the test results, it was found that thermite welding with the sow5 method is the most suitable method for the desired standards. Experimental results showed that the welded joints produced with the parameters used in this study comply with these standards.

Keywords: R350HT, Aluminotermit welding, Head-hardened rail, Microstructure and mechanical properties

1. Giriş

Normalde aliymanda ray ömrü 20-25 yıl iken dar çaplı kurbalarda ($R \leq 300m$) bu süre 2-3 yıla kadar inmektedir. Kurbların, tanjanttan başlayarak developmanda, dever verilen dış raylarında ve sürekartman verilen kısımlarında mantarı sertleştirilmiş rayların kullanılması UIC tarafından da tavsiye edilmektedir. Demiryollarının bu kısımlarında, mantarı sertleştirilmiş ray kullanılarak ray ömrü uzatılmış, bakım ve onarım masraflarını azaltmak mümkün olmuştur. Mantarı sertleştirilmiş rayların tamamı yurt dışından temin edilirken günümüzde artık ülkemizde üretimi yapılmaktadır [1,2]. Sertleştirme de ki amaç; rayın servis ömrü süresince aşınmayı azaltmak ve özellikle dar ve orta çaplı kurbalarda rayların tekerlek takımına teması sonucu görülen yuvarlanma temas yorulmasına (RCF) karşı direncini artırmayı amaçlamaktır. Mantar sertleştirilmesi, ray üretim hadde çıkışında hızlı soğutma ile %100 ince perlitik yapının, basınçlı sprey su püskürtme yöntemiyle elde edilmesidir. Bu ince perlitik yapı hadde sonrası 280 Brinell yerine 350 Brinelle kadar yüksek sertlik sağlarken martenzit'de içermeyebilir. Bu şekilde gerilmelerden veya ağ şeklinde sementitten arındırılmıştır. Esasen, pratikte ince perlitik yapı oluşumu, perlitik dönüşüm sabit sıcaklığını elde etmek için; önce hava+su sprey püskürtme yöntemiyle soğutulurak P_s sıcaklığına, ardından da daha küçük nozullarla sprey püskürtme yöntemi kullanılarak oluşturulan yüksek soğuma hızlarına ve son olarak hava ile elde edilen yavaş soğuma sıralamasıyla elde edilmektedir. Bu işlem ayrıca çeliğin sertliği ve sünekliği (güvenlik) arasındaki dengeyi korumak için, perlitik lamellerin mikroyapı içindeki demir karbür fazının aralıklarının kontrol edilmesi ve hem ferritin hem de fazla sementitin süreklilik gösteren network ağlarının oluşumunu en aza indirmek/yok etmek içinde çok önemlidir [3-4]. Diğer taraftan, muhakkak ki rayların demiryollarına döşenmesi ve birleştirilmesi olağan bir üretim şeklidir. Birleştirerek sahada döşeme işlemi Aluminotermit olarak ifade edilen kaynak yöntemi ile yapılmaktadır. Bu noktada önemli olan konu; Kaynak esnasında oluşan yüksek ısının kaçınılmaz olarak etkileyerek değiştirdiği ray çeliklerinin, perlitik mikro yapısının ve mekanik özelliklerinin kontrol edilme parametrelerinin anlaşılmasının önemidir. Bu noktada metalürjik yapı açısından birçok değerlendirme yapılabilir ve birçok faktörden bahsedilebilir. Örneğin: Isıdan etkilenen bölgede (ITAB) özellikle enine kesitte sert bir nokta bulunabilir ve bu da yorulma kırılmasına yol açar. Azaltılmış sertliğe ve dayanıklılığa sahip kısmi sementit "küreselleşmesi" tarafından oluşturulan daha yumuşak bir "bölge", bakım için önemli bir sorun olan plastik deformasyon noktası olabilir vb. Şekil 1'de kaynak malzemesi ITAB bölgesi ve ana ray malzemesi arasındaki mikro yapı farklılıkları görülmektedir.



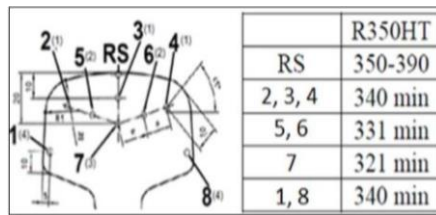
Şekil 1. Ray mantarının enine kesitinde, kaynaklı bağlantının yakınında mikro yapı değişiklikleri [5]

Bu varyasyonlar, hizmet koşullarında kaynak hatası riskini artırmada önemli roller oynayabilir. Bütün bunlar için de metallerin özellikleri kimyasal bileşim, mekanik işlemler ve ısıl işlemlerin bir kombinasyonu olarak ifade edilmektedir. Bu üçlemede etkin ve değişerek etkinliğini gösteren faktörlerin en önemlilerinden bir tanesi kaynak sırasında oluşan tavlanmanın sonucu olarak yapı dolayısıyla morfoloji ve özellikleri üzerinde etkin olan önceki östenit tane boyutu (PAG) ve sonrasındaki soğuma rejimidir ki kaynak merkezi ve merkezden uzaklaştıkça ciddi bir sıcaklık gradyanı ve buna bağlı soğuma ortaya çıkar [6].



Şekil 2. Hazırlanan R350HT ray numuneleri [7]

Termit kaynağı (TW), şekil 2’de görüldüğü gibi sürekli kaynaklı (CWR) rayları birleştirmek için kullanılan ana kaynak yöntemlerinden biridir. Bununla birlikte, ana raya göre mikro yapı, mekanik özellikler ve artık gerilim seviyelerindeki farklılıklar nedeniyle kaynaklar hala yol yapısında bir süreksizliği temsil etmektedir. Termit kaynağı temelde bir döküm işlemi olduğundan, kaynağın mikro yapısı dökme metale benzer. İğne taneli Perlitik yapıya sahiptir. Bu, dökümde yapıldığı gibi ısıl işlemlerle iyileştirilebilir. Bu nedenle, tane boyutunun inceltilmesi, tokluk, süneklik ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerin geliştirebilmesi için kaynak numuneleri üzerinde kaynak sonrası normalleştirme yapılması gerekmektedir. Normalleştirme, 825 °C’lik bir sıcaklıkta 50 dakika boyunca östenit aralığına kadar yapılır ve ardından numuneler durgun havada soğumaya bırakılmalıdır [8]. Bu çalışmanın amacı termit kaynağı esnasında, perlitik yapıdaki mantarı sertleştirilmiş rayın, mikro yapısal özelliklerinin kritik dönüşümlere sebep olan termal etkinin, makro ve mikro düzeyde ne derece etkili olduğunu araştırıp incelemek şeklinde olmuştur. Bu makale, esas olarak ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) olmak üzere, kaynaklı ray bağlantılarını sertlik değişimi açısından incelemeyi amaçlamaktadır. EN13674 standardına göre ray kesitinde sertlik ölçülecek noktalar ve sağlanması gereken değerler şekil 3’te görülmektedir.



Şekil 3. EN13674’e göre sertlik ölçüm bölgeleri ve ‘R350HT’ için sınır değerler (HV) [9]

Ray boyunca sertlikte meydana gelecek bir dalgalanma, gerilme yığılması ya da kontrolsüz bir iç gerilme gibi problemlere yol açarak mikro çatlakların oluşumunu hızlandıracaktır. Bu durum da özellikle raylarda çok karşımıza çıkan, “rolling contact fatigue” olarak ifade edilen, ray ve teker arasındaki aşınma-yorulma kompleks dinamiğini olumsuz etkileyecektir [10].

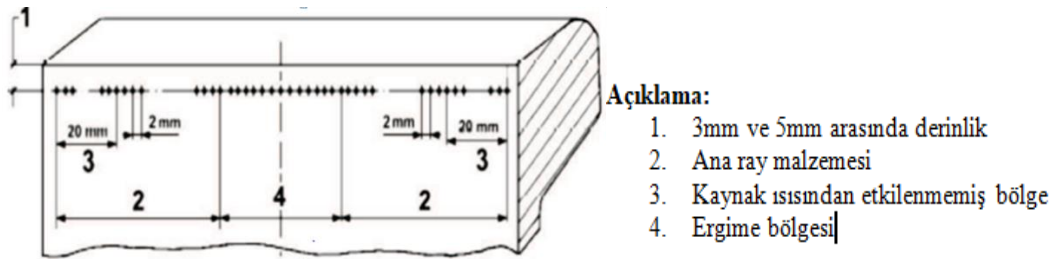
2. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada elde edilen kaynaklı bağlantıların ana malzeme kaynak metali, ana malzeme hattında TS EN 6507-1, TS EN 14730-1 Standartlarına göre, HV30 ile ölçülen örnek numunelerin sertlik değerleri boyuna sertlik deney sonuçları şekil 5 ve 6’da çizgi grafik haline dönüştürülmek suretiyle görselleştirilmiştir. Sırasıyla 21 ve 35 Nolu numunelerde sertlik taraması yapılmış ve her bir numunede ortalama 100 noktanın sertlik derecesine bakılmıştır. En düşük sertlik değeri “21” nolu numunede 250 hv ile yeniden kristalleşme bölgesinde, azami sertlik ise 372 hv ile yine “21” Nolu numunede kaba taneli bölgenin başlangıcında görülmüştür. Kırmızıçizgi siyah ana metal çizgisinden ‘x’ değeri kadar aşağıdan oluşturulmuştur. X değerleri R350HT için 25 tir [11].

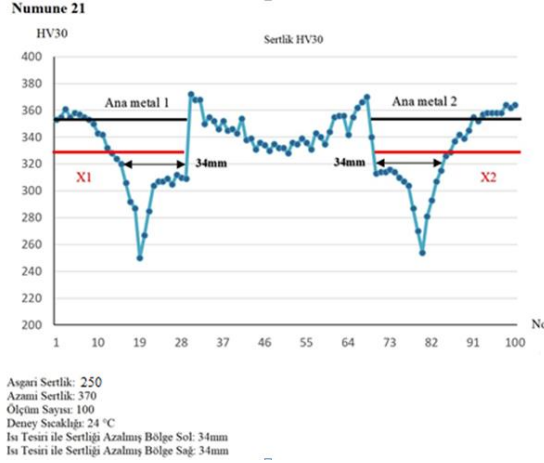
Tablo 1. R350ht rayın kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri [12]

Steel grade		% by mass									10 ⁴ (ppm) by mass max.		Tensile strength R _m min Mpa	Elongation A min %	Hardness of the rail running surface . centre line ^c HBW
Steel name	sample	C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Al max	V max	N max	O ⁴	H ²			
R350HT	Liquid	0,72 to 0,80	0,15 to 0,58	0,70 to 1,20	0,020	0,025	≤0,15	0,004	0,030	0,009	20	2,5			
	Solid	0,70 to 0,82	0,13 to 0,60	0,65 to 1,25	0,025	0,030	≤0,15	0,004	0,030	0,010	20	2,5	1175	9	350 to 390

Boyuna sertlik ölçümü, ısının tesiri ile sertliği azalmış bölgenin sertlik dağılımı TS EN ISO 6507-1’e uygun şekilde vickers yöntemi kullanılarak 30 kg yük altında belirlenmiştir. Sertlik ölçüm izleri şekil 4’te görüldüğü gibi rayın yuvarlanma yüzeyinin boylam ekseninin 3-5 mm altında bir çizgi üzerinde yapılmıştır. Sertlik ölçüm hattı, ısıdan etkilenmemiş ana ray malzemesi sınırını 20 mm geçinceye kadar devam etmiştir. Ölçümler 2 mm aralıklarla yapılmıştır.

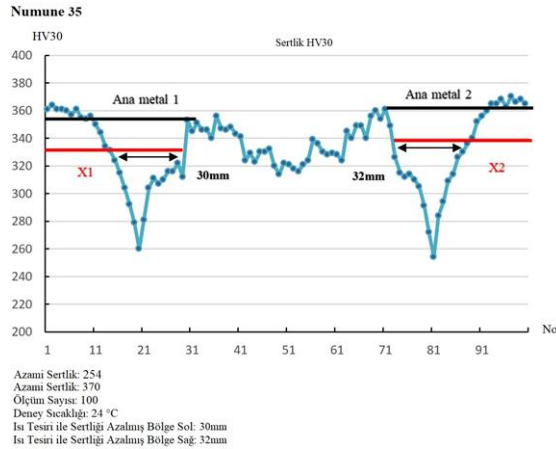


Şekil 4. Boyuna sertlik ölçümü [12]



Şekil 5. Sow-5 yöntemi “21” nolu kaynak bölgesinin nokta grafiği [7]

Termit kaynaklı ray numunesinden ölçülen bütün sertlik değerleri ile şekil 5’te gösterilen sertlik profili oluşturulmuştur. Numunede ısıdan etkilenen bölge sağ ve sol tarafta 34mm olarak ölçülmüştür. Şekilde ki siyah ana metal çizgisi ana rayın ortalama sertlik değeri ile çizilmiştir. Kırmızıçizgi, siyah ana metal çizgisinden 25hv çıkartılarak çizilmiştir. Kırmızıçizginin grafiği kestiği noktalar ITAB bölgesinin genişliğini vermektedir. Isı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) en düşük sertlikler yeniden kristalleşme bölgesi ile kısmi dönüşmüş bölge sınırlarında, sağ tarafta 250hv, sol tarafta ise 254hv’ye kadar düşmüştür. ITAB dan ana metale geçişlerdeki temperlenmiş bölgelerde ise, maruz kalınan ısının etkisiyle 550 °C üzerine çıkmayan A₁ bölgesinin altında kalan kısımlarda yumuşama görülmemiştir [13].



Şekil 6. Sow-5 yöntemi “35” nolu kaynak bölgesinin grafiği [7]

Şekil 6’da görülen 35 nolu numunede ITAB bölgesi sağ tarafta 32 mm, sol tarafta 30 mm olarak ölçülmüştür. 21 nolu parçaya göre ısı tesiri altında kalan bölgenin genişliği 2 mm daha küçüktür. Ölçüm farklılıklarının kalıp yerleştirmedeki eksen kaçıklığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Termit kaynağının soğuma hızı kontrollü yapılamadığı için kritik dönüşümlere sebep olmakta ve ITAB’de sertliği azalmış bölge süre aşımı dikkate alınmadığında makul seviyelerden geniş olmaktadır. Bu istenmeyen bir durumdur. ITAB bölgesinin genişliğinin minimum olması istenmektedir. ITAB bölgesi sertlik değerleri sağ tarafta yeniden kristalleşme bölgesinde 254hv, sol tarafta ise 260hv dir. Ana metalde ise 550 °C’nin altında kalan kısımlarda yumuşama görülmemiştir.

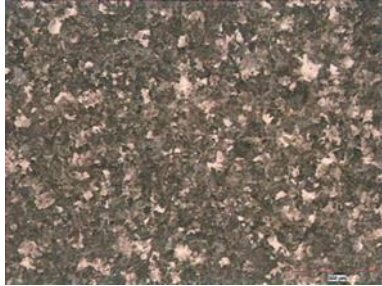
Sertlik profili grafiği üzerinde ortalama sertlik değerine denk gelen bir çizgi çizilir. (çizgi 1) Ana metalden R350HT rayları için 25hv aşağıya bir çizgi çizilerek, X_1 ve X_2 çizgileri elde edilmiştir. “21” nolu parça için ITAB’da sertliği azalan bölge sol ve sağ tarafta 34 mm dir. “35” nolu numunede ise ısı tesiri altında sertliği azalmış bölge sol tarafta 30 mm sağ taraftaysa 32 mm olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesinin genişliğini minimum düzeyde tutmak için kaynak sonrası bekleme süresi ve ön ısıtma dereceleri oldukça etkili olmaktadır.



a) 100X Ray mantarı-Kaynaklı Bölge-Perlitik İç yapı-Tane sınırlarında ferritler



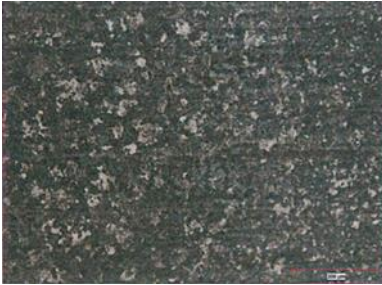
b) 100x Yeniden kristalleşme bölgesi



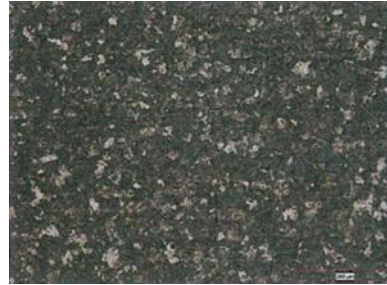
c) 100X Ana metal- perlitik içyapı



d) 100X Ray Tabanı-Kaynaklı Bölge-Ana Yapı-Perlitik Tane Sınırlarında Ferritler



e) 100X Yeniden kristalleşme bölgesi



f) 100X Ana metal-Perlitik iç yapı ve tane büyümesi-perlitik yapı

Şekil 7. 35 nolu numuneye ait mikroyapı görüntüleri [7]

3. Deneysel Çalışma Sonuçları ve Tartışma

Hızlı tren yollarında kullanılan R350HT mantarı sertleştirilmiş rayın alüminotermit kaynağıyla ilgili çalışmalar ülkemizde yeterince yapılmadığı için literatüre katkısı açısından çalışmamız ilk ve özgündür. 21 Nolu numunede ısı tesiri altında kalan bölgede ki sertlik değerlerinin ergimiş bölge ve ray ana malzemesindeki sertlik değerlerine göre daha düşük olduğu grafikten de anlaşılmaktadır. Bunun nedeninin ITAB bölgesine tesir eden ısının ergime ısısından düşük, dönüşümlere yol açmayacak ısıdan (550°C) yüksek olmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. 35 nolu numunede ise kaynak sonrası kaynak metalinde soğuma hızının kontrol edilememesi, karışık bir yapı elde edilmesine yol açmış ve bunun sonucunda sertlik değerleri farklılıkları düzensiz olarak ortaya çıkmıştır. Yine burada da ısı tesiri altında kalan bölgede ki sertlik değerlerinin ergimiş bölge ve ray ana malzemesindeki sertlik değerlerine göre daha düşük olduğu grafikten de anlaşılmaktadır. Bunun nedeninin buraya tesir eden ısının

ergime ısısından düşük, dönüşümlere yol açmayacak ısıdan yüksek olmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Termit kaynağının soğuması kontrollü yapılamadığı için kritik dönüşümlere sebep olmakta ve ısı tesiri altında kalan bölgede sertliği azalmış alan geniş olmaktadır. Bu istenmeyen bir durumdur. ITAB bölgesinin genişliğinin minimum olması istenmektedir. Kaynak sonrası kaynak metalinde soğuma hızının kontrol edilememesi, karışık bir yapı elde edilmesine yol açmış ve bunun sonucunda sertlik değerleri farklılıklarındaki artış ve azalış düzensiz olarak ortaya çıkmıştır. Birleştirilen ray parçaları arasındaki ısı farkı ile havanın atmosferik şartları bu durumda etkilidir. Ray yüksek karbonlu çelik olduğundan kaynak işleminde martenzit oluşumu ve buna bağlı sertleşmeye karşı oldukça hassastır. Ancak yapılan ön ısıtma ve reaksiyon sonucu açığa çıkan yüksek ısı nedeniyle martenzit oluşumunu engellemek için yeterli kadar düşük bir soğuma hızı ile elde edilmesi gerçekleştirilmiştir.

4. Genel Değerlendirme

Daha iyi ve doğruya en yakın sonuçları elde etmek için sahada kullanılan rayların termit kaynaklı kısımlarının sertliğinin, belirli bir süre kullanımdan sonra geldiği son durumla ilk durumunu kıyaslamak gerekmektedir.

Bu çalışma ile aşağıdaki önemli yargıların altı çizilmiştir;

1. SOW-5 yöntemiyle yapılan termit kaynağında kaynak bölgesi ve ITAB bölgesi sertlik değerleri istenilen sınırlar dâhilindedir. Daha iyi sonuçların elde edilmesi için normalizasyon işlemine tabi tutulmalıdır. Fakat işletme şartlarında adyabatik ortamı sağlamak için özel düzeneklere ihtiyaç duyulduğu için maliyet artışına ve uzayan zaman dilimlerine neden olacağından bu durum pek mümkün görünmemektedir.

2. Kaynak sırasında yüksek ısı ray metalinde kritik dönüşümlere sebep olmaktadır. ITAB içerisindeki kaba taneli bölgenin varlığı iki önemli sonucu doğurur; birincisi hızlı soğuma şartlarında östenit fazının martenzite dönüşme ihtimali çok yüksektir. Bölge içerisinde martenzit fazı sünekliğin, tokluğun azalmasına ve soğuk çatlama riskinin ortaya çıkmasına neden olacaktır. İkincisi, östenit tane boyutları ne kadar büyürse oda sıcaklığındaki çentik darbe direnci o nispette azalacaktır. Yani tane büyüklüğü çentik darbe direncini negatif yönde etkilemektedir.

3. ITAB içerisindeki ince taneli bölge (yeniden kristalleşen bölge); Çeliklerde, 1100 °C ile A₃ dönüşüm sıcaklığına kadarki sıcaklık aralığında yer alan bölgedir. Bu sıcaklık aralığı, östenitin tane yapısının incelmeye çok elverişlidir. İnce taneli bu bölgenin çentik darbe direnci yüksektir. Fakat östenitin soğuma hızına bağlı olarak martenzite dönüşme riskinin var olduğu gerçeği dikkatlerden kaçırılmamalıdır.

4. Kısmen dönüşmüş ITAB bölgesi; Çeliklerde bu bölge, A₃ veya A_{cm} dönüşüm sıcaklığı ile A₁ dönüşüm sıcaklığı aralığında yer alan bölgedir. Bu sıcaklık aralığında az da olsa östenit fazı mevcuttur. Orta ve yüksek karbonlu çeliklerde, az miktardaki östenit fazı, büyük miktarda çözünmüş karbon elementi içerir. Bu nedenle, östenit fazı, soğuma hızına bağlı olarak martenzite dönüşme eğilimindedir.

5. Temperlenmiş ITAB bölgesi (kritikaltı ITAB); Çeliklerde bu bölge A₁ dönüşüm sıcaklığından 550 °C'ye kadarki temperleme sıcaklık aralığında yer alan bölgedir. Bu bölgedeki çelikte, kaynak ısısı temperleme ısıl işlemi gibi işlem gördüğü için çekme mukavemeti ve sertlik düşüşü meydana gelir. Faz dönüşümü oluşmaz. Çünkü sıcaklık aralığı A₁ dönüşüm sıcaklığının altındadır.

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 teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Ö. Onat, "Mantarı sertleştirilmiş raylarda aşınma davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2012, 316278
- [2] S. Özçelik, "Mantarı sertleştirilmiş raylarda yorulma davranışı incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014, 411504
- [3] A Perspective on the manufacture of modern-day high-strength steel rail, AREMA 2013
- [4] B. Demir, "A Metalurgical Perspektif On Rail Steel Development In Turkey And Future," *Symposium on Railway System Engineering , ISERSE*, 2018 Karabük
- [5] R. R. Porcaroa, G. L. Fariaa, L. B. Godefroida, G. R. Apolonioa, L. C. Cândidoa, E. S. Pinto, "Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail," *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 270, 2019, pp. 20-27
- [6] Vander Voort GF, *Metallography: principles and practice*. New York: McGraw-Hill Book, 1984.pp. 219-23
- [7] A. Arı, "Alimünotermit kaynağıyla birleştirilmiş mantarı sertleştirilmiş 'r350ht' rayın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi" PhD Thesis 2021 Ankara
- [8] International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 23950056 Volume: 07 Issue: 07 July 2020
- [9] EN 13674-1, (2003). Railway Applications Track Rail Part 1: Vignole Railway Rails 46 kg/m and Above, Brussels
- [10] K.M. Lee, ve A.A. Polacarpou, "Wear of conventional pearlitic and improved bainitic rail steels," *Wear*, 259: 391-399
- [11] TS-EN-14730-1-A1:2011-01. "Demiryolu uygulamaları – Demiryolu - Rayların Alüminotermit kaynağı" K4 Yorulma deney yöntemi. Syf:13-37
- [12] TS EN 13674-1:2011+A1:2017(E) Syf:21. "Demiryolu uygulamaları - Demiryolu hattı - Ray Bölüm 1: 46 kg/m ve üzeri vignole demiryolu rayları Ocak 2018
- [13] Y. Uğurlu, "Demiryolu mühendisliği sektör tahmini ve etkinliklerimiz," *Demiryolu Mühendisliği*, 4, 30-34

Özgeçmiş**Adem ARI**

1969 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Selçuk Üniversitesinde tamamlamıştır. 2021 yılında Karabük Üniversitesinde Yüksek Lisans eğitimini tamamlamış, halen bu üniversitede Doktora eğitimine devam etmektedir. TCDD Taşımacılık A.Ş. Araç Bakım Dairesinde çalışmaktadır.

E-Posta: demaria06@hotmail.com

**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. İlgi 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. İlgi 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, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Bilge DEMİR: Kontrol. Atilla KESKİN: Görselleştirme, İnceleme.



6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Demiryolu Üstyapısına Etkilerinin Saha Gözlemleri ve Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN

TCDD 4. Bölge Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 09.05.2023, Kabul/Accepted: 22.05.2023, Yayınlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Tünel, köprü, viyadük gibi çeşitli demiryolu altyapı elemanlarının depreme dayanıklı tasarımı günümüze kadar geniş ölçekte araştırılmıştır. Ancak demiryolu traverslerinin “hattın depreme dayanıklılığının artırılması” açısından sağlayabileceği potansiyel faydalar, standartlarda yer edinmemiş ve literatürde yeterli düzeyde araştırılmamıştır. Bu çalışmada, dünyadaki diğer örneklerinde olduğu gibi, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri ardından da gözlemlenen “S-tipi üstyapı hatalarının” esas nedenleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, Gölbaşı-Kapıdere İstasyonları arasındaki yaklaşık 5140 metrelik demiryolu güzergâhında gözle muayeneler gerçekleştirilmiş ve bu hattın ANSYS® sonlu eleman modeli hazırlanarak modal analizlere tabi tutulmuştur. Gözlem ve analiz sonuçlarına göre, yekpare traversler kullanılan balastlı demiryolu üstyapılarının, standartlara tam olarak uygun olsa dahi, depreme karşı nispeten düşük dayanıklılığa sahip olduğu ve S-tipi hatalara sebebiyet verebildiği belirlenmiştir. Bu bağlamda, ülkemizde son yıllarda geliştirmeye alınan H-tipi traverslerin alternatif bir çözüm sunabileceği düşünüldüğü için, bu yeni travers modelinin karşılaştırmalı modal analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda, H-tipi traversler içeren modelin, depreme ait yanıl ivme kayıtlarının spektrum şiddetlerinin yoğun olduğu 2-15 Hz frekans bandından uzaklaşmakta fayda sağladığı ve ilk üç yatay rezonans frekansının; yekpare traversli konvansiyonel hatta göre sırasıyla %109, %89 ve %72 daha yüksek sonuçlandığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Türkiye depremleri, Türkiye-Suriye depremleri, S-tipi demiryolu hataları, Termal burulmalar, Depreme dayanıklı demiryolu üstyapısı tasarımı

Investigation of the Effects of the 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes on the Railway Superstructure by Field Observations and Finite Element Analysis

Abstract: The earthquake-resistant design of various railway infrastructure elements, such as tunnels, bridges and viaducts, has been extensively investigated. However, standards have not included the potential benefits of railway sleepers in terms of "increasing the earthquake resistance of the railways", and this issue has not been investigated enough in the literature. Therefore, this study investigated the main causes of typical "S-shaped" railway faults observed after several earthquakes in the world and similarly after the 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquakes. In this context, approximately 5140 meters of field investigation between the Gölbaşı and Kapıdere Train Stations was carried out. After this, the ANSYS® finite element model of the investigated track was prepared and subjected to modal analysis. As a result, it has been determined that ballasted railway superstructures using mono-block sleepers have lower resistance to earthquakes, even if completely conforming to standards, and can cause S-shaped railway faults. As an alternative, the H-type sleepers, recently developed in Türkiye, can offer a solution. Therefore comparative modal analyzes of this new sleeper model have been made. At the end of the study, it was concluded that the model with H-type sleepers was beneficial in shifting the track resonances away from the 2-15 Hz frequency band, where the spectrum magnitudes of the lateral acceleration records of the earthquake were intense. This new model's first three lateral resonance frequencies were 109%, 89% and 72% higher, respectively.

Keywords: 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquakes, Turkey-Syria earthquakes, S-shaped railway faults, Sun kinks, Earthquake-resistant railway superstructure design

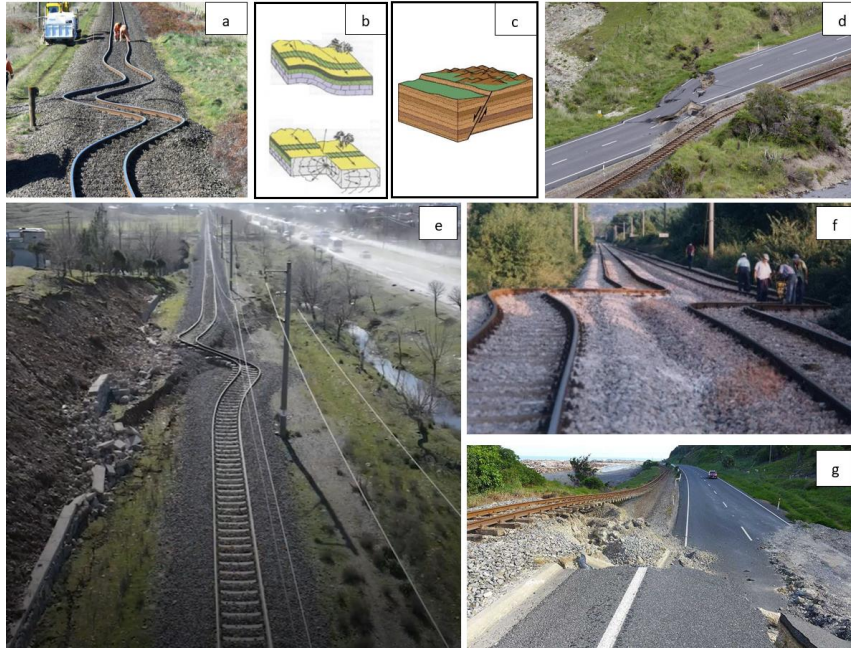
Atıf için/Cite as: F. Çeçen, “6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin demiryolu üstyapısına etkilerinin saha gözlemleri ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 59-72, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1294730

1. Giriş

Demiryollarında, rayları mesnetlemek, tren yüklerini göğüsleyip sönümleyerek diğer bileşenlere güvenli bir şekilde aktarmak ve hattın geometrik formunu sağlayıp milimetrik toleranslar dâhilinde korumak gibi önemli görevleri üstlenen ve demiryollarının “omurgasını” oluşturan çeşitli yapı elemanları kullanılmaktadır. Bu yapı elemanları; geçmişten günümüze ahşap, çelik, betonarme, öngerilmeli beton ve fiber takviyeli polimerler gibi çeşitli hammaddelerden üretildikleri gibi, birçok farklı geometrik formları da geliştirilmiş ve hâlen geliştirilmeye devam etmektedir. Bunun gibi, söz konusu yapı elemanları, demiryollarına monte edilirken, çoğunlukla raylara dik vaziyette ve aralıklı olarak kullanılmış, ancak modern demiryollarının artan ihtiyaçlarını karşılamak üzere kesintisiz tabakalar halinde veya farklı açılardaki çoklu parçaların inovatif birleşimleriyle de kullanım sahası bulmuştur. Tüm bu varyasyonların farklı avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte, esas itibarıyla kendilerinden demiryollarının omurgasını oluşturmaları beklenilmektedir ve bu kritik yapı elemanlarına Türkçe demiryolu literatüründe ortak olarak “travers” ismi verilmektedir [1, 2].

Demiryolu traverslerinin görevleri ve tren yükleri altında servis ömrü müddetince göstermesi istenilen performans kriterleri literatürde geniş ölçekte incelenmiştir [1-3]. Bu çalışmada, traverslerin yaygın olarak bilinen bu görevlerinin haricinde, farklı bir açıdan araştırması yapılacaktır. Bu kritik konu, traverslerin demiryolu hattının “depreme dayanıklılığına” sağlayabileceği potansiyel katkıdır. Demiryolları ulaştırmada stratejik bir role sahip olup, demiryollarının depremlerden sonra işletmeye açık kalabilmesi için hattın tüm bileşenleriyle (hem alt, hem de üstyapısı) depreme dayanıklı olması gerekmektedir. Demiryolu “altyapı” elemanlarının (köprü, tünel, viyadük vb.) depreme dayanıklı tasarımı, standartlarda ve şartnamelerde geniş ölçekte yer almıştır. Öte taraftan, sıkça depremler yaşanan bazı ülkelerde, depremlerin erken tespiti ve seyir halindeki trenlerin emniyetli bir şekilde durdurulması gibi kritik konular için özel birimler görevlendirilmiştir. Örneğin Japonya’da deprem mühendisliği branşında çalışmalar yapmak üzere, Demiryolu Teknik Araştırma Enstitüsü bünyesinde ayrı bir merkez kurulmuştur [4]. Ancak demiryolu “üstyapı” elemanlarının ve özelinde “demiryolu traverslerinin” hattın depreme dayanıklılığını artıracak şekilde tasarımı konusu oldukça bâkir kalmıştır. Bu konuda, standartlarda (EN 13230 serisi vb.) herhangi bir kriter veya öneri mevcut olmadığı gibi, literatürde yayımlanmış herhangi bir çalışmaya da ulaşamamıştır. Oysaki depreme dayanıklı demiryolu hatlarının tasarımında, demiryollarının omurgasını oluşturan bu kritik yapı elemanlarının da önemli roller üstlenmesi mümkündür. Bu konunun günümüze değin, yeterli düzeyde araştırılmamış olmasında çeşitli yanlış kanı ve açıklamalar da etkili olmuştur. Bunlardan ilki, deprem sonrası, özellikle yekpare traversler kullanılan balastlı demiryolu üstyapılarında sıkça görülen “S” şeklindeki salınımların “önlenemez” veya “kaçınılmaz” olduğu yönündeki yanıltıcı bilgilendirmelerdir. Şekil 1.a’da buna dair bir örnek sunulmuştur. Bu fotoğraf, Yeni Zelanda’da meydana gelen bir deprem sonrasında çekilmiştir. Fotoğrafın alındığı referansta [5] geçen açıklamada, söz konusu demiryolunda; termal gerilme alım işlemlerinin yapılmış olduğu, iyi bir balast tabakasıyla travers omuz desteklenmesi sağlandığı, beton traversler ve Pandrol tipi bağlantı sistemiyle güçlü bir çerçeve teşkil edildiği ifade edilmektedir. Nitekim termal gerilmeler altında da benzer hataların (sun kinks) meydana geldiği bilinmektedir. Bu açıklamalar ardından, alınabilecek tüm önlemler alınmasına rağmen, depremler sonrasında meydana gelen bu hataların “kaçınılmaz” olduğu çıkarımında bulunulmuştur. Oysaki bu demiryolu hattında kullanılan konvansiyonel yekpare beton traverslerin depreme dayanıklılık bakımından yetersiz kalabileceği konusu irdelenmemiştir. Buna benzer yanlış/eksik bir bilgilendirme, jeoloji ve jeofizik alanındaki bazı araştırmacılar tarafından dile getirilmektedir. Bu araştırmacılar, söz konusu tipik deformasyonların neredeyse tümünü “fay atımları ve kayaçların deforme olmalarıyla” ilişkilendirmektedir. Şekil 1.b’de [6] bu tezi savunanların, konuyu açıklamakta kullandığı örnek bir tasvir sunulmaktadır. Demiryolu güzergâhının aktif fay hatları üzerinden geçmesi hâlinde, bu tezin geçerli olduğu durumlar -yalnızca bu fay hatları ile ilişkili kısımlarda- söz konusu olabilir. Ancak bu gerçek, her S-tipi deformasyon için geçerli değildir.

Örneğin Şekil 1.a'da örneği verilen ve depremler sonrasında üstyapıda sıkça görülen S-tipi bozulmaların, Şekil 1.b'de tasvir edildiği şekilde meydana gelmediği düşünülmektedir. Çünkü böyle bir durumda, fay tipine bağlı olarak (doğrultu atımlı (Şekil 1.b), normal atımlı (Şekil 1.c) vb.) yalnız hat çerçevesi değil, balast tabakasının ve platformun da (yatay/dikey/verev) hareket etmesi gerekecektir. Nitekim Şekil 1.d-g'de buna dair örnekler sunulmuştur. Örneğin Şekil 1.e'de, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş, Şekil 1.f'de ise 17 Ağustos 1999 Marmara depreminin sonrasındaki bölgedeki demiryollarından alınan ve balast tabakası dâhil tüm zeminin yanal (Şekil 1.b'dekine benzer) ve/veya dikey (Şekil 1.c'dekine benzer) hareket ettiği örnekler sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, Şekil 1.a'daki gibi, fay hattı geçmeyen demiryolu kesimlerinde sıkça görülen S-tipi hatalar; yalnızca ray-travers-bağlantı malzemelerinden müteşekkil üstyapı çerçevesinde tezahür etmekte, Şekil 1.d-g'deki gibi –fay hatları/kayaç deformasyonları kaynaklı- S-tipi hatalarda ise üstyapı dâhil tüm platform ve yakın çevre etkilenmektedir.



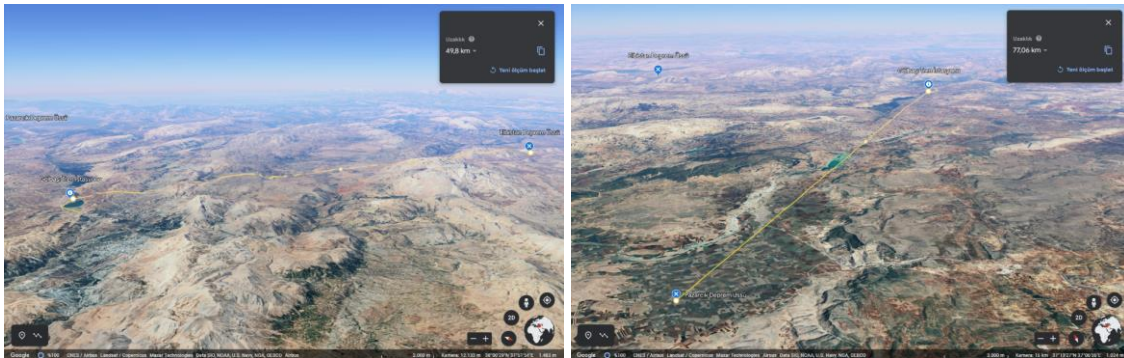
Şekil 1. a) Deprem sonrası yekpare traversli balastlı üstyapılarda sıkça görülen S-tipi hata [5], b) Doğrultu atımlı fayların demiryoluna etkisi [6], c) Normal atımlı fay mekanizması [7], d) Normal/verev fay atımının demiryoluna etkisi [7], e) Normal/verev fay atımının demiryoluna etkisi [8], f) Doğrultu tipi fay atımının demiryoluna etkisi [9], g) Normal/verev fay atımının demiryoluna etkisi [7]

Sonuç olarak, bu çalışma, çeşitli yayın organlarında ve bilimsel araştırmalarda yer edinen bu ve benzeri yanlış kanıların önüne geçilmesi ve depreme dayanıklı, yenilikçi üstyapı elemanları tasarımlarına önayak olunabilmesi için ele alınmıştır. Çalışmada, deprem kaynaklı S-tipi üstyapı salınımlarının esas nedenleri, deprem sonrası saha gözlemleri ve sonlu eleman analizleriyle araştırılmıştır. Çalışma sonunda ise, yekpare traversler kullanılan balastlı demiryolu üstyapılarının depreme karşı düşük dayanıklılığı ve sıkça S-tipi hatalara sebebiyet verebilmesi nedeniyle, alternatif bir travers modelinin (H-tipi) karşılaştırmalı modal analizleri yapılarak, demiryollarının depreme dayanıklılığında traverslerin de aktif rol alabileceği ortaya konulmuştur.

2. Deprem Sonrası Saha Araştırması Yapılan Demiryolu Hat Güzergâhı

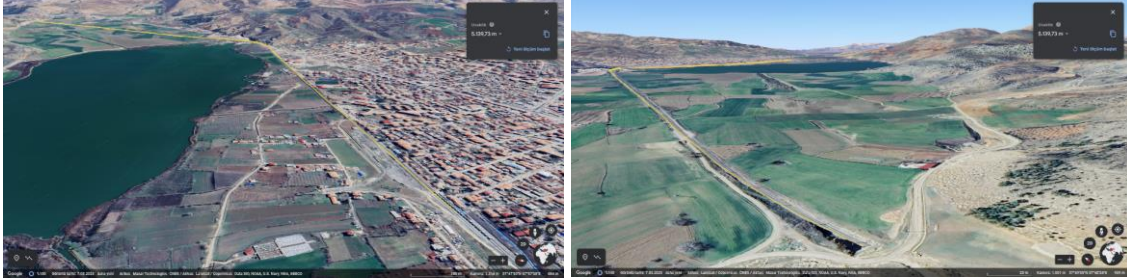
Ülkemizde, demiryollarına yakın lokasyonlarda geçmişten günümüze birçok deprem kayda geçmiştir. Bunun en son örnekleri, 06.02.2023 tarihinden itibaren başlamak üzere günlerce devam eden ve en şiddetlileri Kahramanmaraş ili Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde, yaklaşık 9 saat arayla kayda geçen ve tüm ülkemizi hüzne boğan deprem silsilesidir. AFAD kayıtlarına göre bölgedeki ilk deprem (Pazarcık), Türkiye saati ile (TSİ) saat 04:17:34'te, merkez üssü enlem olarak 37,288

(N), boylam olarak 37,043 (E) koordinatlarında, yüzeyden 8,60 km derinlikte ve 7,7 Mw büyüklüğünde meydana gelmiştir. İkinci en şiddetli deprem ise (Elbistan), saat 13:24:47'de (TSİ), merkez üssü enlem olarak 38.089 (N), boylam olarak 37.239 (E) koordinatlarında, yüzeyden 7.00 km derinlikte ve 7.6 Mw büyüklüğündedir. Söz konusu iki büyük deprem haricinde, ilk şoktan itibaren çeşitli şiddetlerde çok sayıda artçı/münferit deprem de kayda geçmiştir [10]. Meydana gelen bu depremlerin birçoğunun yüzeye oldukça yakın (sığ odaklı) olması nedeniyle, yıkıcı etkileri oldukça yüksek olmuş ve bazı bölgelerde, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018) geçen en yüksek tasarım spektrum şiddetleri dahi aşılmıştır [11]. Örneğin, ilk deprem esnasında, Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesi sınırları içerisinde bulunan 4614 kodlu AFAD istasyonunda ölçülen zemin ivme kaydının Doğu-Batı bileşeninin zirve değeri 2.005 g olup, düşey ivme kaydının zirve değeri ise 1.379 g'dir. Söz konusu ivme kayıtlarının spektrum analizleri incelendiğinde, spektrum şiddetlerinin, özellikle 0,1-0,5 saniye periyodunda (2-10 Hz frekans aralığında), TBDY-2018 yönetmeliğinde esas alınan Deprem Yer Hareketi Düzeylerinin tümünü (DD1/DD2/DD3/DD4) önemli ölçüde geçtiği raporlanmıştır [11]. Ancak analizde kullanılan değerlerin, depremin merkez üssüne yakın bir istasyona ait olduğu ve belirli bir yapısal sönümlenme oranı ($\xi = \%5$) baz alınarak hesaplandığı unutulmamalıdır. Bilindiği üzere, herhangi bir yer hareketi sonrasında, ana kayadan yüzeye doğru hareket eden sismik dalgaların frekans ve genlikleri, içerisinden geçtiği zemin tabakalarının özelliklerine göre değişime uğramaktadır. Dolayısıyla sismik dalgaların zemin içerisindeki ilerleme durumuna ve nihai olarak tesir ettiği yapının sönümlenme düzeyine bağlı olarak, frekans içeriği ve şiddeti değişmekte ve artış azalabilmektedir. (Deprem üssünde açığa çıkan enerji yayıldıkça sönümlenmesine rağmen, yapı-zemin ilişkisine de bağlı olarak, çeşitli frekans bantlarında daha yoğun/zayıf hâle gelebilmektedir.) Örneğin, 6 Şubat 2023 Pazarcık depremi esnasında, Adıyaman ili Merkez sınırlarında bulunan 0201 kodlu AFAD istasyonundan ölçülen kayıtlar incelendiğinde; depremin yatay spektral ivme değerlerinin (daha önce belirtilen 4614 kodlu AFAD istasyonu kayıtlarının aksine), TBDY-2018 yönetmeliğinde DD-1 için verilen değerleri aşmadığı raporlanmıştır. Bu durumun tersi de (depremin zararlı etkilerinin yapı-zemin ilişkisine bağlı artması da) mümkündür. Örneğin, 17 Ağustos 1999 Marmara depreminin merkez üssü Kocaeli Gölçük'te olmasına rağmen yapısal anlamda en çok hasarın alüvyon zemin üzerine kurulu olan Sakarya'nın Adapazarı ilçesinde meydana geldiği ifade edilmektedir [11]. Buna benzer olarak, 6 Şubat 2023 ve devamında meydana gelen deprem silsilesinin en büyük yıkıma neden olduğu yerleşim yerlerinden biri de, Adıyaman ilinin Gölbaşı ilçesidir. Nitekim bölgenin zemininde, göl çökeli yumuşak killerin hâkim olduğu belirtilmektedir [11]. Şekil 2'de Gölbaşı Tren İstasyonunun söz konusu iki büyük depremin kaynak koordinatlarına uzaklıkları, Google Earth® yazılımı üzerinden hesaplanarak verilmiştir. Görüldüğü üzere, bölgenin zemin olarak dezavantajlı olmasının yanı sıra, bölgedeki demiryolu hattı ilk deprem üssüne (Pazarcık, MW 7,7) yaklaşık 77 kilometre, ikinci en büyük depremin kaynağına (Elbistan, MW 7,6) ise yaklaşık 49,8 kilometre mesafededir. Öte yandan AFAD ve İTÜ tarafından, meydana gelen depremler sonucunda, Gölbaşı'nın güneyindeki zemin segmentinin kırıldığı da tespit ve rapor edilmiştir [11, 12].



Şekil 2. Gölbaşı Tren İstasyonunun Pazarcık ve Elbistan deprem üsslerine mesafesi

Bu bağlamda, Gölbaşı ilçesinin daha önce Şekil 1.a'da örneği verilen S-tipi üstyapı salınım örneklerinin incelenmesi açısından uygun olacağı düşünülmüş ve Şekil 3'te Google Earth® yazılımında sarı dolgulu çizgi ile işaretlenen güzergâhta yaya turne yapılmıştır. Gözle muayenesi yapılan bu güzergâh, Gölbaşı Tren İstasyonundan (TCDD Kilometre: 137+800) başlamakta ve kilometre artış istikametinde (Kapıdere İstasyonu yönünde) devam ederek, deprem sonrasında hasar gören demiryolu tüneline kadar yaklaşık 5140 metrelik bir hat kesimini kapsamaktadır.



Şekil 3. Yaya turne hâlinde gözle muayenesi yapılan yaklaşık 5140 metrelik hat güzergâhı

3. Saha Gözlemleri ve Tespit Edilen S-Tipi Üstyapı Hatası Örnekleri

Saha çalışması esnasında belirtilen yaklaşık 5140 metrelik hat güzergâhında, Şekil 1.a'dakine benzer birçok S-tipi salınım örneği tespit edilmiş olup, bazı örnekler, Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Saha gözlemleri esnasında tespit edilen çeşitli S-tipi yanar üstyapı salınımları

Şekil 4'teki örnekler dikkatle incelenirse, meydana gelen salınımların ray-travers-bağlantı malzemelerinden müteşekkil "hat çerçevesinde" gerçekleştiği ve geriye kalan demiryolu yapı elemanlarında (balast, formasyon vb.), katener direklerinde ve bitişik karayolu platformunda herhangi bir yanal/dikey/verev atılım (fay kırığı veya kayaç deformasyonu kaynaklı) söz konusu olmadığı görülecektir. Şekil 4'te görülen bu hat deformasyonları nedeniyle hat çerçevesinin S-tipi salınımlarla belirli bir noktada birikmesi sonucu, rayların iki taraftan merkeze çekildiği ve sonuçta Şekil 5'te örnekleri verilen zayıf noktalarda (ray kaynağı/cebire birleşimlerinde) bölgesel ayrışmalar olduğu tespit edilmiştir. Saha gözlemleri esnasında tespit edilen bir diğer husus, Şekil 4'te normal hat kesimleri için örnekleri verilen S-tipi salınımların, Şekil 6'da örnekleri sunulduğu üzere, birçok menfezde de sıkça görülmüş olmasıdır. Bu duruma, menfez bölgelerinde, alüvyon akıntısı kaynaklı zemin kalitesinin düşmesi ve/veya menfez üstünde zamanla balast omuz genişliğinin azalması ve/veya deprem dalgalarının bu bölgelerde yığılmalara uğraması neden olarak gösterilebilir. Şekil 7'de ise Gölbaşı İstasyonunda park halindeki bazı kömür vagonlarının hat çerçevesinin yanal atılımları ve ani silkeleme hareketleri sonucu, oldukları yerde devrilmelerine dair görseller sunulmaktadır. Nitekim vagonların bulunduğu yola paralel hattaki raylarda, Şekil 4'tekilere benzer, S-tipi hata örnekleri görülmektedir.



Şekil 5. Saha gözlemleri esnasında tespit edilen cebire bulunu ve ray kaynağı kırılmaları



Şekil 6. Menfez bölgelerinde sıkça rastlanılan S-tipi yanal atılım örnekleri

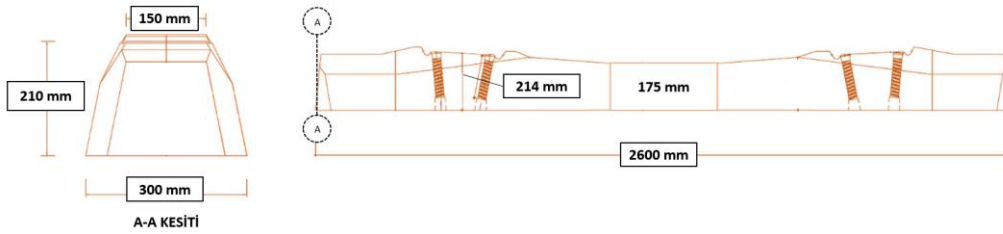


Şekil 7. Gölbaşı İstasyonu yollarındaki yanal atılımlar ve deprem etkisiyle devrilen vagonlar

4. Deprem Etkisindeki Demiryolu Üstyapısının Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi

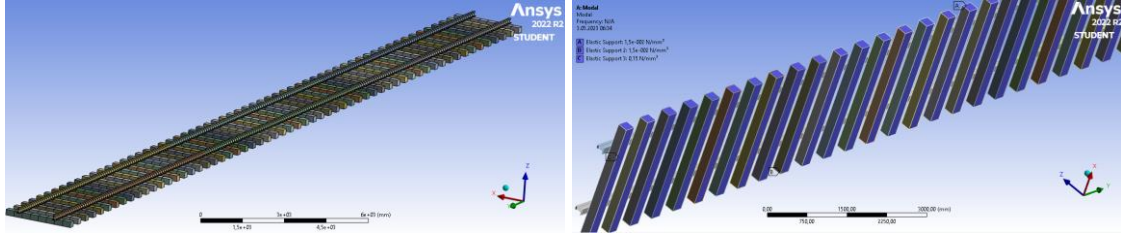
Saha çalışmaları esnasında tespit edilen S-tipi hataların (Şekil 4-7), daha önce Şekil 1.d-g'de örnekleri verilen fay hattı/kayaç deformasyonu kaynaklı veya termal gerilmeler kaynaklı (sun kinks) S-tipi hatalardan farklı olduğu buraya kadar sunulan açıklamalardan anlaşılmaktadır. Bu

hataların, diğerlerinden farklı olarak, dinamik etkiye sahip deprem dalgaları (P, S, Rayleigh, Love vb.) etkisinde meydana geldiği düşünülmektedir. Dinamik yükler altındaki yapı elemanlarının farklı frekanslarda nasıl salınımlar (mode shape) sergileyeceği ise modal analizlerle kolayca tespit edilebilmektedir. Bu bağlamda, bölgedeki demiryolu üstyapısının ANSYS® yazılımının 2022 R2 sürümü kullanılarak sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Bu şekilde deprem etkisiyle meydana gelen S-tipi hatalar, modal analizlerle belirlenecek salınım şablonlarıyla karşılaştırılacaktır. Bölgede kullanılan raylar UIC 60E1 sınıfı olup, ilk etapta 36 metre boyunda imal edilmiştir. Söz konusu rayların, demiryolu hattına döşenmesi (ferşiyatı) esnasında/öncesinde ise çeşitli aralıklarla (≤ 108 metre) kaynaklanması yapılmış (Uzun Kaynaklı Ray, UKR), bu şekilde sahada hem kaynaklı hem de cebireli bağlantı söz konusu olmuştur. Nitekim saha gözlemleri esnasında deprem etkisiyle hem kaynak, hem de cebire noktalarında kırılmalar tespit edilmiştir (Şekil 5). Bölgede kullanılan travers tipi ise yaklaşık 290 kg ağırlığa ve konvansiyonel yekpare geometriye sahip B70-tipi öngerilmeli beton traverslerdir. 1970 yılında Almanya'da geliştirilen [17] bu traverslerin (SpannBetonSchwellen Typ B70) kesit boyunca değişen, ortaya doğru daralan, grift trapez geometrisine ait bazı detaylar Şekil 8'de sunulmuştur. Günümüze kadar, birçok çalışmada incelenen bu traverslerin diğer teknik detaylarına ise literatürden ulaşılabilir [1-3, 13-16].



Şekil 8. B70-tipi öngerilmeli beton traverslerin çeşitli geometrik detayları

Bu çalışmada, bölgedeki hat çerçevesinin karakteristik salınım şablonlarını belirlemek için, Şekil 9'da görülen, 36 metrelik raylardan ve 60 adet traverssten müteşekkil, aliymandaki bir hat modeli kullanılmıştır. Modelde raylar, birbirine paralel ve 1435 mm aralıktadır. Traversler modellenirken ise, Şekil 8'deki grift geometri yerine, büyük ölçekli sonlu eleman modellemelerinde, literatürde sıklıkla uygulandığı üzere, sadeleştirilmiş bir geometri kullanılmıştır. Bu amaçla, Şekil 9'da görülen dikdörtgen prizmalar (207 mm yükseklik, 2600 mm uzunluk, 225 mm genişlik) kullanılmıştır. Bu şekilde, sahadaki traverslerle yaklaşık eşit kütle (290 kg), hacim ($0,12 \text{ m}^3$) ve ray mesnedi altı en kesit alanı ($4,7 \times 10^{-2} \text{ m}^2$) sağlanmıştır. Öte yandan, traverslerin öz frekansları ($> 80 \text{ Hz}$), bu çalışma kapsamında analiz edilen deprem kayıtlarına ait frekans bandının ($< 30 \text{ Hz}$) dışındadır. Neticede sonlu eleman modellemesinde kullanılan bu sadeleştirilmiş geometri, B70-tipi traversler gibi Karosel metoduyla üretilen grift geometrili yekpare traverslerle eşdeğer ve uzun hat (long-line) yöntemiyle üretilen sade, dikdörtgen kesitli diğer yekpare traverslerle de benzerdir. Bu bakımdan, demiryolu hattının yanal salınımlarının ön incelemesinin yapıldığı bu çalışma için yeterli görülmüştür. Modelde, traversler, sahadaki gibi, merkez eksenleri arasında 60'ar cm'lik mesafelerle konumlandırılmıştır. Traversler ve rayların, sahadakine benzer bağlantısının sağlanması için ise, her bir traversin 2'ser ray mesnedi göz önünde bulundurularak 60 adet travers için toplamda 120 sabit mesnet (bonded/fix contact) tanımlaması yapılmıştır. Modelde sonlu eleman boyutu (mesh element size) 150 mm olarak uygulanmıştır. Hazırlanan modelin duyarlılık (sensivity) analizlerine göre, analize tabi tutulan hat uzunluğu-travers aralığı (eker)-travers betonu birim hacim ağırlığı-travers betonu elastisite modülü arttıkça veya sonlu eleman boyutu-yanal balast mesnetleme rijitliği azaldıkça analizler sonucunda ulaşılan rezonans frekansları düşmektedir. Ancak hat çerçevesinin analiz edilecek karakteristik modal salınım şablonları aynı kalmaktadır. Dolayısıyla, ileride uygulanacak karşılaştırmalı analizlerde de aynı parametreler kullanılacağından, modeldeki hat uzunluğu ve diğer parametreler, bu ön-çalışma için yeterli görülmüştür. Hazırlanan modelin sonlu eleman kalitesi, literatür doğrultusunda [13, 14], Skewness kriteri bakımından analize tabi tutulmuş ve elde edilen 0,54 (ortalama) ve 0,95 (en fazla) değerlerinin uygun olduğu da belirlenerek analizlere bu şekilde devam edilmiştir.

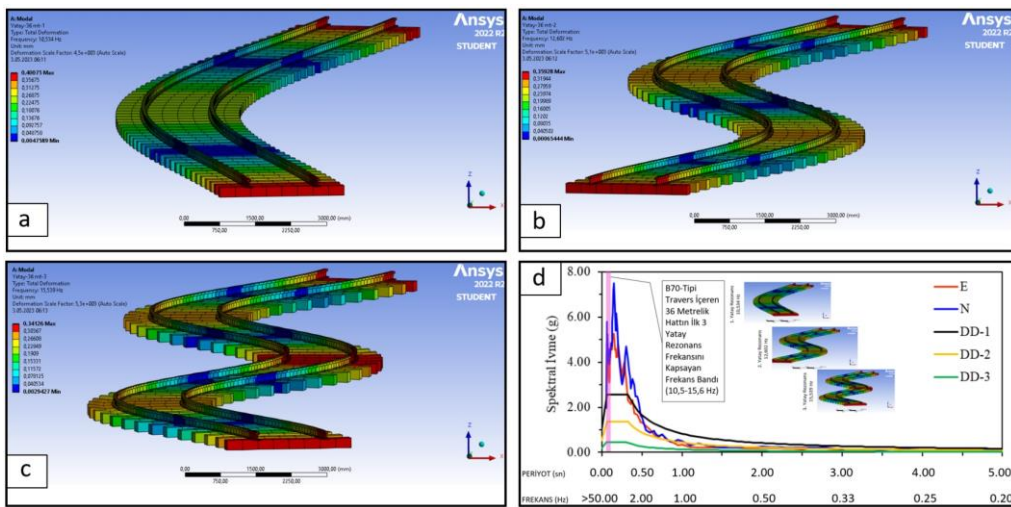


Şekil 9. Gölbaşı mücavirindeki demiryolu hattının ANSYS® sonlu eleman modeli

Hazırlanan modelde, travers betonarme malzeme parametreleri; birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 , elastisite modülü 37 GPa ve Poisson oranı $0,20$ olarak tanımlanmıştır. Rayların modellemesinde ise 7800 kg/m^3 birim hacim ağırlığı, 210 GPa elastisite modülü ve $0,30$ Poisson oranı değerleri kullanılmıştır. Şekil 9'da (sağda) ayrıca bölgedeki balastlı hattın modellemesi esnasında kullanılan elastik mesnet tanımlamaları görülmektedir. Bu modellemede, literatür doğrultusunda [14], travers alt yüzeyi ile temas eden kısımlarda $0,15 \text{ N/mm}^3$, yan yüzeyleriyle temas eden kısımda ise $0,015 \text{ N/mm}^3$ balast rijitliği (elastic support stiffness) değerleri kullanılmıştır. Deneysel olarak elde edilmeyen bu yaklaşık değerler, ileride uygulanacak karşılaştırmalı analizlerde de aynı parametreler kullanılacağından, bu çalışma için yeterli görülmüştür. Tüm bu ayarlamalar ardından, ANSYS® Modal Analysis modülü kullanılarak, söz konusu demiryolu hattının ilk 3 yatay rezonansına ait frekans değerleri belirlenerek Tablo 1'de, ilgili modal salınım şablonları ise Şekil 10.a-c'de sunulmuştur. Şekil 10.d'de ise, 1. Giriş kısmında değinilen, Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesi sınırları içerisinde bulunan 4614 kodlu AFAD istasyonunda ölçülen zemin ivme kaydının yanal (Doğu-Batı (E) ve Kuzey-Güney (N)) bileşenlerinin spektral ivme analizleri, referanstaki [11] grafiğin yatay eksenine frekans bilgileri eklenerek verilmiştir. Bu grafikte ayrıca, Şekil 10.a-c'deki demiryolu rezonans frekanslarının denk geldiği bölge, pembe dolgulu alanla işaretlenerek, örnek bir karşılaştırma yöntemi sunulmuştur.

Tablo 1. Konvansiyonel yekpare (B70-tipi) ve yeni nesil H-tipi geometrili traversler içeren hat kesimlerin ANSYS® modal analizleri sonucunda elde edilen yatay rezonans frekanslarının karşılaştırılması

Parametre	B70-Tipi Yekpare Travers İçeren Model	Yeni Nesil H-tipi Travers İçeren Model	Artış Yüzdesi
1. Yatay Rezonans	10,534 Hz	22,017 Hz	% 109
2. Yatay Rezonans	12,602 Hz	23,815 Hz	% 89
3. Yatay Rezonans	15,539 Hz	26,653 Hz	% 72

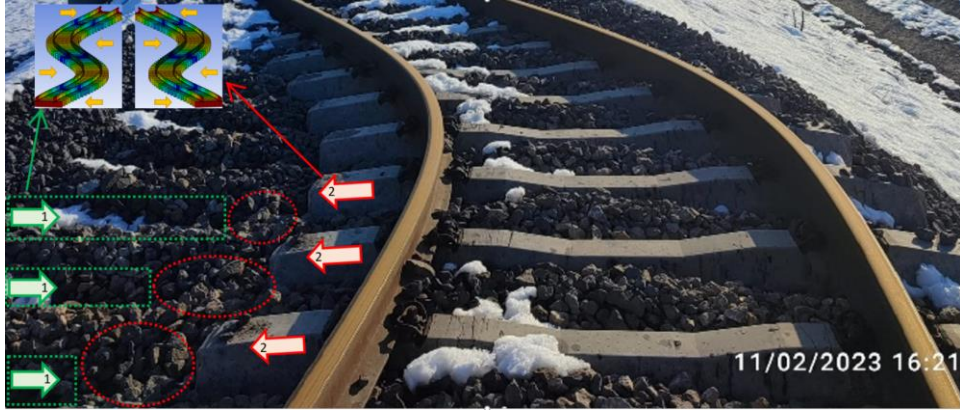


Şekil 10. Gölbaşı mücavirindeki demiryolu hattının simülasyonu için hazırlanan 36 metrelik sonlu eleman modelinin; a) Birinci yatay rezonansına ait salınım şablonu, b) İkinci yatay rezonansına ait salınım şablonu, c) Üçüncü yatay rezonansına ait salınım şablonu, d) Belirlenen ilk 3 rezonansın, 4614 kodlu AFAD istasyonu kaydının spektrum analizinde denk geldiği bölge (pembe dolgulu alan)

Şekil 10.d’de sunulan analiz, meydana gelen dinamik deprem yükünün, hattın rezonans frekanslarını güçlü bir şekilde barındırdığını “örnekleme” adına sunulmuştur. Ancak bu örnek, daha önce 1. Giriş kısmında sunulan açıklamalar doğrultusunda, zemin-yapı ilişkisinin değişkenliği nedeniyle, bölgedeki tüm demiryolu hattı için geçerli değildir. Bununla birlikte, literatürdeki birçok AFAD İstasyonu kayıt analizinde [11] de, benzer şekilde, 2-15 Hz aralığında ve yerine göre TBDY-2018 tasarım depremi spektrum şiddeti değerlerini aşan spektral şiddet değerleri söz konusudur ve bölgedeki demiryolu hattının yatay rezonans frekanslarının önemli bir kısmını kapsamaktadır. Bir diğer husus, bölgedeki demiryolu hattının analiz edilen ilk 3 yatay rezonansı dışında başka birçok rezonanslarının da bulunmasıdır (4., 5., 6. vb.). Ancak bu rezonanslar, söz konusu pembe dolgulu alanının sol kısmına (frekans artış yönüne) denk gelmektedir. Dolayısıyla hazırlanan 36 metrelik model için, analiz edilen depremlerin yüksek derecede etkili olduğu frekans bandı dışında kalan bu rezonanslar, bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Buna göre; deprem sonrası demiryolu üstyapısında görülen her “S-tipi” bozulmanın yalnızca fay atımları ve deforme olmuş kayalarla ilişkilendirmesinin doğru olmadığı, buna dair bir emare (Şekil 1.d-g’dekine benzer) söz konusu olmadığında ise Şekil 10.a-c’de örnekleri verilen modal salınımların etkin olduğu düşünülmektedir. Nitekim saha analizi yapılan demiryolu hat kesiminin herhangi bir noktasında balast tabakasının, hat platformunun, katener direklerinin veya karayolu platformunun Şekil 1.d-g’deki gibi yanal/dikey/verev atılıma uğradığı gözlenmemiştir. Bunun aksine, yalnız hat çerçevesinin birçok noktada S-tipi atılımlar yaptığı tespit edilmiş ve örnekleri Şekil 4-7’de sunulmuştur.

Bir diğer konu, Şekil 10.a-c’de sunulan yatay rezonansların bir veya birkaçının, yalnızca depremler esnasında değil, normal servis yükleri altında da gerçekleşmesi mümkündür. Bu durum, yanal etkilerin arttığı durumlarda (kurplarda vb.) daha bariz meydana gelmektedir. Ancak tesir eden yüklerin yanal bileşenlerinin deprem etkisine nazarla oldukça düşük şiddetli olması nedeniyle, meydana gelen salınımlar çoğunlukla “elastik” sınırlar içerisinde kalmakta veya yıllar içerisinde etkisini gösteren bu minimal etkiler, ilk etapta kolayca tespit edilememektedir. Deprem sonrası saha analizi yapılan hat kesiminde ise, hat standartlara uygun inşa edilse dahi, deprem üssünde yanal bileşenlerinin şiddeti 2 g’ye varan ve kil ağırlıklı Gölbaşı zemin şartlarının etkisiyle zemin-yapı etkileşimi sonucu spektral etkisi artabilecek çok daha büyük bir dinamik kuvvet söz konusudur. Bu olağanüstü etki altında, hat çerçevesinin modal salınımlarının arttığı ve sonuçta hattın elastik deformasyon sınırlarını aşan (plastik) salınımlara maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, elastik deformasyon sınırlarını aşan dinamik yükler altında kalan yapı elemanlarının sönümlenme oranları ve rezonans frekansları değiştiğinden [15, 16], hat çerçevesinin belirli aşamadan sonra “rezonanstan çıkması” söz konusudur.

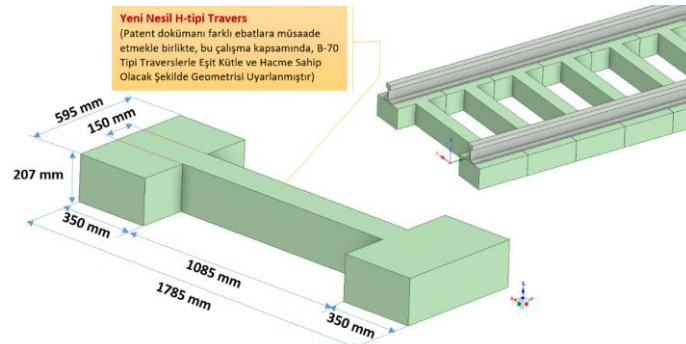
Nitekim Şekil 4-7’deki balast tabakasındaki dağılımlar yakından incelendiğinde, S-tipi salınımların bir veya birkaç adet ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Örneğin Şekil 4’teki görsellerden sonuncusu, Şekil 11’de yakınlştırılarak sunulmuştur. Şekil 11’de görüldüğü üzere, hattın incelenen bölümü, sağa doğru (yeşil renkli 1 numaralı oklarla gösterilen yönde) salınım yaparken, traversler, balastı sağa doğru sürüklemiş ve arkalarında kalan balast tabakasında, yeşil renkli dikdörtgen kesik çizgili işaretlemeyle gösterilen boşluklar oluşmuştur. Bu salınım ardından, rezonans devam ederken, hattın incelenen bölümü, bu kez sola doğru (kırmızı renkli 2 numaralı oklarla gösterilen yönde) salınım yapmış, traversler, balast tabakasını bu kez sola doğru sürüklemiştir. Ancak bu son salınım esnasında deprem etkisi sona ermiş veya hat rezonanstan çıkmıştır. Bu durum, traverslerin sol omuz başlarında biriken ve kırmızı renkli dikdörtgen kesik çizgili işaretlemeyle gösterilen lokal balast öbeklerinden anlaşılmaktadır. Hat, depremden önceki haline dönmeden ve yeşil kesik çizgili alanları doldurmadan salınım sona ermiştir. Bu salınım “silsilesi” ise, Şekil 4-7’de örnekleri sunulan bu “S-tipi salınımların” fay kırıkları/kayaç deformasyonları veya termal gerilme kaynaklı “tekil” salınımlardan kaynaklanmadığını ispatlamaktadır. Aksine, sonlu eleman modellemesi ile örtüşen, rezonans etkisiyle meydana gelen çok sayıdaki modal salınımı işaret etmektedir.



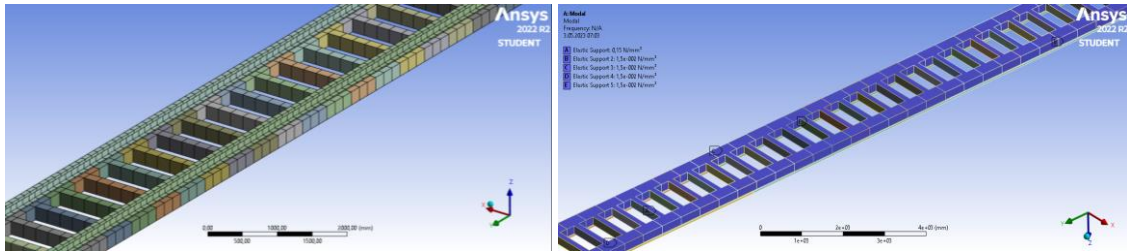
Şekil 11. Saha gözlemleri esnasında tespit edilen S-tipi yanallı üstyapı salınımlarının yakından incelenmesi

5. Yeni Nesil H-tipi Demiryolu Traverslerinin Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi

Önceki bölümde sunulan sonlu eleman analizleriyle, Şekil 1.a ve Şekil 4-7’de örnekleri verilen deprem kaynaklı S-tipi demiryolu üstyapısı salınımlarının esas nedenleri ortaya konulmuştur. Buna göre, Şekil 1.d-g’deki gibi, aksine bir emare (fay kırıkları vb.) tespit edilmediği müddetçe, bu tipik salınımlar, hat çerçevesinin “modal performansı” ile ilgilidir. Üstelik Şekil 1.d, e, g’den görüldüğü üzere, dikey/verev atımlı faylarda da bu modal salınımlar görülebilmektedir. Bu bölümde ise, söz konusu salınımların demiryolu traverslerinin modal performansları geliştirilerek minimize edilip edilemeyeceği araştırılacaktır. Bu esnada ise, ülkemizde yakın zamanda geliştirilerek, Türk Patent Kurumunda (2019/20386 Başvuru No) incelemeye alınan; “H-tipi travers” modeli analize tabi tutulacaktır. Söz konusu travers modelinin hak sahibi Erciyes Üniversitesi olup, Buluşçuları Erciyes Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Bekir AKTAŞ ve bu çalışmanın yazarıdır. Buluşa ait patent dokümanının daha avantajlı ebatlara müsaade etmesine rağmen, yeni tip traverslerin geometrisi, H-tipi travers ağırlığı ve hacmi, B70-tipi traverslerle eşit (290 kg ve 0,12 m³) olacak şekilde uyarlanmış ve boyutları Şekil 12’de sunulmuştur. Bu yeni tip traversleri içerecek şekilde revize edilen sonlu eleman modelinde kullanılan 36 metrelik raylar ve toplamda 60 adet H-tipi travers ise Şekil 13’te sunulmuştur.

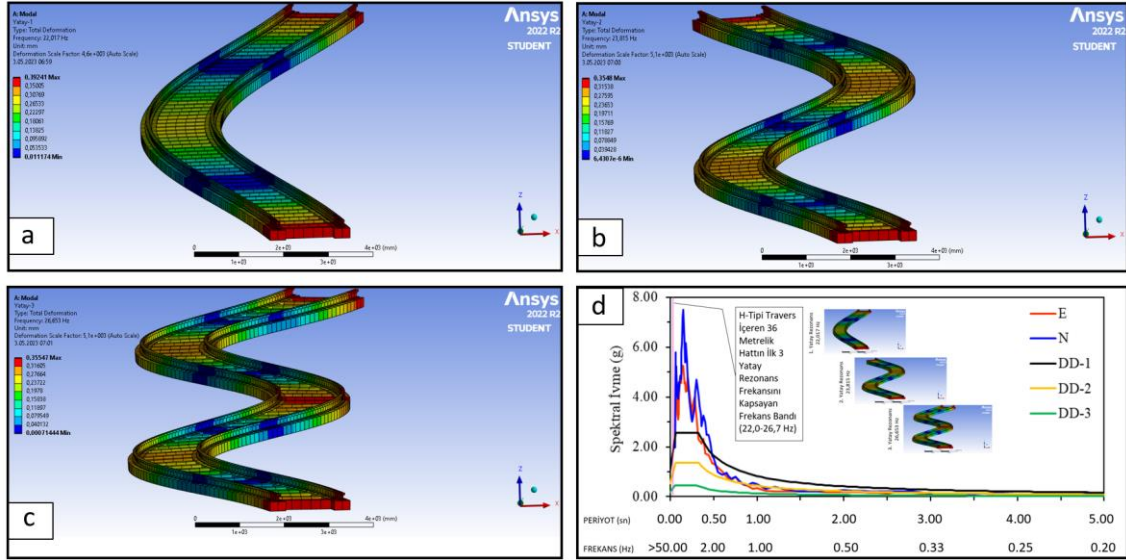


Şekil 12. Sonlu eleman modelinde kullanılan yeni nesil H-tipi traverslerin çeşitli geometrik boyutları



Şekil 13. Yeni nesil H-tipi traversler içeren sonlu eleman modeli

Öte taraftan, H-tipi traverslerin patent dokümanında geçen hammaddeleri (beton, donatı vb.) bakımından olumlu yönde birçok avantajları olmasına rağmen, bu çalışmada yalnızca yeni-nesil geometrisinin sağlayacağı avantajlar incelemeye tabi tutulacaktır. Bu bağlamda kullanılan materyal parametrelerinden (elastisite modülü, Poisson oranı, birim hacim ağırlığı vb.) sonlu eleman boyutuna (150 mm) ve mesnetleme modellemesine (balast rijitliği) kadar tüm şartlar daha önce analize tabi tutulan B70 tipi traversli hat kesimi ile eşit tutulmuştur. Yapılan ayarlamalar ardından ANSYS® Modal Analysis modülü kullanılarak, söz konusu yeni nesil H-tipi traversli demiryolu hattının ilk 3 yatay rezonansına ait frekans değerleri belirlenerek Tablo 1’de, salınım şablonları ise Şekil 14.a-c’de sunulmuştur. Buna göre, H-tipi traverslerin her 3 rezonans bakımından da avantajlar sağladığı görülmektedir.



Şekil 14. Yeni nesil H-tipi traversler içeren 36 metrelik sonlu eleman modelinin; a) Birinci yatay rezonansına ait salınım şablonu, b) İkinci yatay rezonansına ait salınım şablonu, c) Üçüncü yatay rezonansına ait salınım şablonu, d) Belirlenen ilk 3 rezonansın, 4614 kodlu AFAD istasyonu kaydının spektrum analizinde denk geldiği bölge (pembe dolgulu alan)

Şekil 14.d’de ise, daha önce Şekil 10.d’de sunulduğu gibi, 4614 kodlu AFAD istasyonunda ölçülen zemin ivme kaydının yanal bileşenlerinin spektral ivme analizleri sonuçları [11] ile H-tipi traversler içeren 36 metrelik sonlu eleman modelinin ilk 3 yatay rezonans frekansının bu spektrum eğrisi içerisinde denk geldiği kısım (pembe dolgulu alanla) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, H-tipi geometriye sahip yeni tip traverslerin kullanımı, pembe dolgulu demiryolu rezonans frekanslarını gösteren alanın, B70 tipi traversler kullanılan hatta göre, sola doğru kaymasını (rezonans frekanslarının artmasını) sağlamıştır. Bu bölge ise depremlerin yoğun olarak etkin olduğu 2-15 Hz aralığı dışındadır ve spektral ivme şiddeti oldukça düşüktür (Şekil 11.d için yaklaşık 6 kat daha düşüktür). Öte yandan, analiz edilen hat kesimi uzunluğu (36 metre) artsa ve bu nedenle elde edilen rezonans frekansları kısmen düşse de (pembe dolgulu alanlar sağa doğru genişlese de), yeni nesil H-tipi traversler kullanılan hatların rezonans frekansları (1., 2., 3., 4., 5., 6. vb.), genel olarak, konvansiyonel yekpare (B70 vb.) traverslere göre, spektral ivme şiddeti daha düşük alanlara denk gelecek ve/veya daha az sayıda rezonans frekansı tahrik edilmiş olacaktır. (Örneğin 1. rezonans bu bölgeye denk gelse de, diğer 2., 3., 4. vb. rezonanslar bu bölgenin dışında kalacaktır.) Yapı elemanlarının rezonans frekanslarının (tümünün veya bir kısmının), kendisine tesir eden dinamik yüklerin frekans kapsamı dışına çıkarılması, modal tasarım uzmanlarınca uygulanan en önde gelen önlemlerden biridir [14, 18]. Buna göre H-tipi traverslerin, demiryolu üstyapısının depreme dayanıklılığını artırmak adına önemli avantajlara sahip olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan mesnetleme modeli denemeleriyle (yanal balast desteklemeleri aktif ve deaktif edilerek) bu farklılığın nedeni araştırılmış, bu analizlere göre, H-tipi traverslerin bu

yüksek rezonans frekanslarına, rayların altında aralıksız bir şekilde devam eden geometrisi sayesinde ulaştığı görülmüştür. Bu yeni nesil geometri sayesinde H-tipi traverslerin yanal aderansı artmakta, balasta daha iyi kenetlenmekte ve neticede demiryolu üstyapısının (deprem/normal işletim esnasında) yanal stabilitesi daha yüksek sonuçlanmaktadır.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, 6 Şubat 2023 tarihinden itibaren Kahramanmaraş ve çevresinde meydana gelen depremler akabinde, Gölbaşı İstasyonu itibariyle yaklaşık 5140 metrelik demiryolu hat kesimi, yaya turne halinde gözle muayene edilmiş ve üstyapıda çeşitli S-tipi hatalar tespit edilmiştir. Bu saha çalışması ardından, söz konusu demiryolu hattı, ANSYS® sonlu eleman yazılımında modellenerek “modal analizlere” tabi tutulmuştur. Analizler sonucunda belirlenen yanal rezonans frekansları, bölgedeki AFAD İstasyonu kayıtlarının spektral ivme analizleriyle karşılaştırılmış ve meydana gelen deprem etkilerinin bölgedeki demiryolu hattının yatay rezonans frekanslarının önemli bir kısmını kapsadığı belirlenmiştir. Nitekim, sonlu eleman analizleriyle elde edilen yanal rezonans salınım şablonları da, saha çalışmasında tespit edilen salınımlarla örtüşmektedir. Neticede, balastlı yekpare traversli hat kesimlerinde, depremler sonrasında (standartlarda geçen tüm önlemler alınsa dahi) sıkça görülen bu hataların, fay hattı/kayaç deformasyonu veya termal gerilmeler kaynaklı benzer S-tipi hatalardan farklı oldukları, bu salınımların hattın “modal performansı” ile ilgili olduğu tespit ve izah edilmiştir. Bu önemli tespit ardından, konuya alternatif bir çözüm de sağlayabilmek adına araştırmalar devam ettirilmiştir. Bu bağlamda, ülkemizde son yıllarda geliştirmeye alınan, yeni H-tipi geometriye sahip traverslerin, söz konusu konvansiyonel yekpare (mono-block) geometrili traverslerle karşılaştırmalı modal analizleri yürütülmüş, bu yeni nesil traverslerin demiryollarının depreme dayanıklılığını artırmak adına sağlayabileceği faydalar araştırılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre; yeni tip traversler, üstyapı çerçevesinin 1. yatay rezonans frekansında %109, ikinci yatay rezonans frekansında %89, üçüncü yatay rezonans frekansında ise %72 artış sağlayabilmektedir. Yapı elemanlarının rezonans frekanslarının, kendisine tesir eden dinamik yüklerin frekans kapsamı dışına çıkarılması, modal tasarım uzmanlarınca uygulanan en yaygın önlemlerden biridir. Bu bağlamda, yeni tip traverslerin demiryolu üstyapısının depreme dayanıklılığını artırmak bakımından önemli bir potansiyeli söz konusudur. Yapılan sonlu eleman analizlerine göre, yeni tip traversler, bu avantaja, rayların altında aralıksız bir şekilde devam eden geometrisi sayesinde ulaşmaktadır. Bu sayede balasta daha iyi kenetlenmekte ve çok daha yüksek frekanslı dinamik etkilere kadar rezonansa uğramayarak, hat stabilitesini daha fazla koruyabilmektedir.

Çalışma esnasında yürütülen gözlemler ve sonlu eleman duyarlılık analizleriyle ulaşılan diğer tali sonuçlara göre ise; kaynaklı ray uzunluğu, travers aralığı (eker), travers betonu birim hacim ağırlığı ve travers betonu elastisite modülü parametreleri, hattın yanal rezonans frekansları ile ters orantıya sahiptir. Yani bu parametrelere ait değerler arttıkça hattın yanal rezonans frekans değerleri düşmektedir. Bu ise depreme karşı dayanıklılık bakımından, genel anlamda, istenilmeyen bir husustur. Öte yandan yanal balast mesnetleme rijitliği ise hattın rezonans frekansları ile doğru orantıya sahiptir. Yani bu değer arttıkça hattın yanal rezonans frekansları artmaktadır. Bu ise depreme karşı dayanıklılık bakımından önemli bir avantajdır. Bu değerlerin düşüş gösterdiği bazı bölgelerde (menfezler vb.) S-tipi salınımların arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte tüm bu parametrelerin, deneysel veriler, demiryoluna montaj, işletme koşulları ve fayda/maliyet analizleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmekte olup, bu geniş çaplı araştırmalar bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Dolayısıyla bu konuların, ilerleyen çalışmalarda geniş ölçekte araştırılmaları önerilir.

Bu çalışmada, benzer çalışmaların artırılarak, daha üstün nitelikli milli demiryolu travers modellerinin geliştirilmesine ön ayak olmak amaçlanmıştır. Ülkemiz gibi sıkça depremler

yaşanan Japonya’da, demiryolu konusunda teknik araştırmalar yapmak üzere, Demiryolu Teknik Araştırma Enstitüsü (RTRI) ve bunun bünyesinde de, deprem mühendisliği branşında özel araştırmalar yapmak üzere ayrı bir merkez kurulmuştur. Öte yandan, günümüze kadar dünyadaki büyük-küçük birçok ülke tarafından, sahip oldukları madeni ve endüstriyel kaynaklara ve demiryolu işletme koşullarına uygun olarak, onlarca çeşitli travers modeli geliştirilmiş ve hâlen geliştirilmeye devam etmektedir. Hâlbuki ülkemiz demiryollarında günümüze kadar kullanılan travers modellerinin bilindiği kadarıyla tamamı (B55, B58, B70, B07, B320 vb.) yurt dışında dizayn edilmiştir. Bu traversler çeşitli bakımlardan üstün niteliklere haiz olsa da, ülkemizde geliştirilecek alternatif travers modellerinin, depreme dayanıklılık gibi ülkemiz açısından ayrıca önem arz eden şartlara daha fazla uygunluk sağlayabileceği bu çalışmadan anlaşılmaktadır.

Bu çalışmanın kapsamı dışında olmakla birlikte demiryolu üstyapısının depreme dayanıklılığını artırmak bakımından ileride araştırılması önerilen diğer konu başlıkları ise şöyle sıralanabilir:

- Yanal hat stabilitesini artıracak diğer travers/hat modelleri (döşeme tipi traversler (slab tracks vb.), dikey çıkıntılı traversler (nailed sleepers), balastsız üstyapılar vb.),
- Uzun kaynaklı (UKR) ve sürekli/sonsuz kaynaklı ray (SKR) uygulamalarının “üstyapının yanal rezonans frekanslarını düşürücü etkisini” önleyecek özel önlemler (belirli aralıklarla uygulanacak özel conta/ray birleşimleri vb.),
- Deprem dalgalarının demiryoluna erişmesini önleyecek/etkilerini indirgeyecek önlemler (travers altı pedler (under sleeper pad, USP), çeşitli balast altı geotekstiller, platform kenarında-hatta paralel devam eden tabakalar/boşluklar, vb.).

Teşekkür

Yazar, bu çalışmadaki destek ve katkılarından dolayı TCDD Sivas 4. Bölge Müdürlüğü ve Malatya 5. Bölge Müdürlüğü yetkili ve personellerine ve ayrıca Erciyes Üniversitesi öğretim üyeleri Prof. Dr. Bekir AKTAŞ ve Dr. Ahmet ÖZBAYRAK’a teşekkürlerini sunar. Ayrıca çalışmayı, depremler etkisiyle bölgede hayatını ve sevdiklerini kaybeden vatandaşlarımıza, bölge halkının yeniden normal hayatlarına dönebilmeleri için geceli-gündüzlü çalışan Devlet ve sivil toplum kuruluşu yetkililerine-çalışanlarına ve ülkemiz içinden-dışından küçük-büyük yardımlarını esirgemeyen tüm hayırseverlere ithaf eder.

Kaynakça

- [1] F. Çeçen, B. Aktaş, “Yeni Nesil Demiryolu Traversleri ve Yerli FRP Donatı Kullanımının Deneysel Araştırması,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 13, pp. 53-64, Ocak 2021, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>
- [2] F. Çeçen, “Demiryolu Traverslerinde Yerli Lamine CFRPU Donatı Kullanımının Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2023
- [3] F. Çeçen, “Karbon – fiber donatıyla öngerilmesiz monoblok demiryolu beton traversi geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye, 2019
- [4] “Center for Railway Earthquake Engineering Research,” [Online]. Available: <https://www.rtri.or.jp/eng/rd/division/rd61/> [accessed May 04 2023].
- [5] D. Petley, “Distorted railway lines in the Christchurch Earthquake,” 2011, [Online]. Available: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2011/03/08/distorted-railway-lines-in-the-christchurch-earthquake/> [accessed May 04 2023].
- [6] H. G. Demiralp, “Deprem Kanalizasyon Ve İçmesuyu Sistemlerine Etkisi,” Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi, 2017. Available: <https://www.ilbank.gov.tr/userfiles/files/uzmanliktezleri/14704.pdf>
- [7] Quora, “What happened to the road in normal fault?,” [Online]. Available: <https://www.quora.com/What-happened-to-the-road-in-normal-fault?> [accessed May 04 2023].
- [8] TRT Haber, “Deprem tren raylarının bükülmesine sebep oldu,” 2023, [Online]. Available: <https://www.trthaber.com/videolar/deprem-tren-raylarinin-bukulmesine-sebep-oldu-66473.html> [accessed May 04 2023].

- [9] T. Cook, “Variations in Creep Along One of Earth’s Most Active Faults,” 2019, [Online]. Available: <https://eos.org/research-spotlights/variations-in-creep-along-one-of-earths-most-active-faults> [accessed May 04 2023].
- [10] T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), “06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 Depremlerine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu,” 9 Şubat 2023, [Online]. Available: https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmaras%20%20Depremleri_%20On%20Değerlendirme%20Raporu.pdf [accessed May 04 2023].
- [11] Düzce Üniversitesi-Sakarya Üniversitesi-Karadeniz Teknik Üniversitesi-Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi-Sivas Cumhuriyet Üniversitesi-Giresun Üniversitesi, “6 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık Mw=7.7 ve Elbistan Mw=7.6) Depremleri ve Artçıları, Saha Gözlemlerini, Yapısal Hasarları ve İleriye Yönelik Önerileri İçeren Değerlendirme Raporu,” Nisan 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/370003182_Kahramanmaras_Deprem_Raporu [accessed May 04 2023].
- [12] İstanbul Teknik Üniversitesi, “6 Şubat 2023 04.17 Mw 7.8 Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu), Hatay (Kırıkhan), 13.24 Mw 7.7 Kahramanmaraş (Elbistan, Nurhak-Çardak) depremleri ön inceleme raporu,” Şubat 2023. [Online]. Available: <https://www.izmimod.org.tr/haberler/itu-06-subat-2023-depremi-on-inceleme-raporu> [accessed May 04 2023].
- [13] F. Çeçen, B. Aktaş, “Lamine CFRP Donatılı Traverslerin Deneysel ve Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 14, pp. 26-38, Temmuz 2021, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.869946>
- [14] F. Çeçen, B. Aktaş, “Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 127, ID: 105471, Eylül 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105471>
- [15] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. Ş. Öztürk, M. B. Navdar, “Comparative modal analysis of B70 and LCR-6 type railway sleepers after repeated impact loads,” *Construction and Building Materials*, vol. 336, ID: 127563, Haziran 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127563>
- [16] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, “Behaviour of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers under repeated impact loads,” *Construction and Building Materials*, vol. 319, ID: 126151, Şubat 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126151>
- [17] “Bahnschwelle,” [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnschwelle> [accessed May 17 2023].
- [18] F. Çeçen, A. Özbayrak, B. Aktaş, “Experimental modal analysis of fly ash-based geopolymer concrete specimens via modal circles, mode indication functions, and mode shape animations,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 137, ID: 104951, Mart 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104951>

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD’nin çeşitli birimlerinde 16 yıldan fazla hizmet veren yazar, doktora eğitimini Erciyes Üniversitesi Ulaştırma Bilim Dalında tamamlamıştır. İlgilinin, milli demiryolu traversleri geliştirilmesi amaçlı ar-ge ve patent çalışmaları devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Demiryolu Makası İmalatında Ön Isıtma ve Presleme İşlemlerinin Rayın Mekanik ve Kimyasal Özelliklerine Etkisi

Mehmet Emin AKAY¹, Umut Emre BİNGÖL², Anıl RIDVANOĞULLARI^{*3}

¹ KBÜ Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Programı, Karabük, Türkiye

² MZA Demiryolu Malzemeleri ve Makine İmalat Ltd., OSB kavşağı, Karabük, Türkiye

³ Muş Alparslan Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Muş, Türkiye

*a.ridvanogullari@alparslan.edu.tr

(Alınış/Received: 15.05.2023, Kabul/Accepted: 29.05.2023, Yayınlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Bu makalede demiryolu makas üretiminde kullanılan raylara uygulanan 500 °C ön ısıtma ve presleme işleminin malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan ray R260 60E1 olup, aynı şarj numarasına sahip monoblok bir raydan numune olarak, 3 eşit ray parçası alınmıştır. Bu ray parçalarının ikisine 500 °C ön ısıtmalı presleme işlemi uygulanırken, diğer ray parçasına ise ön ısıtma ve presleme işlemi uygulanmamıştır. Ray parçalarından alınan test numunelerine çekme testi, % uzama testi, sertlik testi ve kimyasal kompozisyon testi uygulanmıştır. Elde edilen test sonuçları birbiri içerisinde malzeme sınır değerleri dikkate alınarak incelenmiştir. 500 °C ön ısıtmalı presleme işlemi uygulanan raylardan alınan numunelerden elde edilen test sonuçları incelendiğinde, malzemenin mekanik ve kimyasal değerlerinin sınır değerlerinin içinde kaldığı gözlenmiş, sonuçta makas üretiminde bu tür bir ısıl işlem uygulanması, üretimin kolaylaşması açısından yararlı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Demiryolu makası, Ray ön ısıtma, Presleme, Mekanik ve kimyasal özellikler

The Effect of 500 °C Preheating and Bending Processes applied to the Rails on the Mechanical and Chemical Properties of the Rail for the Production of Railway Turnouts

Abstract: The change in the mechanical and chemical properties of the materials after the 500 °C preheated bending process applied to the rails in the production of railway turnouts was investigated in this paper. A rail profile of R260 quality 60E1 was used, three equal lengths of rail sample were used, taken from a monoblock rail with the same charge number. Two of the rail sample were 500 °C preheated and bending process was applied. Third sample has bending process without preheated condition. Tensile test, % elongation test, hardness test and chemical composition test were applied to the all test samples taken from the rail parts. When the test results obtained from the samples taken from the rails, which were subjected to 500 °C preheated pressing process, were examined, it was observed that the mechanical and chemical values of the material remained within the limit values. As a result, applying such a heat treatment during turnout production was found usefull in terms of easier process.

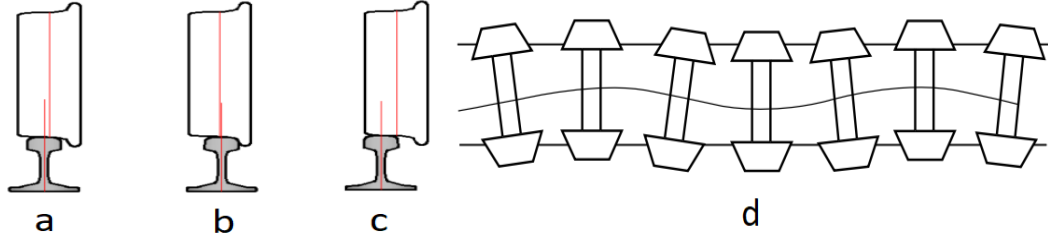
Keywords: Railway turnouts, Rail preheating, Pressing, Mechanical and Chemical properties

1. Giriş

Raylı ulaşım sistemleri Tekerlek – Ray etkileşimi nedeniyle çalışan “izli sistemler” olarak tanımlanırlar. Raylı taşıt dingilleri, bir mile preslenerek geçirilmiş iki tekerlek ve bir milden oluşur ve “tekerlek takımı” adını alır. Tekerlekler de yüzeyindeki “boden” isimli flanşları sayesinde ray üzerinde kılavuzlama sağlarlar. Bu yapıya ilaveten kurlarda iç ve dış tekerleklerin farklı yol alma mesafelerini telafi etmek için, tekerlek yuvarlanma yüzeylerinde 1/25 – 1/40 değerleri arasında değişen koniklik vardır. Bu sayede kurlarda kaymadan dönüş sağlanır.

Atıf için/Cite as: M.E. Akay, U.E. Bingöl, A. Rıdvanoğulları, “Demiryolu makası imalatında ön ısıtma ve presleme işlemlerinin rayın mekanik ve kimyasal özelliklerine etkisi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 73-85, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1297318

Kılavuzlanmış tekerlek hareketinin, taşıtın düz hat üzerinde (aliymanda) veya kurbli bölgelerde seyrine göre farklı şartları Şekil 1. a, b, c’de gösterilmiştir. Diğer yandan konik tekerleklerin bir dingile preslenmesiyle oluşan “rijit tekerlek takımının” seyr esnasında dingilde küçük “kinematik osilasyonlar” doğurduğu, Klingel tarafından 1883 yılındaki çalışmasında “sinüs hareketi” olarak tanımlanmıştır [1]. Tekerlek bodeni sinüs hareketi etkisiyle, Şekil 1. d’de gösterildiği gibi dar kurplarda raya tırmanmaya çalışır ve “demiryolu aracında devirici etki” yapar. Bu sinüs dalgası hareketi hem boden hem de taşıtın süspansiyon sistemi tarafından önlenir.



Şekil 1. Tekerleğin farklı seyr şartlarında yuvarlanma yüzeyleri; a) aliymanda, b) kurb dışı yüksek rayda, c) kurb içi alçak rayda [2], d) Raylı taşıt tekerlek takımının sinüs hareketi [3]

Bütün bu etkilerin en aza indirgenmesi için, rayın traverse sağlam bir şekilde tespit edilerek, balast tabakası üzerine oturtulması gereklidir. Rayları traverse tespit edilmesinde kullanılan ray klips sistemlerinden iki örnek Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Vidalamalı elastik bağlantı türleri; a) Vossloh, b) Nabla [4]

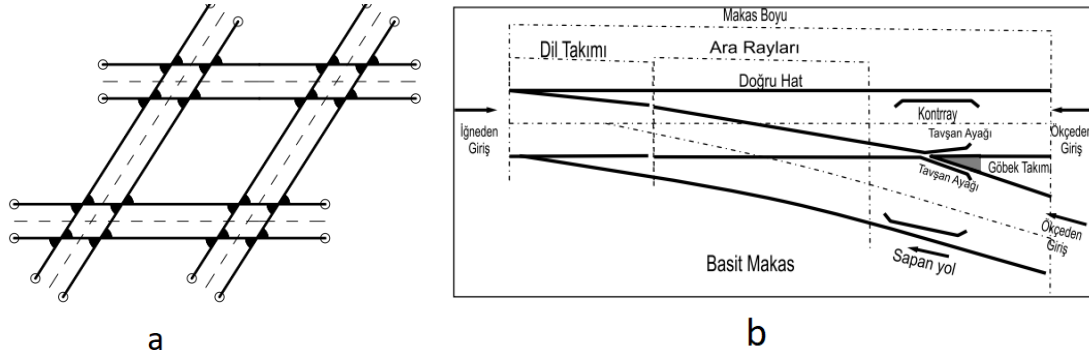
1.1. Raylar, makaslar ve geçiş sistemleri

Demiryolu makasları raylı ulaşım sistemlerinin önemli bileşenlerinden birisi olarak, raylı araçların bir yoldan diğer bir yola geçmesinin sağlayan mekanizmalarıdır. Demiryolu makasları tasarım ve yapım doğası gereği karmaşık sistemlerdir. Bu yüzden makaslar yüksek kaliteli yapım ve bakım gerektirirler [5]. Makasların yapısında, demiryolu rayları ve onları taşıyıcı makas traversler bulunur. Bu mekanizmaların temel bağlantı elemanları; tirfon, selet, gergi kısıkaçı, bulonlar ve somun gibi malzemelerden oluşurken, bu mekanizmalarda emniyetli yön değişimi için kilitleme sistemleri de kullanılmaktadır [6].

Demiryollarında bir hattan başka bir yola geçiş sabit kruvazmanlar ve kontrollü makaslar ile yapılır. Makas kontrolleri manuel (toplu makas) veya TSİ kumanda merkezinden kontrollü motorlu makas türünde olmaktadır.

Kruvazman kesişme noktalarındaki açılar 90° veya farklı değerde ayarlanır (Şekil 3. a). Raylı taşıtlar bu kesişme noktalarından trafik kontrol noktasının denetiminde ve yavaş seyirle geçerler. Makaslar ise türlerine göre; basit, S tipi, İngiliz ve çapraz takımı gibi isimlerle anılırlar. [7].

Basit bir makas, Şekil 3. b’de gösterildiği gibi; dil takımı, göbek takımı ve bunları birleştiren ara raylardan oluşur. Makasların doğru yol rayı ile sapan yol rayının birbirini kestiği noktaya “makas göbeği” denir.



Şekil 3. a) Kruvazman, b) Makas sisteminin elemanları [7]

Makas göbekleri raydan veya manganlı çelikten dökülerek yapılmaktadır. Bu çalışmada R260 kalitede 60E1 raylı 1/9 eğime sahip 190 metre kurp yarıçaplı bir makasa ait, presleme öncesi ön ısıtma gerektiren tavşan ayakları kullanılmıştır.



Şekil 4. Demiryolu makası tavşan ayakları; a) Makas göbeğinde tavşan ayaklarının pozisyonu, b) Tavşan ayaklarının pres bölgelerinin gösterilmesi [6]

Dünya genelinde tercih edilen konvansiyonel demiryolu hatlarındaki demiryolu makaslarında ağırlıklı olarak UIC 60E1 ve UIC 49E1 tipi raylar kullanılmaktadır. Kruvazman ve demiryolu makaslarının üretimi sırasında bazı rayların kurp yarıçapı ve imalat gereklilikleri için kalıcı şekil değişikliklerine uğraması gerekmektedir. Bu şekil değişikliği açının ve kurbun şiddetine göre sıcak (ön ısıtmalı) ve soğuk olarak yapılmaktadır [6].

Makasların üretiminde, makas tipi ve kullanım alanı, kullanım hızı, eğim, makas açısı, dingil yükü ve kurp yarıçapı önemli girdilerdir. Ray üretim akış basamaklarına göre, bu girdiler bir araya getirilerek, tasarlanan makaslar üretime alınır. Makas üretimi aşağıdaki sırayla yapılır:

- ~ Raylar proje boylarına göre kesilir.
- ~ Takoz, dayama sacı ve cebire bileşenleri için ray boyunlarına delik delinir.
- ~ Daha sonra, rayların emniyetli geçiş için yapışma yüzeyleri CNC tezgâhlarda işlenir,
- ~ Makas kurp yarıçapına göre raylar preslenir.

Bu işlemleri takiben raylar, diğer bağlantı elemanları ve traversler ile montajlanıp, makas yapısını kazanırlar. Kurp yarıçapına göre presleme işleminin şiddeti, yarıçap büyüklüğüne ve ray boyuna göre değişiklik gösterir ve presleme işleminin ön ısıtmalı ya da ön ısıtmasız olacağını belirler. Bu makede, ön ısıtmalı pres işleminin rayın mekanik ve kimyasal özelliklerine etkisi incelenecektir.

1.2. Rayların kimyasal ve mekanik özellikleri

Demiryolu raylarının imalatında hipötektoid veya periötektoid perlitik çelikler kullanılır. Uygun ürün şekli için döküm, plastik işleme veya ısıl işlem prosesleri kullanılırken, istenilen profilin ve gerekli mekanik özelliklerin elde edilmesi gerekir. Bu amaçla Avrupa standardı EN 13674-1, dokuz çelik sınıfı ayırt eder; haddelemeden sonra da beş sınıf ray (R200, R220, R260, R260Mn, R320Cr) ve ısıl işlem görmüş dört sınıf ray (R350HT, R350LHT, R370CrHT), ve R400HT şeklinde kullanılmaktadır. Sertlikleri de demiryolu işletmecisinin talebine göre 200 ila 400 HBW arasında geniş ölçüde değişebilmektedir.

R260 kalitesindeki rayların üretimi sırasında fabrikada optik emisyon spektrometresi ile yapılan kimyasal kontroller sonucu bileşimi aşağıdaki gibi olmalıdır [6].

~ Karbon (C)	% C	: 0,60 – 0,80
~ Mangan (Mn)	% Mn	: 0,80 – 1,30
~ Silisyum (Si)	% Si	: 0,10 – 0,50
~ Kükürt (S)	% S	: max. 0,04
~ Fosfor (P)	% P	: max. 0,04

1.3. Literatür araştırması

Bu alanda daha önce aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır:

Tunçay ve Yıldız bildirimlerinde, R260 kalite haddelenmiş ray çeliği imalatının, çeliğinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada; mikro yapı incelemeleri, optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobu görüntüleri, sertlik testi ve çekme testi yapılmıştır. Optik ve tarama elektron mikroskobu görüntülerinde, haddeleme operasyonu esnasında, Ferrit tane boyutunun küçüldüğü, tandem ve bitirme (finish) haddelemesini takiben, Perlitli oluşturan Sementit fazlarının düzenlendiği görülmüş, Sementit faz arası mesafe azalırken, R260 ray çeliğinin çekme özelliklerinin de iyileştiği belirlenmiştir. Tane boyutunun azalmasıyla, makro sertlik, maksimum çekme, akma dayanımı ve % uzama değeri artarken, kırılmış yüzey incelemelerinde, küresel yapı FeO bileşiği yoğun ve homojen olarak dağılmıştır [5].

Kuchuk – Yatsenko et al. çalışmalarında bir ara ek parçası kullanarak makas göbeğinin alın kaynağıyla üretiminin doku analizi yapmışlardır. Kaynaklı makas göbeği üretiminde, niyobyum veya titanyum alaşımlı, kimyasal bileşimi %0,6 C, %17,5 Cr ve %9,5 Ni şeklinde olan östenitik parça, makas göbeği için kaynaklı olarak kullanılmıştır. İlk önce, ray östenitik ek parçaya kaynaklanırken, ek yeri hava soğutmalı olarak 350-100 °C sıcaklıkta 2-5 saat difüzyon tavına tabi tutulur, sonra döküm manganez çekirdek ile kaynaklanmaktadır. Yapılan inceleme sonucunda, ısıl işlemsiz kaynaklı makas göbekleri üretilebileceği ve metalografik incelemeleri ile mangan çeliği ve östenitik ek parçanın kaynaklı eklemenin tehlikeli yapılar olmadığı ve östenitik ek parçanın ray çeliği ile sağlıklı birleştiğini tespit etmişlerdir [8].

Dhar doktora tezinde demiryolu makası ve kruvazman üretiminde kullanılan manganlı çeliklerin mikroyapılarını ve yorulma davranışlarını araştırmıştır. Çalışmada demiryolu makas bölgesinden hizmet dışına çıkarılan parçalar; optik mikroskopi, elektron mikroskobu ve mikro sertlik profilleri dâhil olmak üzere kapsamlı metalografik incelemelerle test edilmiş, yorulma çatlağı ağlarının üç boyutlu haritalanmasında X-ışını tomografisi kullanılmıştır. Testler sonucunda Mangan göbekli ray çeliklerinin çatlak morfolojisinin, perlitik ray çeliklere benzer olduğunu gözlenirken, aşınmış makas göbeklerindeki çatlak yayılmasının taneler arasında olduğu ve göbek rayı yüzeyinden 15 mm derinliklerde de büyük kalıntı gerilmeler olduğu tespit etmiştir [9].

Bąkowski and Piwnik çalışmalarında raylarda kullanılan UIC 860 standardını karşılayan ve aynı kimyasal bileşimdeki Perlitik çeliklerin ısıtılı ve ısıtılmamış durumlarda mekanik özelliklerini test etmişlerdir. Isıtılı işlem sayesinde perlitin morfolojisinde farklılıklar görüldüğü, özellikle de perlitik çeliklerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olan sertlik değeri ile lameller arasındaki mesafe değişmektedir. Lamel arası mesafe ısıtılmamış çelikte 0,4 µm iken, ısıtılı işlem sonucunda bu değerin 0,1 µm değerine değiştiğini saptamışlardır [10].

Rıdvanoğulları et al. ray ve makas üretiminde kullanılan S49 ray çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla; üç adet numune tel erozyon yöntemi ile kesilmiş, üç nokta eğme testi yapılmış, mikroyapı analizleri de taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Sonra da S49 ray çeliğinin kimyasal bileşimini enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile öğrenilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için sertlik testi ve üç nokta eğme testi yapılmıştır. Sonuçta, içyapıda, martenzit bloklar halinde serpiştirilmiş sementit tanelerine rastlanmış, elmas koni uçlu, 10 kgf ön yük ve 150 kgf toplam yükte ölçülen makro sertlik değerlerinin HRC 24,76 olarak ölçülmüş, üç nokta eğme testi ölçümünün ortalaması 1776 MPa olarak hesaplanmıştır. S49 ray çeliği malzemesinin kırılan yüzeyden sonra kırılma eğilimi görülmüş ve kırık yüzey EDS analizi sonucunda numunenin içyapısında Fe, Mn ve C elementlerinin pik noktaları tespit edilmiştir [11].

Shtayger et. al. çalışmalarında yakma alın kaynağı ile elde edilen ray birleştirmelerde hem statik eğilme testleri uygulanmış, hem de bu kısımların işletme şartları sonrasında yüzeyleri kırılarak incelenmiştir. Kırılma yüzeyinin mikro yapısının ve kimyasal heterojenliğinin analizi, bir taramalı elektron mikroskobu JEOL JIB-Z4500 yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, ana yapısal kusurların, kaynaklı bağlantılardaki varlığı kabul edilemeyen zayıf penetrasyonu ifade eden demir-mangan silikatlarının inklüzyonları bulunduğunu göstermiştir. Bu durum kaynaklı bağlantıların mekanik testlerinde kabul edilemez bir durumdur [12].

Hajizad et. al. beynitik demiryolu raylarının mikroyapılarının mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Beynitik çeliklerin mekanik dayanımını tespit için, çekme testi ve sertlik ölçümleri, mikro yapının mekanik davranış üzerindeki etkisinin karakterizasyonu için ışık optik mikroskopi (LOM), taramalı elektron mikroskobu gibi farklı mikroskopi teknikleri (SEM) ve elektron geri saçılım kırınımı (EBSD) kullanılmıştır. Uygulanan izotermal beynitik ısıtılı işlemin beynitik kalitelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılması amacıyla B360, B1400 plus, Cr-Bainitik ve R350HT rayı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, bünyesinde karbürsüz beynitik çeliğin (B360), beynitik ferrit ve östenit çeliklerden daha iyi mekanik dayanım gösterdiğini tespit edilmiştir [13].

Bozkurt deneysel çalışmasında, rayın mekanik özelliklerinin mantar kısmından tabanına doğru değiştiği için R260 rayının mantar, gövde ve taban bölümlerinin tribolojik özellikleri açısından araştırmasını yapmıştır. R260 rayının farklı bölümlerini mikro yapısal, sertlik, tribolojik ve aşınma direnci özellikleri açısından değerlendirmiştir. Disk üzerinde bilye aşınma testlerinden elde edilen sonuçlarına göre, beklendiği gibi en yüksek aşınma direnci R260 rayının mantar kısmında tespit etmiştir. Sonuç olarak R260 rayının mantar, gövde ve taban kısımlarının sürtünme katsayılarını sırasıyla 0,39, 0,35 ve 0,38 olarak tespit etmiştir [14].

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada ön ısıtılı pres işleminin rayın kimyasal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda R260 kalitede UIC 60E1 ray ele alınarak, EN 13674-1 standardında tanımlanan R260 kalitedeki raya ait mekanik ve kimyasal özelliklerdeki değişimler incelenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Aynı şarj numarasına sahip monoblok bir raydan 1 metre uzunluğunda 3 adet parça çıkarılmıştır. Bu raylardan 2 parça ray 500 °C ön ısıtma uygulanarak preslenmiş ve pres bölgelerinden numune alınmıştır. Bir numuneye ısıl işlem uygulanmadan, şekillendirme yapılmıştır. Bu sıcaklık derecesi makas üretiminde tecrübeyle bulunan bir değer olup, bunun altındaki derecelerde rayda çatlak oluşmakta, üstündeki sıcaklıklarda ise preslemede ray formu bozulmaktadır. 3 parça raydan alınan numunelere; çekme testi, uzama testi, sertlik testi, kimyasal kompozisyon testi uygulanmıştır. Elde edilen test sonuçları sertlik değerleri ve birbiri ile kıyaslanarak yorumlanmıştır. Yapılan çalışmada 1 numaralı numuneye(N1) ön ısıtma ve preslenme işlemi uygulanmamış olup 2 ve 3 numaralı(N2-N3) numunelere ise 500 °C ön ısıtma ve presleme işlemleri uygulanmıştır. Numune 2 ve 3 birebir aynı parametrelere maruz bırakılmış raylardır.

2.1. Raylara uygulanan ön ısıtma ve presleme işlemleri

Numuneler aynı şarj numarasına sahip monoblok bir raydan 1 metre uzunluğunda ve 3 adet olarak belirlenmiştir. Bu raylardan bir tanesine ön ısıtma ve pres işlemi uygulanmazken (N1), kalan 2 adet parça raya, merkez noktasından 500 °C ön ısıtma uygulanarak preslenmiştir (N2-N3). Presleme işlemlerinde BAKKER 2000 Ray presleme tezgâhı kullanılmıştır. Bu tezgâhın kenarlarında iki adet sabit çene, ortasında ise 200 mm itme kapasiteli hareketli çene bulunmaktadır. Raylar prese alınmadan hemen önce oksii-asetilen üfleciyle ısıtılmıştır. Isıtılan raylar pres tezgahına yerleştirilerek, sabit çene rayın tam ortasında kalacak şekilde preslenmiştir. Rayların ısıtılma ve presleme işlemleri Şekil 5'te gösterilmiştir.



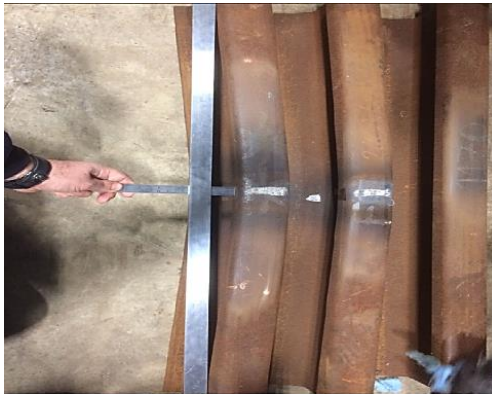
a



b

Şekil 5. Uygulanan ön ısıtma ve pres işlemi a) Ön ısıtma İşlemi, b) Pres işlemi [6]

Ön ısıtmayla raylar merkezden 30 mm itilerek, şekillendirilmiş ve rayda oluşan deplasman miktarı da kalibrasyonlu kumpas ve çelik cetvel yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 6).



a

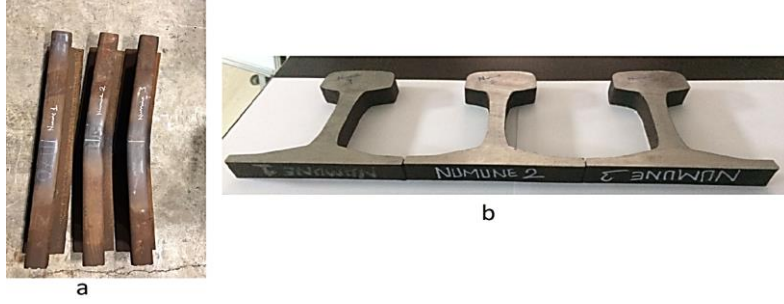


b

Şekil 6. Presleme sonrası ölçü kontrolü; a) Preslenen raylar, b) Ölçü kontrolü [5]

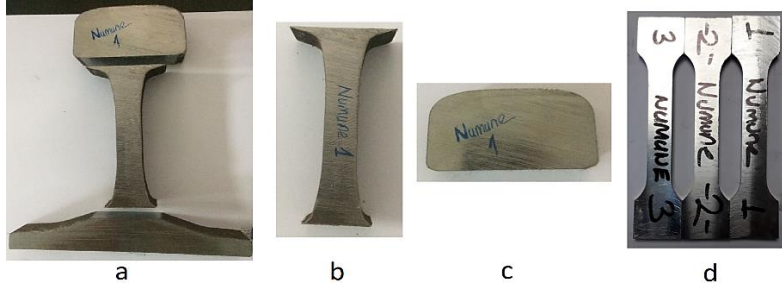
Ön ısıtma ve pres işlemine maruz bırakılmayan ray numune 1(N1) olarak adlandırılmıştır. 500 °C ön ısıtma işlemine ve pres işlemine maruz bırakılan diğer iki ray ise sırası ile numune 2(N2) ve numune 3(N3) olarak adlandırılmıştır (Şekil 7. a). 1 no'lu numunenin merkezinden, 2 ve 3 no'lu numunelerinde, pres merkezlerinden Bekamak marka şerit testere kullanılarak 25 mm genişliğinde kesitler alınmıştır (Şekil 7. b).

Şerit testereyle üretilen numune kesitleri, kimyasal kompozisyon testi, sertlik testi ve mekanik testler için ray mantarı ve ray boynu olmak üzere parçalara ayrılmıştır (Şekil 8. a, b, c).



Şekil 7. a) Numunelerin adlandırılması, b) Numune kesitleri [5]

Kimyasal kompozisyon testi ve sertlik testi ray mantarı üzerine istenen yüzey kalitesi sağlandıktan sonra direkt olarak uygulanırken, çekme mukavemeti ve uzama testi ise, ray mantarından talaşlı imalat ile alınan papyon numuneler üzerinde yapılmıştır (Şekil 8. d).



Şekil 8. Numune kesitlerinin parçalara ayrılmış hali, a) Rayın kısımlara ayrılması, b) Rayın boyun kısmı, c) Rayın mantar kısmı, d) Rayın mantarından alınan çekme numuneleri [5]

2.2. Raylara uygulanan testler

Raylara; kimyasal kompozisyon testi, sertlik testi ve çekme-uzama testi olmak üzere üç farklı test uygulanmıştır. Ray mantarına uygulanacak bu testler için ilk olarak Şekil 9'da gösterilen Struers LaboPol-5 tezgâhında, deney numunelerine zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Bu işlemle şerit testere ile kesilen raya ait pürüzlü yüzeylerin teste uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 9. Struers LaboPol-5 Zımparalama ve parlatma cihazı [5]

Kullanılan zımparalama ve parlatma makinasında 50 – 500 dev/dk hıza sahip bir dönen tabla bulunmaktadır. Bu tablaya “değiştirilebilir zımpara kâğıtları” takılarak, numune yüzeyi kimyasal kompozisyon testine ve sertlik testine uygun hale getirilmiştir. Bu işlemi takiben numuneler, 30 elementin hassas ölçümünü yapabilen Foundry Master Smart optik emisyon spektrometresinde analiz edilmiştir. Bu cihaz, numune bileşiminde bulunan elementlerin argon gazı ile yakılması ile edilen emisyonu optik sistemi sayesinde dalga boylarına ayırmakta, her elementin dalga boyu farklı olduğundan optik sistem içerisinde bulunan dedektör, her dalga boyu için ışığın yoğunluğunu ölçmektedir.

Kimyasal kompozisyon testi Şekil 10’da gösterilen Foundry Master Smart optik emisyon spektrometresi ile yapılmıştır. Test ile 500 °C ön ısıtmalı ve presleme yapılmayan 1 numaralı numune ile, ısıtma ve presleme parametrelerine maruz kalan 2 ve 3 numaralı numuneler sırasıyla optik emisyon spektrometresinde analiz edilmiştir.



Şekil 10. Optik Emisyon Spektrometresi; a) Spektrometre dış görünümü ve deneye hazırlık
b) Spektrometreye numunenin bağlanması ve deney aşaması [5]

Yüzeylerin bir tarafına kimyasal kompozisyon testi yapılırken, diğer yüzeyleri de sertlik testinde kullanılmıştır. Ray numuneleri Emcotest Durajet sertlik ölçüm cihazında incelenmiştir (Şekil 11). 1 – 250 kg arasında değişen yüklerle cihazın hareketli yük uygulama bileşeninin numune üzerinde bıraktığı yük izinin çapı otomatik olarak ölçülerek, numunelerin sertlik değerleri elde edilmiştir.



Şekil 11. Emcotest Durajet sertlik ölçüm cihazı; a) Sertlik ölçüm cihazı dış görünüşü b) Numunelerin sertliğinin ölçülmesi [5]

Çekme ve % Uzama Testi ,500 °C ön ısıtma ve pres işlemine maruz kalmayan raydan alınan numune 1 ile ısıtma ve presleme parametrelerine maruz kalan numune 2 ve numune 3’e ait papyon numunelerin presleme merkezinden alınmıştır. Numunelerin çekme testi ve % uzama testi sonuçları, 600 kN test kuvvetine sahip Zwick Roell Z600E test cihazında incelenmiştir.

3. Deneysel Bulgular ve Sonuçlar

Deneysel çalışmalar kapsamında; kimyasal kompozisyon testi, sertlik testi, çekme mukavemeti ve % uzama testleri uygulanmıştır.

3.1. Kimyasal kompozisyon testi

Analiz sırasında numunelere 6 – 9 adet yakma işlemi uygulanmıştır. Elde edilen test sonuçları yakma bölgelerine göre numunelerin kendi içerisinde ve birbiri arasında incelenmiştir. Test sonrası numunelerin son biçimleri Şekil 12’de gösterilmektedir.



Şekil 12. Analiz sonrası numunelerin görünüşü [5]

Numunelerin alındığı raya ait 3.1 sertifika değerleri ve uygulanan parametrelere göre elde edilen analiz değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Numunelerin kimyasal kompozisyon değerleri [5]

	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Al
Sertifika	0,730	1,08	0,31	0,017	0,009	0,040	0,015	0,030	0,030
Numune 1	0,736	1,06	0,34	0,012	0,006	0,034	0,036	0,022	0,029
Numune 2	0,717	1,04	0,34	0,015	0,005	0,034	0,037	0,023	0,029
Numune 3	0,712	1,03	0,35	0,016	0,006	0,035	0,036	0,024	0,029

Sertifika değerleri ile ön ısıtma ve presleme işlemi uygulanmayan numune 1’den alınan test sonuçlarında benzerlik vardır. Ön ısıtma ve presleme işlemi yapılan numune 2 ve 3’ten alınan test sonuçlarına sertifika değerleriyle karşılaştırıldığında, % C miktarında 0,024 ve % Mn miktarında da 0,03 oranında azalmalar görülmüştür [6]

3.2. Sertlik testi

Numunelerin Brinell sertlik değerleri, ray mantarının 5 farklı bölgesinden ölçülerek Tablo 2’de gösterilmiş olup numuneler üzerindeki yük izleri de Şekil 13’te gösterilmiştir.

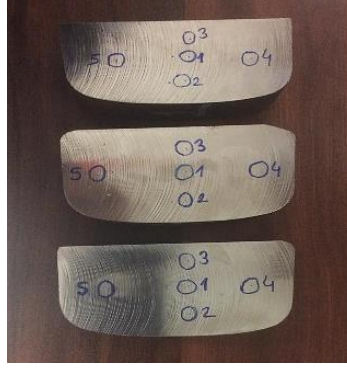
Tablo 2. Numunelerin ölçülen Brinell (HBN) sertlik değerleri [6]

	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ortalama
Numune1	285	298	292	298	278	290
Numune2	298	292	292	298	292	294,4
Numune3	285	278	292	285	285	285

Numunelerden ölçülen sertlik değerlerinin 260 – 300 HBN arasında görülmesi, sertliklerin malzeme sınır değerleri içinde olduğu göstermektedir. Aynı numunedan alınan 5 farklı ölçümü takiben ortalama sertlik değerleri arasındaki değişim ± 5 HBN olarak bulunmuştur [6].

3.3. Çekme mukavemeti ve % uzama testi

Standartlara göre 60E1 R260 kalitedeki bir rayın çekme mukavemeti minimum 880 MPa, % uzama değeri ise, minimum %10 olmalıdır. Ön ısıtma ve pres işlemine maruz kalmayan 1 numaralı numunenin çekme mukavemeti 990 MPa iken, ön ısıtma ve pres işlem uygulanan 2 ve 3 numaralı numunelerin çekme mukavemeti yaklaşık %2 artarak, 1.007 MPa ve 1.002 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 13. Numuneler üzerindeki yük izleri [6]

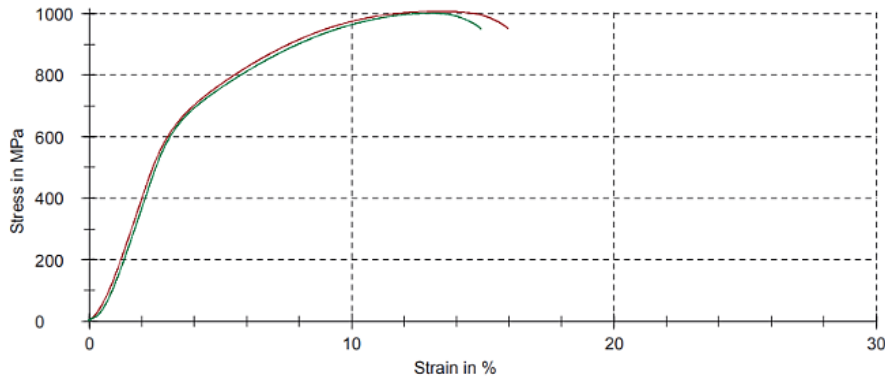
Numunelere ait % uzama değerleri ise, minimum %10 sınırının üzerinde ölçülmüş olup, %2'ye varan kayıplar tespit edilmiştir [6].

Numunelerin alındığı raya ait sertifika değerleri ve uygulanan parametrelere göre elde edilen analiz değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Numunelerin çekme ve % uzama değerleri [6]

	Çekme Kuvveti (MPa)	Uzama (%)
Ray Sertifika Değeri	994	12,8
Numune 1	990	11,8
Numune 2	1.007	11,3
Numune 3	1.002	10,2

2 ve 3 numaralı numunelere ait çekme testi grafikleri Şekil 14'te gösterilmiştir. N1 standart R260 çeliği olduğundan, deney yapılmayarak, grafikte gösterilmemiştir.



Şekil 14. Numune 2 ve numune 3 çekme deneyi grafikleri [6]

4. Sonuçlar ve Öneriler

4.1. Sonuçlar

Demiryollarının en önemli bileşenlerinden olan demiryolu makaslarının üretimi sırasında raylara uygulanan 500 °C ön ısıtma ve 1 metrede 30 mm itme kuvvetinin rayların mekanik ve kimyasal özellikleri üzerine etkisi bu makalede incelenmiştir. Çalışmada R260 kalitedeki 60E1 ray kullanılmıştır. 500 °C ön ısıtma ve 1 metrede 30 mm itme kuvvetine maruz kalan ray numunelerin 2 ve 3 numaralı numune olarak adlandırıldığı, hiçbir işleme maruz kalmayan ray numunesinin ise, 1 numaralı numune olarak adlandırıldığı bu çalışmada, kullanılan raya ait 3.1 sertifikası dikkate alınmıştır. Üretici firmaların 3.1 sertifikası verebilmesi için, kendi bünyesinde yeterlilik belgesine ve kalibrasyonlu test cihazlarına sahip laboratuvarının olması ve en az bir yetkilisinin olması gerekmektedir. Parametrelere maruz kalan demiryolu rayları EN 13674-1 standardında belirtilen sınır değerlerine göre incelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda;

- ~ Optik emisyon spektrometresi test sonuçlarına göre, ön ısıtmalı pres işlemi uygulanan raylardan alınan test numunelerinin kimyasal kompozisyondaki karbon ve mangan değerinin %2 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- ~ Ön ısıtma ve pres işlemi uygulanan rayların test numunelerinin test sonuçlarına göre çekme mukavemeti değerleri %1,7 artarak 1.007 MPa ve %1,2 oranında artarak 1.002 MPa olarak ölçülmüştür.
- ~ Ön ısıtma ve presleme işlemi sonrasında % uzama değerlerinde ön ısıtma ve presleme işlemi sonrasında %2'ye varan kayıplar tespit edilmiştir.
- ~ Sertlik deneyleri sonuçlarında bütün ölçümler 278 – 298 HBN aralığındadır.

4.2. Tartışma ve Öneriler

Test sonuçlarının ışığında aşağıdaki hususlar tartışılmıştır:

Sertlik deneyleri sonuçlarının 278-298 HBN arasında ve ortalamalarının 285-294,4 HBN aralığında çıkması, Tekerlek-Ray etkileşimi sonuçlarının araştırılmasını gündeme getirmektedir. TS EN 13262 + A2 “Demiryolu uygulamaları - Tekerlek takımları ve bojiler - Tekerlekler - Mamul özellikleri” standardında belirtilen “İspit sertlik karakteristikleri” ER6 - ER9 tipi tekerlekler için kategori 1 ve 2 olarak sertlik değerleri vermektedir. Sertlikler kategori 1 için 245 HBN iken, kategori 2’de 225-255 HBN arasında değişmektedir. TCDD’nin hat yenilemesi yapılan bölgelerinde, son 5-7 yılda demiryolu tren işletmecilerince (DTİ), hem yük ve hem de yolcu vagonlarında gözlemlenen “yoğun ve hızlı tekerlek aşınması” durumu sektörel bir sorundur.

Yapılan öneriler şunlardır:

- ~ Tekerlek-Ray etkileşiminin sertlik değerleri bağlamında araştırılması, TCDD’nin ray spesifikasyonları ile TÜRASAŞ’ın tekerlek teknik şartnamelerinin yeniden gözden geçirilmesinde fayda vardır.
- ~ Presleme öncesi yapılan ön ısıtma işleminin 500 °C değerinin altında ve üstündeki küçük değer farklarıyla nasıl etki yapacağı sonraki çalışmalarda incelenmeli, bu şartlarda mikroyapı görüntüleri elde edilmelidir.
- ~ Ön ısıtma ile elde edilen yüzeyler SEM mikroskobu ile incelenerek, ön ısıtma ve preslemenin malzeme mikro yapısı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- ~ Demiryolu rayları ile demiryolu taşıt tekerlekleri arasındaki sertlik farkının değişiminin aşınma üzerindeki etkilerinin incelenmesi yararlı olacaktır.

Kaynakça

- [1] M. Antali, G. Stepan, & S.J. Hogan, “Kinematic oscillations of railway wheelsets,” *Multibody Syst Dyn* 34, 259–274, 2015
- [2] K. Tzanakakis, *The railway track and its long term behaviour - a handbook for a railway track of high quality*. Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg, 2013
- [3] C. Esveld, *Modern railway track*. Digital Edition, MRT Productions, Zaltbommel- The Netherlands, 2014
- [4] Ş. Günoral, *Demiryolu hatlarının döşenmesi (poz)*. Karabük Üniversitesi Yayını, Karabük, 2019
- [5] T. Tunçay ve M. Yıldız, “R260 ray çeliğinin haddeleme operasyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi,” *ISERSE’18, IV. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu*, Karabük, 2018
- [6] U. Emre Bingöl, “Demiryolu makaslarının üretiminde raylara uygulanan 500 °C ön ısıtma ve pres işleminin rayın mekanik ve kimyasal özelliklerine etkisi,” *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2022
- [7] Anonim, *Makaslar, Raylı Sistemler Teknolojisi Alanı*, MEB Yayınları, Ankara, 2014.
- [8] S. I. Kuchuk-Yatsenko, Yu V. Shvets, E. A. Dumchev V. I. Shvets, Ya I. Mikitin, S. D. Taranenko, N. N. Nikitina, “Flash-but welding of railway frogs with rail ends using an intermediate insert,” *The Paton Welding Journal*, International Association Welding, Kiev, Ukraine, 2005
- [9] S. Dhar, “Microstructure and fatigue properties of railway steels for switches and crossings,” Ph.D., Technical University of Denmark, Denmark, 2019
- [10] H. Bąkowski and J. Piwnik, “Quantitative and qualitative comparison of tribological properties of railway rails with and without heat treatment,” *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 61, iss. 2A, pp. 469-474, 2016, doi: 10.1515/amm-2016-0037
- [11] A. Rıdvanogulları, T. Çetin, M. Akkaş, “Experimental investigation of the mechanical and microstructure properties of S49 rail steel,” *European Journal of Technique*, vol. 11, no.1, pp. 43-46, 2021, doi: doi.org/10.17694/ejt.812142
- [12] M. G. Shtayger et al., “Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* vol. 560, 012190, June 2019, doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012190
- [13] O. Hajizad, et al., “Influence of microstructure on mechanical properties of bainitic steels in railway applications,” *Metals*, vol. 9, iss. 7, pp. 778-797, July 2019, doi:10.3390/met9070778
- [14] F. Bozkurt, “Investigation of tribological properties of head, web and foot sections of R260 rail,” *Railway Engineering*, no. 17, pp. 107-114, Jan. 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1166068

Özgeçmiş

**Mehmet Emin AKAY**

1952 yılında İzmir’de doğmuştur. Gazi Üniversitesi Otomotiv Eğitimi Bölümünde 1975’te lisans, 1996’da yüksek lisans ve Kırıkkale Üniversitesinde 2005’te doktora eğitimini tamamlamıştır. 1987 – 2009 arası Kırıkkale Üniversitesinde öğretim görevlisi, 2009 – 2011 arası Bartın Üniversitesinde, 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 çok sayıda yayını vardır. 2015 yılından bu yana KBÜ Raylı Sistemler Mühendisliğinde Program Başkanı olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: eminakay@karabuk.edu.tr

Umut Emre BİNGÖL

1991 yılında Karabük’te doğmuştur. İlk, orta ve lise öğretimini aynı ilde tamamladı. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde 2013 lisans, Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde 2022 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2015 yılından bu yana MZA Demiryolu Makas Fabrikasında Üretim Müdürü olarak görev almaktadır.

E-Posta: uebingol@gmail.com

**Anıl RIDVANOĞULLARI**

1992 tarihinde Hatay’da doğmuştur. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği Programında 2016 lisans, 2018 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2016 – 2019 yılları arasında aynı programda yarı zamanlı öğretim elemanı olarak görev yaptı. Yazarın demiryolu araç bileşenleri ve demiryolu hat yapısıyla ilgili ulusal ve uluslararası olmak üzere yayınları mevcuttur. 2019 yılından bu yana Muş Alparslan Üniversitesi Raylı Sistemler Yol Teknolojisi Programında Program Başkanı olarak görev almaktadır.

E-Posta: a.ridvanogullari@alparslan.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Bir Metro Hattında Araç Kapasitesinin Artırılmasının Orta Gerilim ve Cer Sistemleri Üzerine Etkileri

Zennure YENER*¹, Özcan KALENDERLİ²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*yener21@itu.edu.tr

(Alınış/Received: 12.05.2023, Kabul/Accepted: 30.05.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Özet: Metro hatları büyük şehirlerin ulaşım ağlarında önemli bir yer tutmaktadır. İnsanların yoğunlukla kullandığı bu hatlarda artan yolcu talebini karşılamak amacıyla yeni hatlar yapılması, mevcut hatların da tren sefer sıklıkları artırılması, daha konforlu ve daha fazla yolcu kapasiteli araçlar kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Araç kapasitesinin ve işletme parametrelerinin değiştirilmesinin orta gerilim ve cer sistemi üzerine etkileri olmaktadır. Bu etkilerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, güvenli bir toplu taşıma sisteminin devamlılığı için önemlidir. Bu araştırma yazısında, işletilmekte olan M1A hattının bir bölümünde, mevcutta 4'lü dizi 180 s sefer sıklığı aracın yapılan işletme, Hi-SimuX ve SimuX programı kullanılarak 90 s sefer sıklığı 4'lü ve 5'li dizilerdeki araçlar ile hat kapasitesi artırılarak analiz edilmiştir. Üç farklı araç tipi ile yapılan analizlerde, ilave trafo merkezlerinin gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte literatürde yer alan eko sürüş tekniklerinde yaklaşık %20, yol tasarımının iyileştirmesi ile yapılan analizlerde yaklaşık %10 enerji tasarrufu sağlanırken araç seçimi ile %50'ye varan enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemler, Araç kapasitesi, Entegrasyon, Orta gerilim, Cer gücü sistemi

The Effects of Increasing Vehicle Capacity on Medium Voltage and Traction Systems in a Metro Line

Abstract: Metro Lines have an important place in the transportation networks of big cities. In order to meet the increasing passenger demand on these lines, which are used by people intensively, new lines are being built, train services of existing lines are becoming more frequent, and studies are being carried on using vehicles with more comfortable and more passenger capacities. Changing the vehicle capacity and operating parameters affects the medium voltage and the traction system. An accurate assessment of these impacts is important for the continuity of a safe public transport system. In this research paper, in a section of the M1A line, the current 4-series 180 s flight frequency was analyzed by increasing the line capacity with the vehicles in the 90 s series by using the Hi-SimuX and SimuX program. Analysis of three different vehicle types revealed the need for additional substations. However, it has been seen that approximately 20% energy savings can be achieved in eco driving techniques in the literature, approximately 10% in analyzes made with the improvement of road design, while up to 50% energy savings can be achieved with vehicle selection.

Keywords: Railway systems, Vehicle capacity, Integration, Medium voltage, Traction power system

1. Giriş

Ülkemizde raylı sistemlerin en fazla ihtiyaç duyulduğu şehirlerin arasında yaklaşık 16 milyon nüfusu ile İstanbul gelmektedir. Trafik yoğunluğunun artması, karayolu taşımacılığına nazaran çevreye olan olumsuz etkileri dikkate alındığında güvenli ve hızlı bir ulaşım aracı olan raylı sistemlere olan ilgiyi artırmaktadır. İstanbul'da raylı taşımacılık oranı % 41,9'leri bulmaktadır [1]. Raylı sistem yatırımları büyük bütçeler gerektirir.

Atıf için/Cite as: Z. Yener, Ö. Kalenderli, "Bir metro hattında araç kapasitesinin artırılmasının orta gerilim ve cer sistemleri üzerine etkileri," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 86-97, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1296406

Ülkemizde demiryolu tarihi, ilk olarak 1856 yılında 130 km İzmir-Aydın demiryolu hattının açılmasıyla başlamıştır. 1869 yılında İstanbul'da Karaköy Tüneli olarak bilinen ilk tünel çalışması başlatılmıştır. Karaköy Tünelinden sonra 1989 yılında İstanbul hafif metro hattı ve 1992 yılında Konya hafif metro hatları hizmete başlamıştır [2]. 1869 yılında İstanbul'da Karaköy Tüneli olarak bilinen ilk tünel çalışması başlatılmıştır.

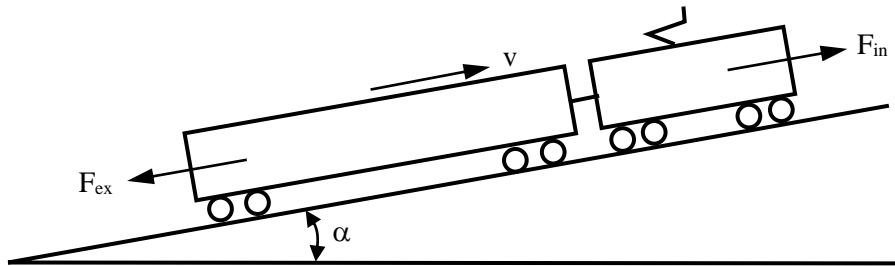
Raylı sistemlerin en temel konusu tren hareketini sağlamaktır. Elektrik enerjisi yerel şebekeden indirici trafo merkezi tarafından gerilim seviyesi ihtiyacına göre ayarlanmaktadır. Daha sonra bir ring şebeke yapısıyla trenin elektrik ihtiyacı kurulan Cer Gücü Trafo Merkezleri ile sağlanmaktadır. Artan yolcu talebinin karşılanması, araç kapasitesinin artırılması veya tren sefer aralığının azaltılmasıyla sağlanabilmektedir. Bu çalışmada işletilmekte olan M1A hattındaki Yenikapı Otogar istasyonu arasında tren sefer sıklığı azaltılarak ve farklı tip araçlar kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmış ve enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. Trafo merkezlerinin devrede olduğu durumlar ve tek trafo devre dışı durumları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Aynı zamanda mevcut hattın kapasite ihtiyacının sağlanabilmesi için ilave trafo ihtiyaçları belirlenerek simülasyonlar tekrarlanarak sonuçları paylaşılmıştır. Literatürde mevcut hatların ETAP [3], MATLAB [4] gibi çeşitli simülasyon programlarında tren sabit bir yük kabul edilerek, yük akışı analizleri yapılarak mevcut durumla karşılaştırması yapılmıştır. Enerji optimizasyonu ile ilgili literatür çalışmalarında eko sürüş teknikleri, rejeneratif enerjiden daha fazla yararlanma [5], güzergâh seçimlerine yer verilmiştir [6]. Bu çalışmada literatürden farklı olarak mevcut hattın araç kapasitesi artışı farklı tip araç verileri kullanılarak tren yükü hareketli bir yük olarak Hi-SimuX ve SimuX programında analiz edilmiştir ve enerji tasarrufu yapabilmek için araç verisinin önemi vurgulanmıştır.

2. Metot

Bu bölümde tren hareketini hesaplamaya yönelik formüller verilmiştir. Tren hareketi hattın geometrik yapısı ve tren çekiş sistemi karakteristiklerine bağlıdır. Trenin hareketi en basit şekilde Newton'un hareket denklemi (Denklem 1) ile tanımlanabilmektedir.

$$\sum_{i=0}^n F = m * a \quad (1)$$

Bu denklemde F trene etki kuvvet, m trenin kütlesidir, a ise ivmedir.



Şekil 1. Hat üzerinde tren hareketi [7]

- F_{in} : Tren çekiş kuvveti
- F_{ex} : Trene ters yönde etki eden direnimsel kuvveti
- v : Tren hızı
- α : Eğim

Şekil 1'den F kuvveti Denklem 2 ile

$$F = F_{in} - F_{ex} = m \cdot a \quad (2)$$

olur. Trene ters yönde etki eden direnimler Denklem 3'teki gibi yazılırsa

$$F_{ex} = F_r + F_{gr} + F_c \quad (3)$$

denklemini olur. Bu denklemde F_r trenin direnimi, F_{gr} eğimlerden kaynaklı direnim ve F_c kurplardan kaynaklı direnimdir. F_r trenin direnimi, Denklem 4'teki gibi

$$F_r = A + Bv + C \cdot v^2 \quad (4)$$

olarak yazılır [8]. Burada A katsayısı yüke bağlı bir değişkendir, B katsayısı hat ve tren kararlılığına bağlı bir değişken, C katsayısı ise aerodinamik direnç değişkenidir. $A + B \cdot v$ genellikle hareket direnimi, $C \cdot v^2$ ise aerodinamik direnim olarak ifade edilmektedir. Araç imalatçıları F_r formülünü farklı şekilde verebilmektedir. Örnek bir formül ve katsayılar Denklem 5'te verilmiştir.

$$F_r = 6,4 m + 130 n + 0,14 m V_t + \beta \text{ktünel} [0,046 + 0,0065(N - 1)] A V_t^2 \quad (5)$$

Bu denklemde

V_t : Tren hızı (km/s)

m: Trenin kütlesi

n: Aks sayısı

N: Araç sayısı

A: Trenin ön alanı

β ktünel: Katsayı (tren açık hatta ise 1, tünelde ise genel olarak 1,5 alınmaktadır).

F_{gr} eğimlerden kaynaklı direnim, Denklem 6 ile

$$F_{gr} = m g \sin(\alpha) \quad (6)$$

denklemini ile; F_c kurplardan kaynaklı direnim, Denklem 7 ile

$$F_c = k_e / (r \cdot 10^{-3}) mg \quad (7)$$

denklemini ile verilir. Denklem 7'deki k_e katsayısı için Tablo 1'deki değerler kullanılmaktadır.

Tablo 1. Ray genişliğine bağlı k_e katsayısı [7]

Ray Genişliği (mm)	k_e (m)
1435	750
1000	530
750	400
600	325

2.1 Kullanılan standartlar

Raylı sistemlerin tarihi boyunca cer motorlarındaki teknolojik gelişmeler ile farklı gerilim seviyelerinde ve frekanslarda enerji sistemleri kullanılmıştır. 15 kV AC 16 2/3 Hz İsviçre ve Almanya'da, 25 kV AC 50 Hz hızlı tren hatlarında, 2 x 25 kV AC 50 Hz Fransa'da kullanılmıştır. Metrolarda genelde 750 V DC, 1500 V DC gerilim seviyeleri daha fazla kullanılmaktadır. Bununla birlikte Almanya, İngiltere, Fransa, Japonya gibi ülkelerde 600 V DC, Moskova'da 825 V DC gibi farklı gerilim seviyeleri de kullanılmaktadır [9], [10], [11]. EN 50163 ve IEC 60850'e göre izin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. EN 50163 ve IEC 60850 standartlarına göre izin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri [12], [13], [14]

Gerilim Türü	U_n (V)	U_{nmin2} (V)	U_{nmin1} (V)	U_{max1} (V)	U_{max2} (V)	U_{max3} (V)
DC 600 V	600	-	400	720	800	1015
DC 750 V	750	-	500	900	1000	1270
DC 1,5 kV	1500	-	1000	1800	1950	2540
DC 3,0 kV	3000	-	2000	3600	3900	5075
AC 15 kV 16,7 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24300
AC 25 kV 50 Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38759

U_n : Anma (nominal) gerilim

U_{nmin1} : En düşük sürekli gerilim

U_{nmax1} : En yüksek sürekli gerilim

U_{min2} : En düşük geçici gerilim (maksimum 2 dakika)

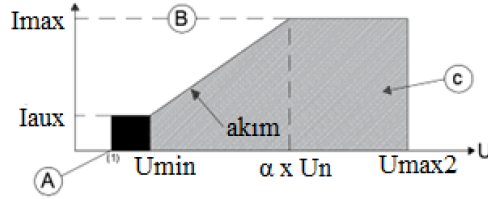
U_{max2} : En yüksek geçici gerilim (maksimum 5 dakika)

U_{max3} : Aşırı gerilim (20 ms'den uzun)

EN 50329 standardına göre çalışma sınıfı VI olan trafoların % 150 yüke 2 saat, % 300 yüke 1 dakika sınıfı V olan trafoların ise % 150 yüke 2 saat, % 200 yüke 1 dakika sınır kapasiteleri belirtilmiştir [14].

EN 50122-1 standardına göre ray gerilimin alabileceği değer 300 saniyeden büyük değerler için 120 V, 1 saniye için 160 V'dur [15].

Araçlarda gerilime bağlı cer akımı sınırlaması için kullanılan grafik Şekil 2'de verilmiştir. 750 V DC için 600 V DC de cer akımı maksimum değerini almakta ve bu gerilim seviyesinden sonra cer akımı sınırlandırılmaktadır.



- (A) Cer yok 750 V DC için $\alpha = 0,8$
- (B) Akım seviyesi aşıldı
- (C) İzin verilen akım seviyeleri

Şekil 2. EN 50388'e göre katener hat gerilimine karşı tren akımının izin verilen çalışma aralıkları [16]

2.2. Simülasyon verileri

Hem tren hareketlerinin hem de demiryolu güç kaynağı şebekesinin aynı anda hesaplanmasına olanak sağlayan, güçlü bir kullanıcı ara yüzüne sahip İTÜ Teknokent'te yerleşik HI-SIM Teknoloji Mühendislik firması tarafından geliştirilen Hi-SimuX ve SimuX yerli yazılımları kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında araç verileri, hat verileri, işletme verileri, güzergâh boyunca eğimler, kurplar, hız kısıtlamaları, işletme hızı veri olarak girilmiştir. M1A hattında

maksimum %5,70 eğimin olduğu görülmektedir. İstasyonda bekleme süresi 25 s, istasyona yaklaşma hızları 40 km/s olarak kabul edilmiştir.

M1A-M1B metro hattında; 19 adet trafo merkezi ve 6 adet indirici merkez girişi bulunmaktadır. Sözleşme güçleri, Yenikapı 25000 kW, Ulubatlı 4800 kW, Sağmalcılar 6000 kW, Yenibosna 5200 kW, Havalimanı 5000 kW, Bağcılar 26000 kW olmak üzere toplam 6 adet Bedaş enerji beslemesi bulunmaktadır [3]. Simülasyonun yapıldığı Yenikapı - Otogar arasındaki trafolarla ait bilgiler Tablo 3’de, istasyon bilgileri Tablo 4’te verilmiştir.

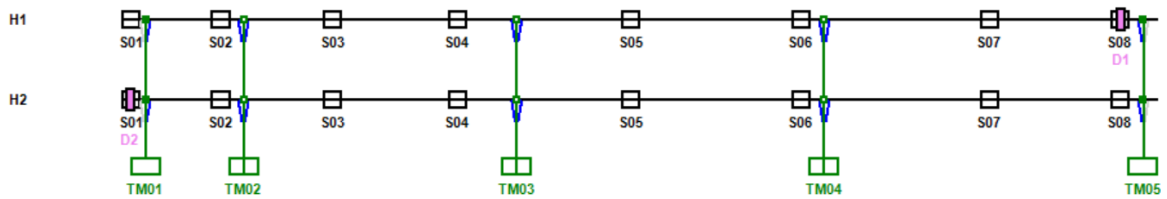
Tablo 3. M1A- M1B Yenikapı- Otogar trafo bilgileri [17]

Cer Trafo Merkezi	Doğrultucu Gücü (kVA)	Aşırı Yük Sınıfı
Yenikapı TM	1 x 2100	VI
Aksaray TM	2 x 2100	V
Ulubatlı TM	2 x 2100	V
Sağmalcılar TM	2 x 2100	V
Otogar TM	2 x 2100	VI

Tablo 4. M1A- M1B Yenikapı- Otogar arası istasyon bilgileri [18]

İstasyon Adı	Kısaltma	H1 Orta Nokta [m]	H2 Orta Nokta [m]
Yenikapı	YNK	66	66
Aksaray	AKS	819	826
Emniyet	EMN	1759	1765
Ulubatlı	ULU	2805	2814
Bayrampaşa	BAY	4265	4267
Sağmalcılar	SAH	5692	5694
Kocatepe	KOC	7275	7284
Otogar	OTO	8371	8377

Mevcut hatta ait şematik gösterimi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Yenikapı- Otogar hattı genel görünümü

S01: Yenikapı, S02: Aksaray, S03: Emniyet, S04: Ulubatlı, S05: Bayrampaşa, S06: Sağmalcılar, S07: Kocatepe, S08: Otogar istasyonlarıdır.

TM01: Yenikapı, TM02: Aksaray, TM03: Ulubatlı, TM04: Sağmalcılar, TM05: Otogar trafo merkezidir. Hattın uç noktalarındaki TM'lerde 1 trafo + doğrultucu grubu ve 2 adet hat çıkış fider kesicisi bulunmaktadır. Diğer TM'lerde 2 trafo + doğrultucu grubu ve 4 adet hat çıkış fider kesicisi bulunmaktadır. Normal işletme durumu 90 s sefer sıklığına ve tek trafo merkezinin (trafo + doğrultucu setlerinin ve tüm hat çıkış fider kesicileri) devre dışı kalma durumu ise 120 s sefer sıklığına süresine göre analiz edilmiştir.

Normal katener sistemi km direnci 44,4 miliOhm olarak alınmıştır. Proje kapsamında kullanılan S49 tek hat normal ray direnci km 20,5 miliOhm olarak alınmıştır. İki hatta ait 4 ray 250 m'de bir paralelleme olduğu katener hattında paralelleme bulunmadığı kabul edilmiştir.

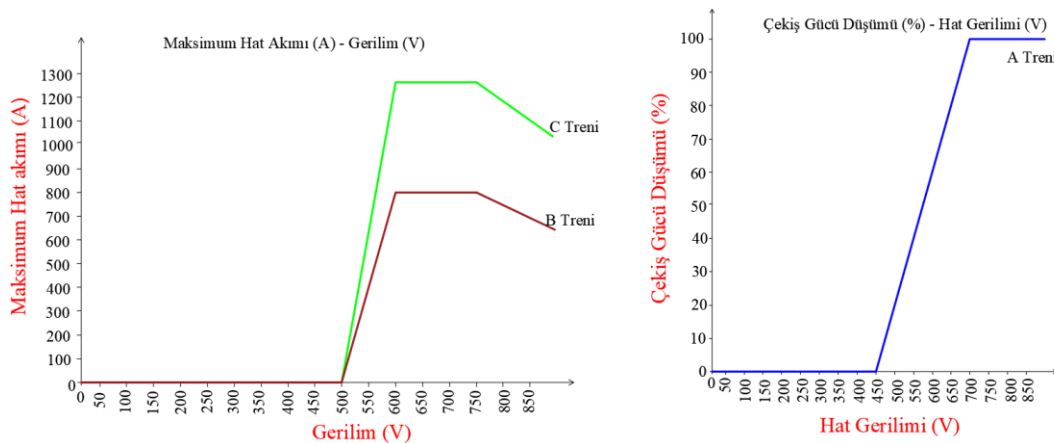
Simülasyonda kullanılan araç tipleri sembolik olarak adlandırılmıştır. A treni 5'li dizi, B treni 5'li dizi ve C treni 4'lü dizi kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan araçlardan birisi mevcut hatta 4'lü dizi olarak 180 s sefer sıklığı ile işletilmektedir. Her bir parametre ve eğri tek bir araç için verilmiştir. Trenlerin yardımcı güç sistemi sürekli %50'si yüklenecek şekilde hesaba katılmıştır.

Tüm trenlerde 70 kg ağırlığında 1250 yolcu bulunduğu kabul edilmiştir. B ve C trenlerinin gerilime bağlı cer akımı sınırlama eğrisinin, EN 50388 standardına uygun olduğu kabul edilmiştir [16]. A trenlerinde gerilime bağlı akım sınırlamasından farklı olarak gerilime bağlı cer kuvveti sınırlaması bulunmaktadır.

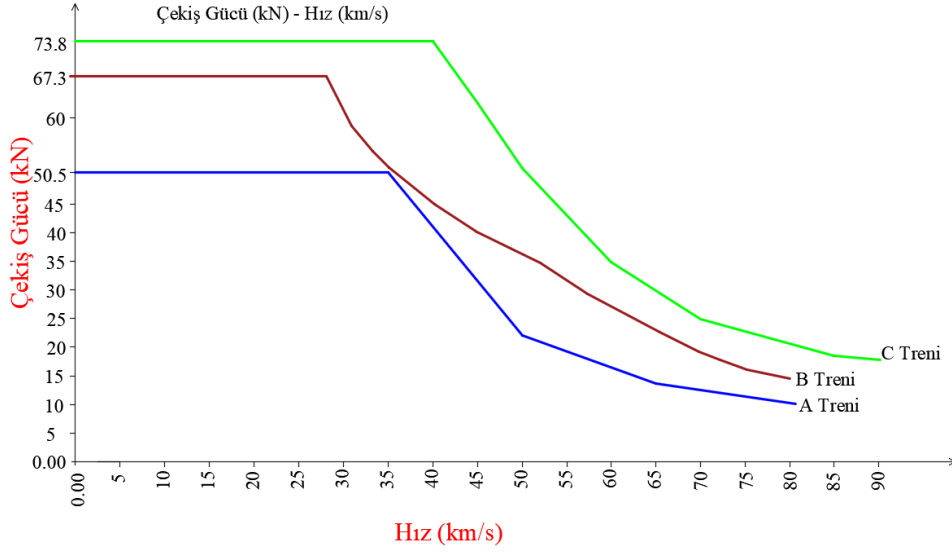
Simülasyonda kullanılan trenlere ait veriler Tablo 5'te ve Şekil 4'te cer kuvveti [kN]- hız [km/h] diyagramı, Şekil 5'te rejeneratif fren kuvveti [kN]- hız [km/h] diyagramı ve Şekil 6'da verim [%]- hız [km/h] diyagramı sunulmuştur.

Tablo 5. Araç parametreleri

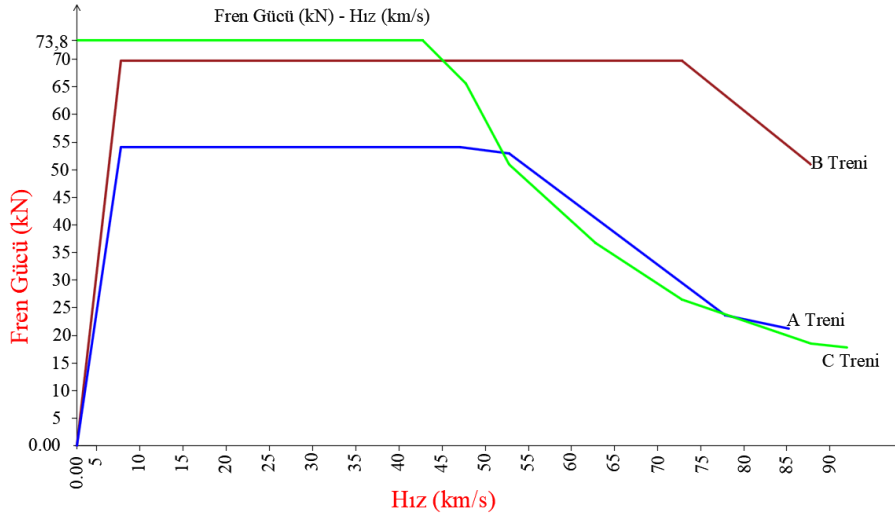
Parametre	A Treni 5'li Dizi	B Treni 5'li Dizi	C Treni 4'lü Dizi
Maksimum İşletme Hızı [km/h]	80	80	80
Maksimum İvmelenme [m/s ²]	1	0.7	1.1
Maksimum Frenleme İvmesi [m/s ²]	1.1	1.1	1.1
Jerk Limit [m/s ³]	0.8	1	1
Boş Ağırlık – AW0 [kg]	199500	145000	157676
Döner Kütle Oranı [%]	10	10	8.5
Uzunluk [m]	118	115	114
Yardımcı Güç [kW]	300	135	240
Maksimum İşletme Gerilimi (EN 50163) [V]	900	900	900
Minimum İşletme Gerilimi (EN 50163) [V]	500	500	500



Şekil 4. Araçlara ait gerilime bağlı akım (sola) ve cer gücü gerilim sınırlama (sağda) grafikleri



Şekil 5. Araçlara ait Çer Gücü [kN]- hız [km/h] diyagramları



Şekil 6. Araçlara ait Fren Gücü [kN]- hız [km/h] diyagramları

3. Bulgular

Simülasyon sonuçları üç farklı grup simülasyonları şeklinde aşağıda verilmiştir Birinci Grup simülasyonlar 5 adet trafo merkezli mevcut hatta 90 s sefer sıklığına göre yapılmıştır. İkinci Grup simülasyonlar 5 adet trafo merkezli mevcut hatta tek trafo merkezinin devre dışı kalma durumu için 120 s sefer sıklığına göre yapılmıştır. Üçüncü Grup simülasyonlar ise hatta ilave 3 adet yeni trafo merkezi eklenerek (Şekil 8) tek trafo merkezinin devre dışı kalma durumu 120 s sefer sıklığına göre tekrar yapılmıştır.

3.1. Birinci grup simülasyonlar: 5 TM'li durum, tüm trafolar devrede, sefer sıklığı 90 s

Tablo 6. Trafo yüklenmeleri

Trafo Merkezi	Maksimum Güç [kW]	Maksimum Güç [%]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [%]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [%]
TM01	3699	176	1805	86	1412	67
TM02	8053	192	4456	106	3532	84

TM03	7976	190	5153	123	4268	102
TM04	8372	199	5471	130	4643	111
TM05	4681	223	2973	142	2393	114

Tablo 7. Normal durum simülasyon sonuçları

Araç	Enerji Talebi [kWh]	Maksimum Güç [kW]	Maksimum RMS Güç [kW]	Minimum Tren Gerilimi [V]	Maksimum Ray Gerilimi [V]	Minimum Ray Gerilimi [V]
A Treni 5'li dizi	9396	15268	9523	626	42	-44
B Treni 5'li dizi	13701	26857	14411	508	77	-47
C Treni 4'lü dizi	12943	26385	13554	503	70	-48

Tablo 6'da verilen trafo yüklenmeleri EN 50329'da belirtilen sınır değerlerdedir. Tablo 7'de verilen A trenleri ile minimum tren gerilim değerinde bir sıkıntı görünmemektedir. Ancak diğer iki tren ile sınır değere çok yaklaşılmaktadır. Senaryo sonuçlarına göre ray gerilimi EN 50122-1 standardına göre istenen aralıktadır.

3.2. İkinci grup simülasyonlar 5 trafo merkezli durum, tek trafo devre dışı, sefer sıklığı 120 s

Tablo 8'de verilen trafo yüklenmeleri incelendiğinde yüklenme değerlerinin çok yüksek olduğu ve bazı senaryolarda tanımlı sınır değerlerin aşıldığı görülmektedir.

Tablo 8. Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda trafo yüklenmeleri

Araç	Trafo Merkezi	Maks. Güç [kW]	Maks. Güç [%]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [%]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [%]
A Treni (5'li dizi)	TM01	4862	232	2971	141	2193	104
	TM02	5833	139	3747	89	2804	67
	TM03	7424	177	5813	138	4132	98
	TM04	8339	199	6751	161	4700	112
	TM05	5058	241	3714	177	2759	131
B Treni (5'li dizi)	TM01	7202	343	4547	217	3262	155
	TM02	8847	211	5626	134	4032	96
	TM03	12182	290	7816	186	5544	132
	TM04	11240	268	8111	193	4385	104
	TM05	6738	321	5004	238	3466	165
C Treni (4'lü dizi)	TM01	7367	351	4090	195	2926	139
	TM02	7827	186	4976	118	3551	85
	TM03	11912	284	7779	185	5478	130
	TM04	10208	243	5316	127	3258	78
	TM05	7323	349	4243	202	3161	151

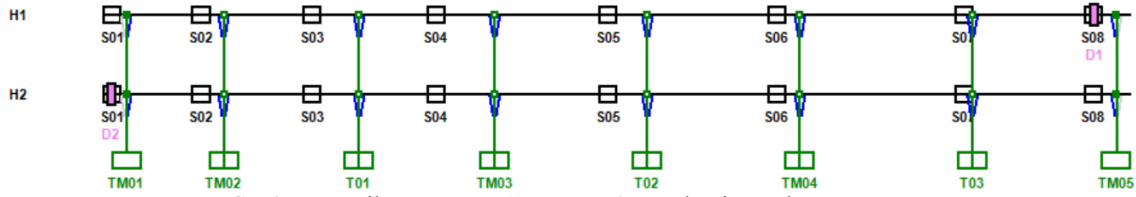
Tablo 9'da verilen ray gerilimi değerleri EN50122-1 standardında istenen aralıktadır. Ancak tek trafo devre dışı durumu sonuçları incelendiğinde minimum tren gerilimi değerlerinin her üç araçta da 500 V'un altına düştüğü ve mevcut trafo merkezlerinin yeterli olmadığı görülmektedir.

Tablo 9. Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda simülasyon sonuçları

Araç	Devre Dışı Trafo Merkezleri	Enerji Talebi [kWh]	Maks. Güç [kW]	Maks. RMS Güç [kW]	Min. Tren Gerilimi [V]	Maks. Ray Gerilimi [V]	Min. Ray Gerilimi [V]
A Treni (5'li dizi)	TM01	7766	19543	9792	600	39	-32
	TM02	8112	19770	10464	603	47	-33
	TM03	8277	16748	9105	509	53	-63
	TM04	7849	15430	8376	504	59	-58
	TM05	8548	20446	11184	491	77	-54
B Treni (5'li dizi)	TM01	10866	28193	13346	519	58	-43
	TM02	11877	30460	15478	453	71	-50
	TM03	5743	25514	12706	385	79	-70
	TM04	9314	24091	11314	394	85	-77
	TM05	2979	23292	11637	300	86	-50
C Treni (4'lü dizi)	TM01	9557	19052	10455	518	56	-45
	TM02	10073	25260	12103	450	78	-54
	TM03	94	12293	1633	456	49	-38
	TM04	9398	20100	10216	382	85	-79
	TM05	707	20582	5587	414	72	-50

3.3. Üçüncü grup simülasyonlar sefer sıklığı 120 s, 1 trafo devre dışı, 3 adet yeni trafo merkezi ilaveli

2. Grup simülasyonlarda sağlanamayan koşulları iyileştirmek amacıyla 3 adet trafo merkezi (T01, T02, T03) ilave edilmiştir. Yeni durum yerleşimi Şekil 7'de verilmiştir.

**Şekil 7.** Yenikapı Otogar ilave 3 trafo merkezi genel görünümü

Yeni TM yerleşimi ile tek trafo devre dışı senaryolarına ait simülasyonları tekrarlanmıştır. Her bir araca ait trafo yüklenmeleri Tablo 10'da verilmiştir. İlave 3 adet trafo merkezinin eklenmesi ile birlikte tek trafo devre dışı kalma durumundaki trafo yüklenmelerinin EN50329 standardına göre uygun hale geldiği görülmektedir. Tablo 11'de verilen bilgilere göre ray gerilimi standartta istenen aralıktadır.

Tablo 10. Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda trafo yüklenmeleri

Araç	Trafo Merkezi	Maks. Güç [kW]	Maks. Güç [%]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 min) [%]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [%]
A Treni (5'li dizi)	TM01	3579	170	2294	109	1744	83
	TM02	4825	115	3018	72	2305	55
	TM03	3722	89	2212	53	1620	39
	TM04	5522	131	4000	95	2687	64
	TM05	4452	212	2845	135	2015	96
	T01	3087	73	2096	50	1556	37
	T02	3892	93	2673	64	1728	41
	T03	3039	72	2029	48	1406	33
B	TM01	6105	291	3369	160	2409	115

Treni (5'li dizi)	TM02	7266	173	4434	106	3178	76
	TM03	5069	121	3446	82	2533	60
	TM04	7433	177	4046	96	3310	79
	TM05	4822	230	2901	138	2306	110
	T01	5586	133	3525	84	2523	60
	T02	5551	132	3539	84	2612	62
	T03	3643	87	2068	49	1805	43
C Treni (4'lü dizi)	TM01	5690	271	3071	146	2197	105
	TM02	6881	164	3917	93	2812	67
	TM03	4986	119	3311	79	2453	58
	TM04	5599	133	2978	71	2399	57
	TM05	4333	206	2317	110	1831	87
	T01	5871	140	3487	83	2483	59
	T02	4503	107	2583	62	2046	49
T03	4991	119	3230	77	2570	61	

Tablo 11. Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda simülasyon sonuçları

Araç	Devre Dışı Trafo Merkezleri	Enerji Talebi [kWh]	Maksimum Güç [kW]	Maksimum RMS Güç [kW]	Minimum Tren Gerilimi [V]	Maksimum Ray Gerilimi [V]	Minimum Ray Gerilimi [V]
A Treni (5'li dizi)	TM01	7491	19750	9730	617	80	-62
	TM02	7548	18753	9796	631	79	-65
	T01	7477	19384	9689	635	85	-58
	TM03	7505	19431	9682	636	81	-60
	T02	7601	19292	9781	631	81	-57
	TM04	7251	18386	8689	565	100	-87
	T03	7263	19087	9282	610	44	-40
B Treni (5'li dizi)	TM05	6950	17235	8262	527	124	-77
	TM01	9529	26641	11902	520	69	-72
	TM02	9654	27546	12098	527	74	-81
	T01	9568	26796	11898	576	70	-60
	TM03	9646	26698	11905	580	65	-65
	T02	9738	27150	12064	528	58	-56
	TM04	10122	24665	11833	467	127	-120
C Treni (4'lü dizi)	T03	9659	26396	11897	523	48	-54
	TM05	9520	24587	11041	491	134	-92
	TM01	8340	16607	9146	519	72	-59
	TM02	8516	16554	9418	515	97	-59
	T01	8442	15936	9237	532	64	-61
	TM03	8490	16064	9233	559	64	-66
	T02	8563	16393	9331	526	65	-44
C Treni (4'lü dizi)	TM04	8687	17997	9415	522	87	-81
	T03	8589	16627	9294	519	53	-60
	TM05	8368	18809	8923	512	120	-78

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında M1A hattı Yenikapı- Otogar bölgesinde bulunan 5 trafo merkezinde hattın kapasite artışına 3 farklı araç ile etkisi, Hi-SimuX ve SimuX programında yapılan simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre maksimum ray gerilimi, minimum tren gerilimi ve trafo yüklenmelerinin standartlara uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir.

90 s sefer sıklığı ile yapılan analizlerde Sağmalcılar ve Otogar trafo merkezlerinin daha fazla yükledikleri ancak EN 50329 standardında belirtilen sınır değerlerinin altına kaldığı görülmüştür. Mevcut hatta 120 s ile tek trafo arıza durumu değerlendirmeleri yapıldığında her üç araçta da gerilim düşümünün 500 Voltun altına düştüğü ve ilave trafo merkezlerine gereksinim olduğu görülmüştür. Mevcut hat üzerine 3 adet yeni trafo merkezi ilavesi yapılarak tek trafo devre dışı senaryoları tekrarlanmıştır.

Sefer sıklığı değerlendirmeleri yapılırken trafoların maksimum yüklenmelerinin uç istasyonlarda daha fazla olduğu görülmüştür. Bu uç istasyonlarda mevcut trafoların çalışma sınıfının VI olması sebebiyle trafo yüklenmelerinin standartta istenen aralıkta kaldığı gözlemlenmiştir. Trafo seçimlerinde çalışma sınıflarının, mutlaka simülasyon sonuçlarına göre seçilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda mevcut hatta tek trafo arızası simülasyonlarında ilave trafo merkezi yapılması ihtiyacı olduğu görülmüştür. Bu nedenle istasyon planlamaları yapılırken ileride doğabilecek kapasite ihtiyaçları da dikkate alarak istasyonlar arasındaki mesafeler, ilk yatırım aşamasında iyi planlanırsa %50'lere varan oranlarda enerji tasarrufu yapmak mümkün olacaktır.

Her bir araca ait km başına enerji tüketimleri Tablo 12'de verilmiştir. Araçların hem çekiş gücü hem de rejeneratif frenleme eğrilerinin iyi analiz edilmesi gerekliliği görülmüştür. Örneğin B treni daha fazla çekiş gücüne sahip olmasına rağmen rejeneratif frenlemesi daha iyi olduğu için km başına enerji ihtiyacı C trenine göre daha düşük çıkmıştır. Yatırım aşamasında doğru bir analiz ile araç seçimi yapıldığında, %50 oranında enerji tasarrufu yapılabileceği görülmektedir.

Tablo 12. Kilometre başına her bir araca ait enerji tüketimleri

Senaryolar	A Treni (5'li dizi)	B Treni (5'li dizi)	C Treni (4'lü dizi)
TM01	2,62	3,31	3,62
TM02	2,64	3,36	3,69
T01	2,62	3,33	3,66
TM03	2,63	3,36	3,68
T02	2,66	3,39	3,71
TM04	2,54	3,52	3,77
T03	2,54	3,36	3,72
TM05	2,43	3,32	3,63

Metro sistemlerinde, enerji tasarrufu üzerine bir çok araştırma yapılmaktadır. Eko sürüş teknikleri [19], hat güzergah eğimlerinin azaltılması [6], rejeneratif frenleme depolama sistemlerinin kurulması bunlardan birkaçıdır. Kapasite artırımına yönelik yeni araç alımlarında, cer simülasyon analiz sonuçlarının da dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Bir sonraki çalışmada komşu olan ve komşu olmayan iki trafo devre dışı analizleri, değişken yük profili analizleri yapılabilir.

Kaynakça

- [1] İBB Ulaşım Yönetim Merkezi, <https://uym.ibb.gov.tr>
- [2] E. Abbasgil, "İstanbul'daki toplu taşımacılık kapsamında raylı sistemlerin değerlendirilmesi (esenler-aksaray hızlı tramvay örneği)," Yüksek Lisans Tezi, SBE, Yöneylem Araştırması Ana Bilim Dalı, İÜ, İstanbul, 1994
- [3] F. Karakuş, R. Yumurtacı, "Raylı sistemlerde orta gerilim elektrifikasyon sisteminin modellenmesi ve besleme senaryolarının belirlenmesi," *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt 8, Sayı 1, 41- 48, 2018
- [4] U. Cihangir, "Çok istasyonlu ve çoklu tren setli bir metro hattının matematiksel modellemesi ve işletim senaryolarının karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, FBE, İTÜ, İstanbul, 2018
- [5] Z. Tian, "System energy optimisation strategies for dc railway traction power networks," Doktora Tezi, ECSE, BCU, UK, 2017

- [6] İ. Keskin, " Raylı sistemlerde yol tasarımının enerji tüketimine olan etkilerinin belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, EBT, BAU, İstanbul, 2013
- [7] W.J. Davis, The tractive resistance of electric locomotives and cars
- [8] H.E. Beni, "Lokomotif çekerleri hesaplama yöntemi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 122-133, Jan. 2021. doi: 10.47072/demiryolu.826780 122
- [9] S. Akkaşı, S. Açıkbaş, "Şhiriçi raylı ulaşımında gerilim seviyeleri ve enerji iletim sistemleri," *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu*, 13-15 Eylül 2006
- [10] M. Gökaşan, "Raylı sistemler mühendisliği ders notları: demiryolu araçları"
- [11] *Railway Applications- Supply Voltages of Traction Systems*, EN 50163:2004/A3, 2022
- [12] *Railway Applications- Supply Voltages of Traction Systems*, IEC 60850, 2014
- [13] S. Frey, *Railway electrification systems & engineering*. Delhi: White Word Publications, 2012
- [14] *Railway Applications- Fixed Installations - Traction Transformers*, EN 50329, 2003
- [15] *Railway Applications- Fixed Installations - Electrical Safety, Earthing and the Return Circuit - Part 1: Protective Provisions Against Electric Shock*, EN 50122-1, 2022
- [16] *Railway Applications. Power Supply and Rolling Stock. Technical Criteria for the Coordination Between Power Supply (Substation) and Rolling Stock to Achieve Interoperability*, BS EN 50388, 2012
- [17] S. Açıkbaş, M. T. Söylemez, "M1A ve M1B hattı cer gücü simülasyonu veri kontrol dosyası," 2022
- [18] 14.04.2023 Tarihli ve 28016334.2023.200-07/E.01564 Sayılı Metro İstanbul Yazısı
- [19] S. Boynukalın, S. Açıkbaş, M. Turan Söylemez, "CBTC sistemlerinde tolere edilebilir seyahat süre artışı için enerji verimliliği stratejilerinin karşılaştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 154-166, July. 2021. doi: 10.47072/demiryolu.941405

Teşekkür

Simülasyon çalışmaları kapsamında desteğini esirgemeyen HI-SIM Teknoloji Mühendislik San ve Tic. Ltd. Şti. yetkililerine ve M1A hattı Yenikapı – Otogar Bölgesi metro hattının verilerinin kullanılmasına izin veren Metro İstanbul A.Ş. yönetimine teşekkür ederiz.

Özgeçmiş



Zennure YENER

1979 yılında Çankırı'da doğdu. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Yüksek lisans öğrenimine İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Raylı Sistemler Mühendisliği Programı'nda devam etmektedir. Rina Consulting Firmasında Uzman Teknik Müdür/Raylı Sistemler Müdürü olarak çalışmaktadır.

E-Posta: yener21@itu.edu.tr



Özcan KALENDERLİ

1956 yılında İstanbul'da doğdu. Lisans öğrenimini İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Aynı zamanda İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Programı'na raylı ulaşım sistem elektrotekniki konusunda ders vermektedir.

E-Posta: kalenderli@itu.edu.tr

Beyanlar

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Zennure YENER: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Özcan KALENDERLİ: Görselleştirme, İnceleme. Kontrol. Gözden geçirme ve düzenleme.



Investigation of Contact Force and Stress Relationship in Overhead Line Contact Wires with Finite Element Method

Özgün SUNAR^{ORCID}

Eskisehir Technical University, Transportation Vocational School, Eskisehir, Turkey

ozgunsunar@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 10.05.2023, Kabul/Accepted: 31.05.2023, Yayınlama/Published: 31.07.2023)

Abstract: Railway overhead line electrification (OLE) is used for providing continuous power to the trains throughout catenary wires and the current collector device of the pantograph. The interaction of contact force exerted by the pantograph and contact wire is an important topic in regulating OLE dynamics. OLE components are subjected to fluctuating contact forces due to the trains running with high speed, therefore, it is important to estimate service life of contact wires and pantograph carbon collectors by considering contact wire/pantograph interference. This study performs a number of contact force and stress/strain analysis of standard OLE designs used in Europe, Series 1, Sicat S1.0, Sicat H1.0, Re250 and EAC 350, with finite element method. The results establish a link between stress levels and contact force in the contact lines depending on the design parameters of contact wire type, pretension, span-length, and contact wire material. Understanding the bending of the contact wire due to the contact force will help to predict potential failures in mainlines and extend our knowledge of safety and reliability of various OLE design parameters.

Keywords: Contact wire, Finite element analysis, Stress, Contact force, Overhead line equipment

Demiryolu Havai Hatlarında Pantograf Kuvveti ve Seyir Teli Gerilimi İlişkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

Öz: Demiryolu havai hat elektrifikasyonu pantograf cihazı ile katener hatlara sürekli olarak enerji sağlamaktadır. Pantograf ve seyir teli etkileşimi, havai hat dinamiklerinin incelenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Havai hat bileşenleri yüksek hızda seyreden trenler nedeniyle dalgalı temas kuvvetlerine maruz kalırlar. Bu sebeple kontak teli/pantograf etkileşimi kontak tellerinin ve pantograf karbon çubuklarının çalışma ömrünün tahmin edilmesinde önem arz etmektedir. Bu çalışma, Avrupa'da kullanılan bir dizi standart havai hat tasarımında, Series 1, Sicat S1.0, Sicat H1.0, Re250 ve EAC 350, temas kuvveti ve seyir teli gerilim/gerinim ilişkisini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemektedir. Elde edilen sonuçlar ön gerilim, hat uzunluğu, temas teli malzemesinin çeşidi ve gerilim-temas kuvveti arasında bir ilişki kurmaktadır. Pantograf temas kuvvetinin seyir telinde oluşturduğu eğilme etkisini anlamak, ana hatlardaki potansiyel arızaların önceden tahmin edilmesine katkıda bulunacak ve çeşitli havai hat tasarım parametrelerinin güvenilirliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynayacaktır.

Anahtar kelimeler: Seyir teli, Sonlu elemanlar analizi, Gerilme, Temas kuvveti, Katener hatlar

1. Introduction

Overhead line equipment (OLE) is designed for providing constant electrical power to trains throughout physical and electrical contact of on-roof equipment pantograph and the contact wire. In order to maintain the contact wire and pantograph collector surfaces in contact, the pantograph exerts a contact force to the contact wire in upward direction and droppers hold the messenger wire and contact wire together and in position (Figure 1). OLE wires work under various factors such as; high voltage, pretension, contact force and wear. Since any failure in OLE lines may lead to catastrophic incidents, durability and the reliability of OLE designs are vital in electric trains operation.

Atıf için/Cite as: Ö. Sunar, "investigation of contact force and stress relationship in overhead line contact wires with finite element method," *Railway Engineering*, no. 18, pp. 98-108, July 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1295172

Speaking about the dynamics of the contact wire during trains operation, a static uplifting contact force, which is at least 60 N depending upon the configuration of the overhead line system and type of pantograph is applied to the contact wire by the pantograph to sustain a continuous current flow from OLE to the pantograph [1]. The contact force interaction problems can be shown one of the most significant issues that needs to be considered and may result in mechanical failure of the contact wire. Although models in standards (BS EN 50317, BS EN 50318 and EN 50367) restricts standard contact force up to 230N at 300 km/h [2-4], due to the contact wire profiles and OLE fitting structures (section insulators, neutral sections, clamps), higher contact forces can be experienced during the journey of trains. This contact force generates elevated bending stress in the contact wire.

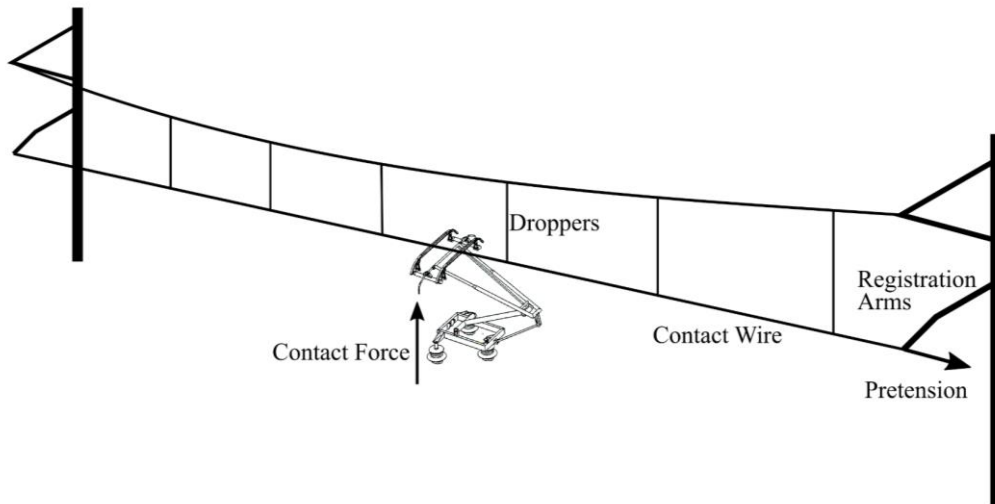


Figure 1. Features of overhead line components

Contact wires are often replaced between 30-50 years due to the sliding wear problem [5] However recent studies have showed that the wear is not the mere life limiting factor, other factors such as; fatigue, electrical discharge or OLE dynamics could be prior to wear failure [6]–[10]. A number of studies in the literature investigated pantograph and contact wire interactions with experimental and numerical methods.

Regarding the contact force and train speed relation, Wenxuan et al. [11] found that uplift amount of the contact wire is positively related to the speed of trains, particularly over speed of 300 km/h. In the same vein, Gregori et al. [12] indicated that current collection quality becomes limiting when increasing the speed of railway systems. Looking at the details of the pantograph contact wire interaction, Kim et al. [13] directly linked the uplift displacement and the bending strain of the contact wire and concluded that the contact force could be the most important factor in determining the systems fatigue life.

Particularly, determining the stress levels in the contact wire due the pantograph uplift is an essential criterion for the reliability of the OLE systems. A number of experimental procedures exist in the literature. Most of the research used 2-3 metre-length experimental configurations to assess life value of contact wires under dynamic loading. In almost all the test configurations are used three point bending configurations [14]–[16].

Taken together, these studies indicate that the contact force-contact wire interaction plays a critical role in determining service life OLE systems. This study investigates various existing OLE designs and provides new insights into contact force-stress relations with finite element analysis. The result of this study makes a major contribution to research on OLE safety and

reliability and understanding stress levels that could occur on the contact wire geometry due to the varying contact forces.

2. Background

A variety of different overhead contact line designs have been used in the world. Although the equipment shows similarities, span lengths, contact wire types, pretension and stitch wire connections differ between these designs. Before establishing finite element models for the properties of various designs used in Europe, Series 1, Sicat S1.0, Sicat H1.0, Re250 and EAC 350 were reviewed, and span stiffness profiles were explained in this section.

Series 1 (140 mph \approx 225 km/h), EAC 350 (350 km/h), Sicat S1.0 (230 km/h), Sicat H1.0 (350 km/h) and Re250 (250 km/h) are very common designs used in Europe. Series 1 differs from the other designs because no stitch wire exists. Some locations where the selected designs used are EAC350 (RENFE) from Madrid to French border through Barcelona, Spain, Sicat H1.0 and Sicat S1.0 (Siemens) in Cologne-Rhine main line and Cologne-Bonn, respectively [17], [18], Re250 (German DB design) in Lotschberg base tunnel, Switzerland and Series 1 in Great Western Electrification (United Kingdom) [19]. Table 1 shows the technical properties of selected OLE designs.

It has been known that the parameters of pretension, contact wire type, span lengths and stitch wires were the critical elements in OLE dynamics. The geometry and properties of OLE designs are shown schematically in Figure 2. The contact wire deformation under contact force varies in a span-length distance due to the different design parameters. Figure 3 contact wire stiffness profiles across a span-length [20].

Table 1. Properties of different OLE designs

Design Name	Parameters				
	Pretension (kN)	Span Length (m)	Mid Span Stiffness (N/mm)	Contact Wire	
				Type	Material
Sicat S1.0	12	80	0.90	AC-100	CuAg
Sicat H1.0	27	70	2.38	AC-120	CuMg
Re 250	15	65	1.81	AC-120	CuAg
EAC 350	31.5	64	2.81	AC-150	CuMg
Series 1	16.5	65	1.85	AC-120	CuAg

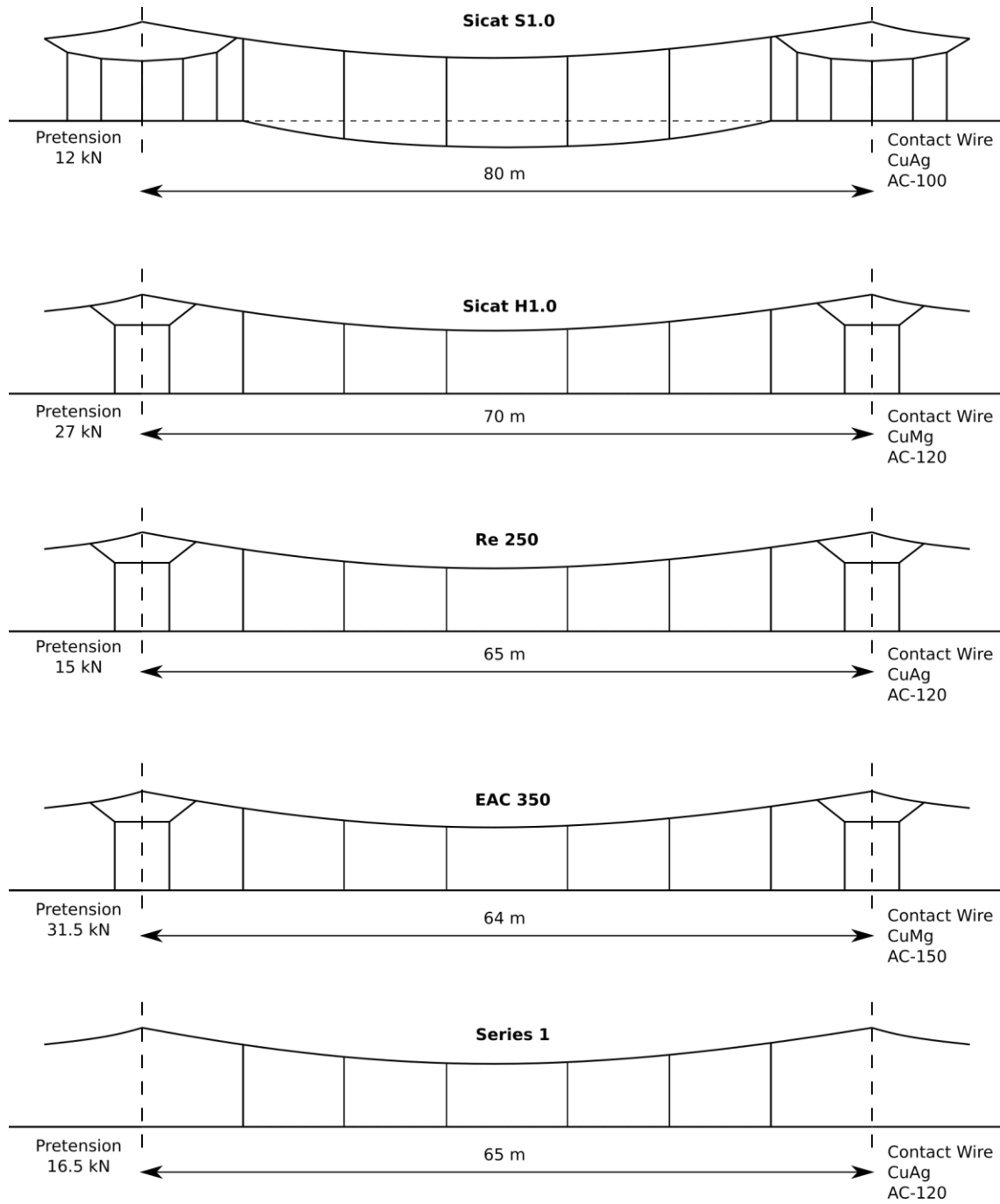


Figure 2. Geometric properties of standard series in UK and EU mainlines

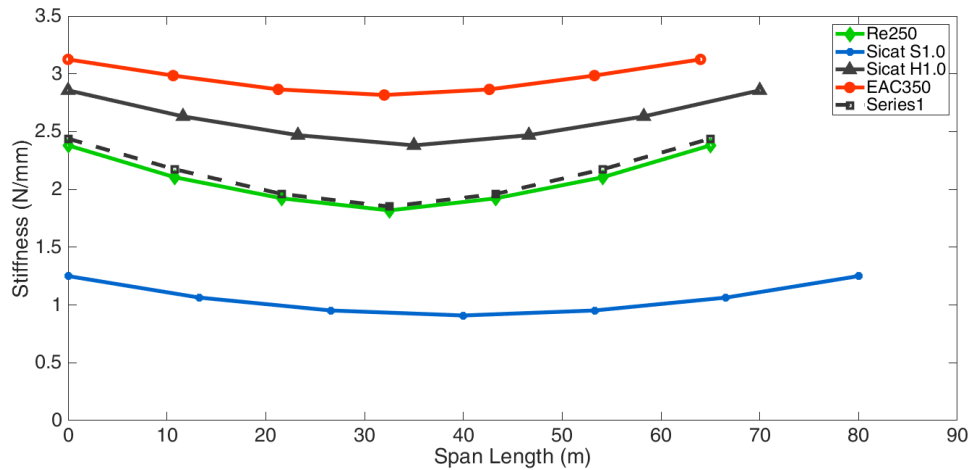


Figure 3. Stiffness properties along a span length

3. Methods

Individual FE models were developed based on the boundary conditions in a span length of the contact wire for selected OLE designs. The finite element models were designed in Ansys Workbench. Regarding boundary conditions, the contact wire was vertically and horizontally supported from the registration arms. The registration arms restrict vertical movement of the contact wire; however, they also have the flexibility to tolerate uplifting pantograph force. This vertical allowance was defined to the registration arms with spring connections, and a stiffness value was set by using the literature data explained in Section 2. For the lateral and rotational boundary conditions, the model was free to rotate around z-axis at the points of A and B. In order to give lateral movement flexibility (as simply supported beam), the point B was also free to move in x-axis. Figure 4 shows the boundary conditions of the FE model of the contact wire.

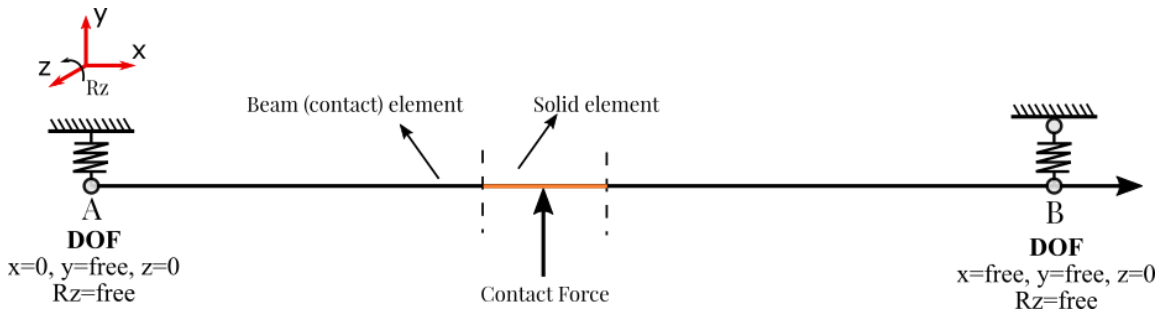


Figure 4. Schematic of boundary conditions of a span-length contact wire

Droppers are used to prevent sagging and keep the contact wire in a flat position. Because the contact wire was subjected to uplifting, the droppers were not restricting the vertical movement. It was known that the droppers are essential for dynamic analysis of the contact wire; however, this was only a static model. Therefore, the dropper connections were not taken into consideration in the model. The uplifting force was applied from the middle of the spans, and the maximum stress was expected to be in the centre. In order to minimise the solving time, a-metre length of the contact wire was connected to the registration arm connections with beam(contact) elements.

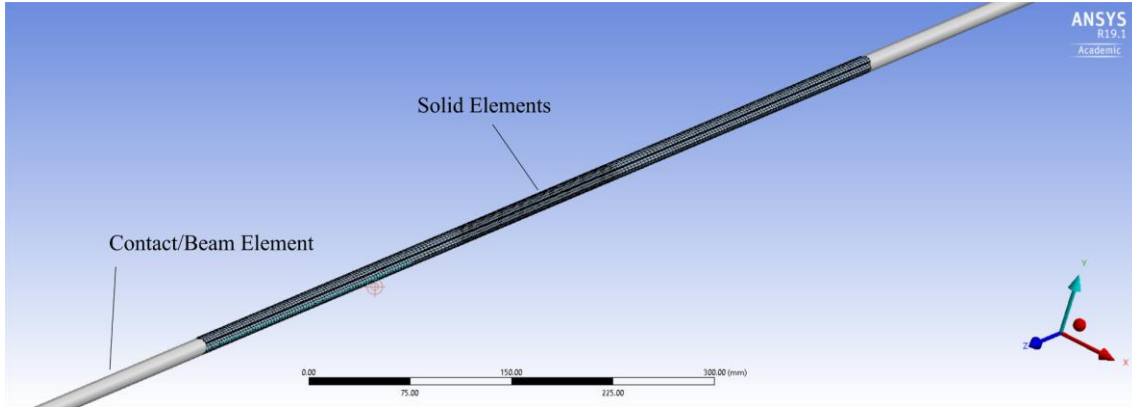


Figure 5. Finite element model with the mesh and beam connections

Figure 5 shows the finite element model developed to investigate the relationship between contact force and stress in the contact wire. The model was divided into three regions for meshing, namely; coarse, fine and very fine. Mesh sizing of the model was finer from the sides to the centre of mid-span since maximum stress was expecting here. A growth ratio of 1.2 was used between the regions. Table 2 shows the convergence analysis of the simplified model with mesh size, the number of elements, changes in strain and mesh quality. The % change in strain in each iteration was calculated related to the strain at the first iteration. Figure 6 also shows the change in mesh quality with an increasing number of elements. Mesh quality checks showed that the quality of the mesh became very stable at iteration number 9. Increasing the number of elements did not significantly contribute to the mesh quality from this point on. Therefore, the mesh size was set to be 1, 1.2 and 1.4 mm for the regions of very fine, fine and coarse, respectively. Reference tensile properties of copper silver and copper magnesium contact wire with the cross-section of 100 mm^2 , 120 mm^2 and 150 mm^2 were used [13], [21], [22].

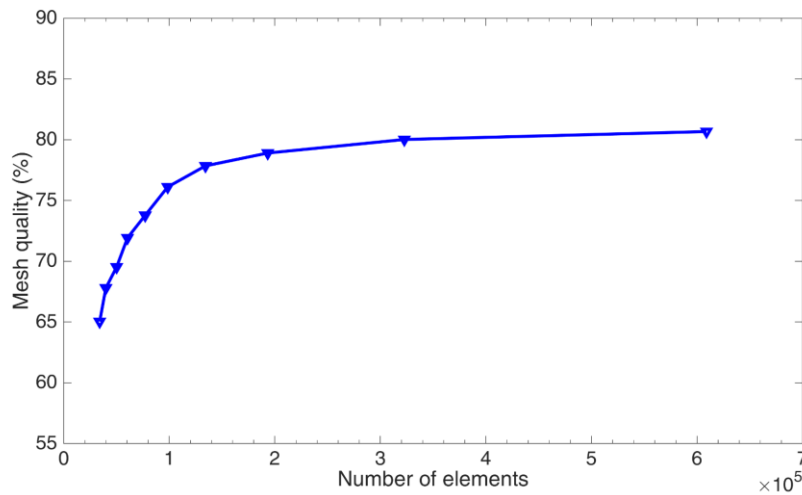
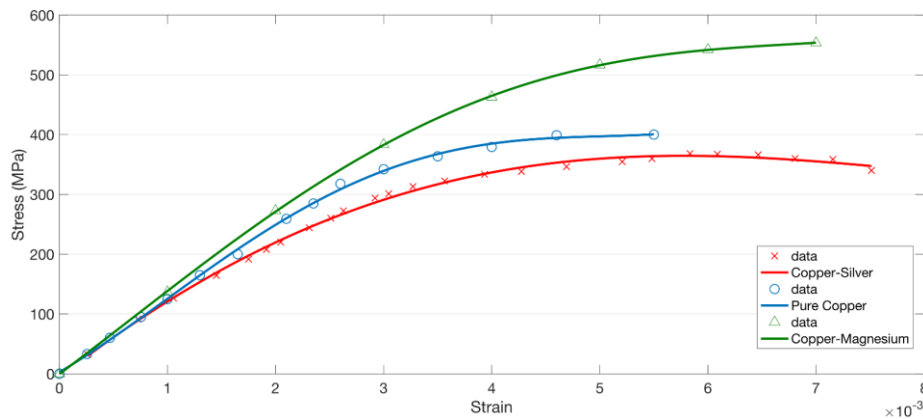


Figure 6. Convergence analysis results of the FE model

Table 2. Mesh parameters used in convergence analysis

Iteration Number	Mesh Size (mm)			Number of Elements	Change in Strain (%)	Mesh Quality (%)
	Very Fine Zone	Fine Zone	Coarse Zone			
1	3.00	3.6	4.32	609004	-	65.03
2	2.75	3.3	3.96	322691	2.22	67.80
3	2.50	3.0	3.60	193255	2.39	69.53
4	2.25	2.7	3.24	134261	3.58	71.92
5	2.00	2.4	2.88	98524	2.71	73.77
6	1.75	2.1	2.52	77145	5.71	76.11
7	1.50	1.8	2.16	60356	5.12	77.84
8	1.25	1.5	1.80	50117	8.26	78.90
9	1.00	1.2	1.44	39906	9.51	80.01
10	0.75	0.9	1.08	34019	9.36	80.66

**Figure 7.** Tensile strength of CuAg, Pure Copper and CuMg contact wires

4. Results

In order to understand how different designs had behave under the pantograph contact force, the stress and strain changes of a span length contact wire with a range of contact force were investigated with FE method. Figure 8 shows the maximum stress in the middle span of OLE designs with an increasing contact force from 100N to 300N. Sicat H1.0 and EAC350 initially were subjected to higher stress than other three designs of Sicat S1.0, Re250 and Series 1 under 100 N contact force. The main reason for this was because Sicat H1.0 and EAC350 worked higher pretensions which were 27 kN and 31.5 kN, respectively. Further analysis of the relationship of the contact force and the maximum stress showed that maximum stress in all of the designs rose against increased contact force. However, the designs of Sicat H1.0 and EAC 350 were the ones that contained the two highest stress levels with just below 350 MPa and 300 MPa. The rest of the designs, Sicat S1.0, Re 250 and Series 1, showed very similar behaviour to one another and varied between just over 180 MPa to in the order of 250 MPa in the contact force range of 100-300 N.

In addition to the stress in the contact wire, the maximum strain was also analysed. The relationship between the contact force and contact wire strain is shown in Figure 9. The designs containing copper-magnesium grades of contact wire, Sicat H1.0 and EAC 350, were subjected to the highest strain. However, the most significant increase in the strain was seen in the designs containing copper silver grade contact wires, Sicat S1.0, Re250 and Series 1, as to be in the order of 50 %, while it was just over 20 % and 30 % for main lines of EAC350 and Sicat H1.0 which were equipped with copper-magnesium contact wire.

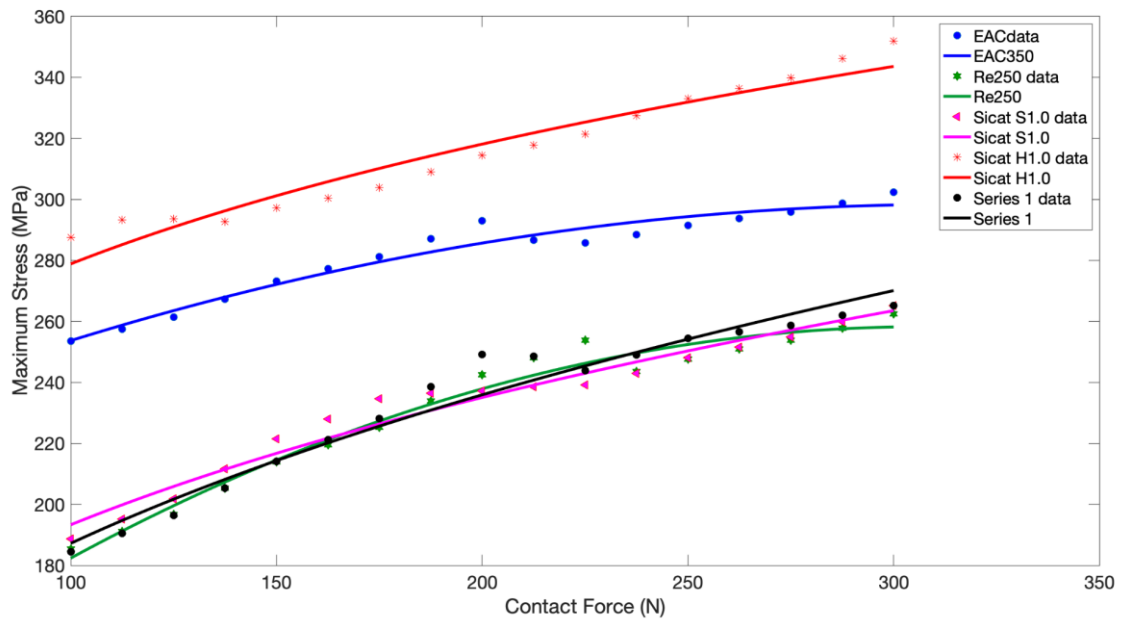


Figure 8. Relationship between contact force and maximum stress for different overhead line designs

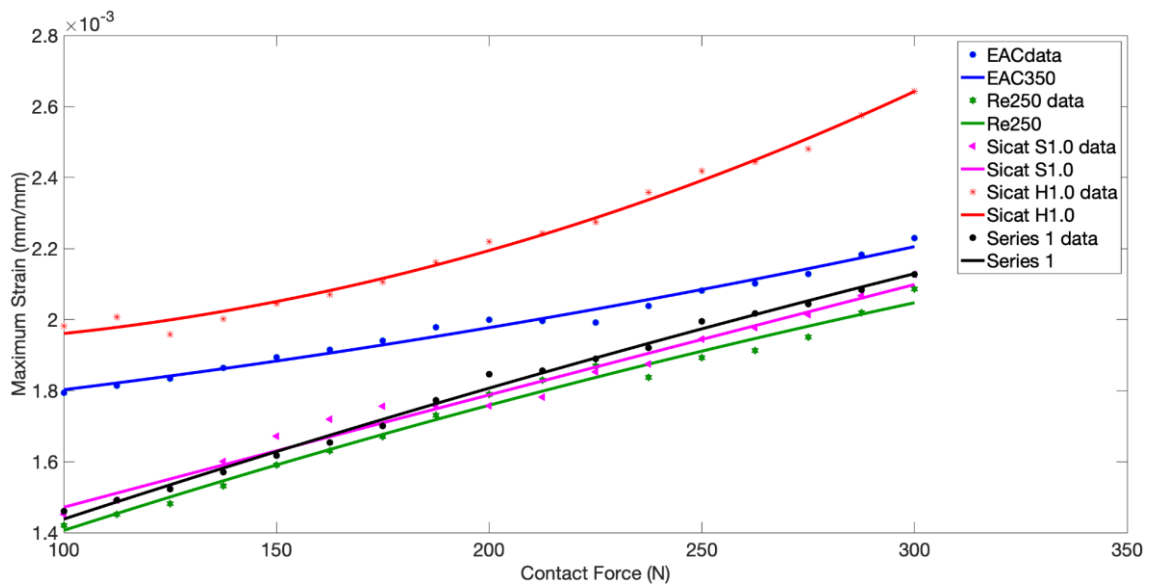


Figure 9. Relationship between contact force and maximum strain for different overhead line designs

Figure 10 presents the stress change in the contact wire section for selected OLE designs at maximum contact force of 300 N. The highest stress was observed on the top surface of the contact wire due to the bending effect of the contact force. Designs having the highest maximum stress at 300 N contact force are Sicat H1.0, EAC350, Series 1, Sicat S1.0, Re250, respectively.

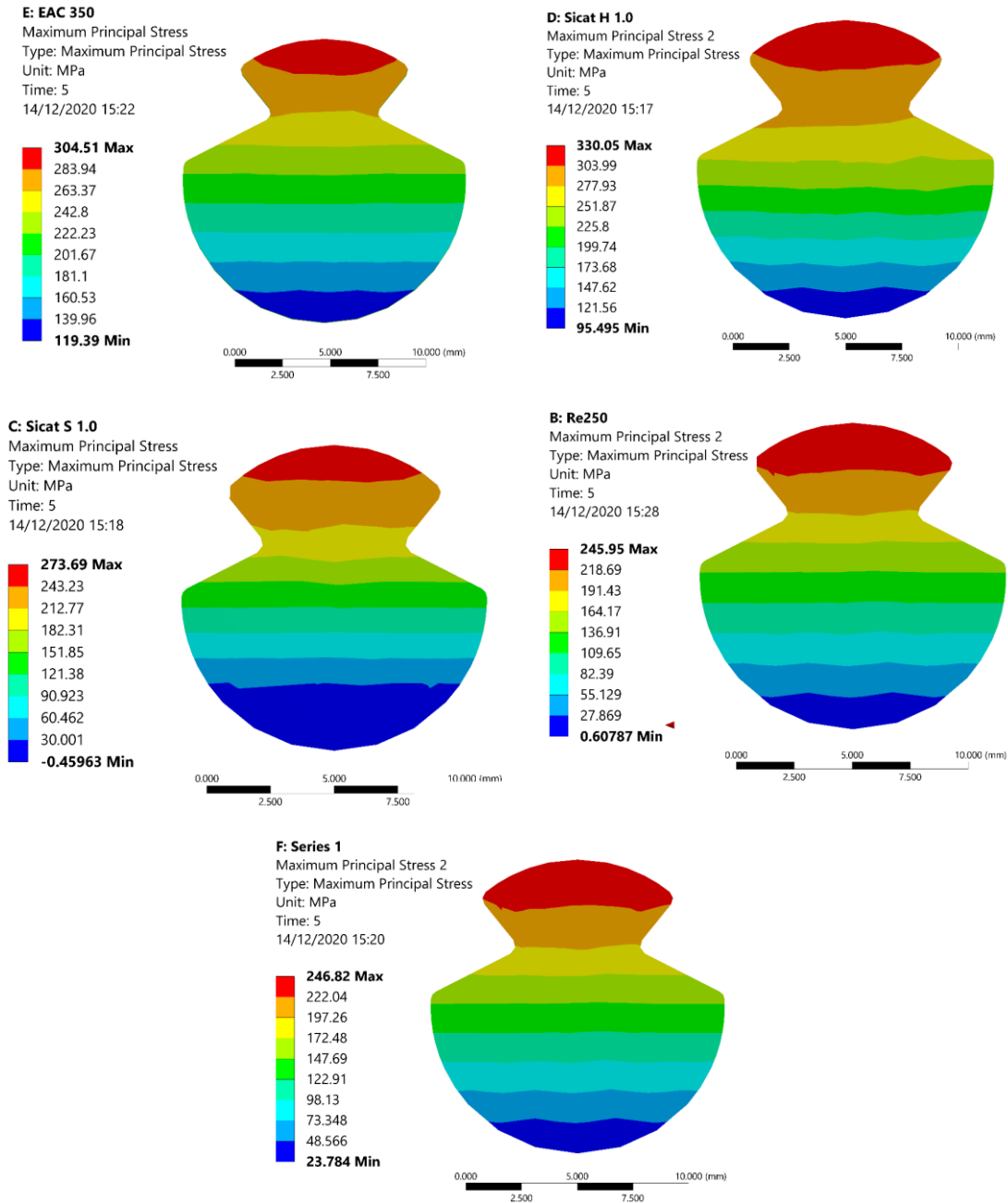


Figure 10. Stress distribution in the section of contact wire

5. Discussion

Results from analysis of real OLE contact wires completed with the contact force range between 100 N and 300 N showed that the maximum strain in the contact wire could reach at the very high end of the elastic limit of the material. The increase in the speed of trains over 300 km/h could even elevate the strain (and stress) to higher levels. This will eventually result in plastic deformation in OLE contact wires. It was apparent that copper-silver contact wires were subjected to severe stress compared to the others. One of the main reasons why the most significant increase was seen in the copper-silver based contact lines can be explained by lower Young's modulus of copper-silver material rather than copper-magnesium grade. Because some level of plastic deformation is expected at high level contact forces (over 300 N), in life predictions and safety

calculation, it would be more beneficial to use of strain-based calculation theories. Although reference model in BS EN 50138 [3] restricts maximum contact force between 190-210N at 250 km/h, some inspection data show that contact force can exceed this reference value and reach more than 300N [22]. Eventually, in long term high stress/strain amplitudes in the contact wire could turn this bending problem into a fatigue problem and under repetitive loading OLE cables can fail prior to its expected service life. Although the wear life is a primary criterion in determining the life cycle of the contact wire, large stress/strain levels show that with the increase of trains speed, fatigue problem may be more predominant in deciding the long-term service of OLE contact wire.

6. Conclusions

The present study set out to investigate contact force and contact wire stress relationship in OLE designs commonly used in European railways throughout finite element analysis. The findings of this research provide insights for stress levels in the contact lines depending on the design parameters of contact wire type, pretension, span-length, and contact wire material. This new understanding should help to improve predictions of failures in mainlines and extend our knowledge of safety and reliability of various OLE design parameters.

Acknowledgement

Special thanks to Prof David Fletcher, Furrer + Frey and Network Rail, The University of Sheffield for their support to this research.

References

- [1] 'EN 50206-1:2010 Railway applications - Rolling stock - Pantographs : Characteristics and tests - Part 1 : Pantographs for main line vehicles'. 2010.
- [2] BSI, 'BS EN 50317: Railway applications - Current collection systems - Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line', p. 20, 2012.
- [3] BSI, 'BS EN 50318 : Railway applications - Current collection systems - Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line', vol. 3, p. 20, 2012.
- [4] BS EN 50367-Railway applications - Current collection systems - Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line
- [5] J. W., S. Longhurst, and C. A. Brebbia, *Urban Transport and the Environment in the 21st Century*. WIT Press, 2012. Accessed: Jan. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.witpress.com/books/978-1-84564-580-9>
- [6] S. Lee and Y. H. Cho, 'Development of bending fatigue test system for trolley line simulating real conditions', in *Proceedings of the KSR Conference*, The Korean Society for Railway, 2011, pp. 3059–3064.
- [7] J. P. Bianchi, E. Balmes, and M.-L. N guyen-Tajan, 'Dynamic stress prediction in catenary wires for fatigue analysis', *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks - Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics, IAVSD 2015*, no. October, 2016, doi: 10.1201/b21185-160.
- [8] L. Chen, P. Peng, and F. He, 'Fatigue life analysis of dropper used in pantograph-catenary system of high-speed railway', *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 5, May 2018, doi: 10.1177/1687814018776135.
- [9] D. Anastasio, A. Fasana, L. Garibaldi, and S. Marchesiello, 'Analytical investigation of railway overhead contact wire dynamics and comparison with experimental results', *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 116, pp. 277–292, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.06.021.
- [10] O. Sunar and D. Fletcher, 'Experimental Investigation on the Arc Damage and Fatigue Crack Initiation Risk of Copper-Silver Contact Wires', *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3198734.

- [11] Z. Wenxuan, M. Meijun, W. Jing, and W. Haiying, 'Research on Contact Wire Uplift of Typical High-speed Railway at 300km/h and 350km/h', in *2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*, Chengdu, China: IEEE, Dec. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/CIYCEE53554.2021.9676903.
- [12] S. Gregori, M. Tur, E. Nadal, and F. J. Fuenmayor, 'An approach to geometric optimisation of railway catenaries', *Vehicle System Dynamics*, vol. 56, no. 8, pp. 1162–1186, Aug. 2018, doi: 10.1080/00423114.2017.1407434.
- [13] Y. Kim *et al.*, 'Fatigue life prediction method for contact wire using maximum local stress', *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 67–70, Jan. 2015, doi: 10.1007/s12206-014-1210-3.
- [14] Z. Guo *et al.*, 'Fatigue life estimation of cold drawn contact wire', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, no. 11, pp. 2291–2299, Nov. 2014, doi: 10.1007/s12541-014-0593-5.
- [15] S. H. Kim, R. H. Bae, and J. D. Kwon, 'Bending fatigue characteristics of wire rope', *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 7, pp. 2107–2110, Jul. 2012, doi: 10.1007/s12206-012-0524-2.
- [16] J. P. Massat, T. M. L. Nguyen-Tajan, H. Maitournam, E. Balmès, A. Bobillot, and J.-P. Massat, 'Fatigue analysis of catenary contact wires for high speed trains', in *9th World Congress on Railway Research WCRR*, Lille, France: 9th World Congress on Railway Research WCRR, 2011.
- [17] J. Kohlhaas, 'Interoperable overhead contact line SICAT H1.0 for high-speed line Cologne-Rhine/Main; Interoperable Oberleitung SICAT H1.0 der Schnellfahrstrecke Koeln-Rhein/Main', *Elektrische Bahnen - EB*, vol. 100, no. 7, pp. 249–257, 2002.
- [18] T. Popa, L. Anghel, B. Cernat, R. Hrin, and D. Buretea, 'Collaborative project H2020-MG-2015-2015 GA-636237'.
- [19] Furrer+Freym, 'Series 1 The Great Western Railway Electrification Project Technical Report', Bern, 2014.
- [20] F. Kiessling, P. Rainer, A. Schmieder, and S. E., *Contact Lines for Electric Railways*. Siemens, 2009.
- [21] G. Zhen *et al.*, 'Bending fatigue life evaluation of Cu-Mg alloy contact wire', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, no. 7, pp. 1331–1335, 2014, doi: 10.1007/s12541-014-0473-z.
- [22] O. Sunar, 'Arc Damage Identification and Its Effects on Fatigue Life of Contact Wires in Railway Overhead Lines (PhD Thesis)', The University of Sheffield <http://etheses.whiterose.ac.uk/28205/> ISNI:0000 0004 9356 9895, 2021. [Online]. Available: <http://etheses.whiterose.ac.uk/28205/>

Resume



Özgün SUNAR

After obtaining his BSc and MSc degrees from Mechanical Engineering in Turkey, he got his PhD degree at The University of Sheffield, United Kingdom, Department of Mechanical Engineering. He primarily conducts studies on fatigue, fracture mechanics, materials science and finite element analysis. He has been working as an assistant professor at Eskisehir Technical University since 2021. E-mail: ozgunsunar@eskisehir.edu.tr

Ethics Statement:

Authors confirm that the article is original, there is no plagiarism issue.



Raylı Sistem Araçlarında Yüksek Hızlı Yük Taşımacılığı İçin Düz Yol ve Kurp Şartları İçin Araç Tekerlek Bileşeninin Gerilme Analizi

Yasin SARIKAVAK^{ib}

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

ysarikavak@ybu.edu.tr

(Alınış/Received: 01.05.2023, Kabul/Accepted: 12.06.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Yüksek hızlı tren işletmeciliği için yolcu taşımacılığı son yıllarda ülkemizde hızla yaygınlaşmaktadır. Dünyada yüksek hızlı tren işletmeciliği yapılan bazı ülkeler bu hatlarda yüksek tonajlı kargo yüklerini yüksek hız ile taşımaktadır. Artırılmış aks ve tekerlek yükleri, yüke, frenleme koşullarına ve hıza bağlı oluşan diğer dinamik etkiler demiryolu araç tekerleklerinin tasarımında zorlukluklar oluşturmaktadır. Buna göre yüksek hız ve artırılmış kargo yükleri altında tekerlek bileşeninin gerilme ve yerdeğiştirme durumlarının analizi güvenli işletmecilik açısından önemlidir. Bu kapsamda bu çalışmada dinamik yüklerin yanısıra, yüksek hızlı yük taşımacılığı koşulları altında oluşan dinamik yük, hız ve frenleme parametreleri altında demiryolu tekerleklerinin gerilme analizi düz yol ve dar kurplu işletme şartları için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. Yapılan analizler sonucu tekerleklerde oluşan gerilme değerlerinin malzemenin akma sınırının üzerinde olduğu ve olası yük taşımacılığında, yeni sistemlerde mukavemeti yüksek alternatif malzemelerin kullanılması gerekliliği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Monoblok tekerlek, Yüksek hız, Yük taşımacılığı, Sonlu elemanlar analizi, Gerilme analizi

Stress Analysis of Vehicle Wheel Component of Rail System Vehicles for Plain and Curved Rail Cases in High-Speed Freight Transport

Abstract: In recent years high-speed train operation in passenger transportation has become widespread in Türkiye. Some countries that operate high-speed trains in the world transport high-tonnage cargo loads with higher speeds on these lines. Increased speeds, axle and wheel loads results with extra load, harsh braking conditions and other dynamic effects that creates difficulties in the design of railway vehicle wheels. Accordingly, the analysis of the stress and displacement conditions of the wheel component under high speed and increased freight loads is important for safe operation. In this context, in this study, stress analysis of railway wheels was simulated using the finite element method under load, speed and braking parameters specifically for high speed freight transport conditions for plain and narrow curved road conditions as well as other dynamic loads. As a result it was concluded that the stress values formed in the wheels are above the yield limit of the material and it is necessary to use alternative materials with high strength for next generation systems impossible high-speed freight transportation.

Keywords: Monoblock wheel, High speed, Freight transport, Finite element analysis, Stress analysis

1. Giriş

Demiryolları hatları son yıllarda ülkemizde önemli ölçüde artmıştır. Buna bağlı olarak şehirler arası işletilen trenler ve bu tren dizilerinin işletme frekanslarında önemli artışlar meydana gelmiştir. Demiryolu araçlarında altyapı ile etkileşim halinde olan kritik parçalar yer almaktadır ve bu bileşenlerin güvenlik, dayanıklılık ve işletilebilirlik açısından teknik analizi güvenli ulaştırma açısından son derece kritiktir. Bu bağlamda demiryolu araç tekerlekleri yük ve yolcu taşımacılığında, konvansiyonel ve hızlı tren işletmeciliği için önemli bir demiryolu bileşenidir.

Atıf için/Cite as: Y. Sarıkavak, "Raylı sistem araçlarında yüksek hızlı yük taşımacılığı için düz yol ve kurp şartları için araç tekerlek bileşeninin gerilme analizi" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 109-120, July. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1290599

Demiryolu araçlarında doğrudan farklı kuvvetlerin etkisine maruz kalan tekerlekler araçtaki en kritik parçalardan biridir. Demiryolu araç tekerlekleri işletme şartlarında hasara ve kırılmalara sebep olan farklı yüklere ve ısıl etkilere maruz kalmaktadır. Tekerlekteki hasarlar genel olarak üç tip yük altında oluşabilmektedir. Bunlar, yuvarlanma yüzeyindeki temas, frenleme etkisi ile oluşan ısıl yorulma ve mekanik etkilerdir [1]. Yüksek hızlı tren işletmeciliği yapan bazı ülkeler hatlarında yolcunun yanında yüksek hızlı yük taşımacılığı da yapmaktadır. Artırılmış kargo yükleri altyapı ve araç bileşenlerini zorlamakta ve güvenli işletmecilik açısından oluşan dinamik, frenleme ve temas yüklerinin dikkate alındığı çalışmalar güvenli işletmecilik için önem arz etmektedir. Buna göre literatürde tekerlek bileşeninin teknik analizi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Ramadan vd. [1] sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturduğu modelde bir demiryolu tekerleğinin farklı yükler altında ve farklı yüklemeye pozisyonlarında gerilim analizini yapmıştır. Yükleme şartları için literatürde yer alan farklı modeller simüle edilmiş ve tekerleğe temas eden yüklerin akstan aktarılan yükler olduğu sonucuna varılmıştır. Kabo ve Ekberg [2] tekerlek flanşında yer alan bir kusurun etrafında oluşan gerilme dağılımını elasto-plastik bir sonlu elemanlar modeli ile analiz etmiştir. Yapılan çalışmada kusurun boyutu ve şeklinin daha detaylı olarak araştırılması gereken parametreler olduğu değerlendirilmiştir. Kralçık vd. [3] tam ölçekli tekerlek ray testi ve çift diskli aşınma testi ile oluşan gerilme ve gerinim değerlerini incelemiştir. İki boyutlu sonlu eleman modeliyle simülasyonlar yapılmış ve deneysel veriler arasındaki ölçek faktörü değerleri incelenmiştir. El-Sayed vd. [4] dikey ve yanal tekerlek yüklerine maruz kalan demiryolu traverslerinin ve bağlantı elemanlarının sonlu elemanlar yöntemini kullanarak üç boyutlu analizini yapmıştır. Yanal yüklerdeki artış ray oturma yüzeyinde ve ray bağlantı elemanlarında bozulmalara neden olmakta, bu da güvenlik ve bakım maliyetleri açısından olumsuzluklar ortaya çıkarmaktadır. Çalışma yatay tekerlek yüklerinin etkilerini incelemekte ve daha düzenli sistemlerin tasarlanabilmesi için veri sunmaktadır. Nejad vd. [5] kalıntı gerilmelerin demiryolu tekerleklerinde yorulma çatlakları ilerlemesine etkisini incelemiştir. Yuvarlanma temas yorulma çatlakları ilerlemesi bir sonlu elemanlar modeli ile analiz edilmiştir. Model tekerlekte ısıl işlem ve mekanik yüklemeler sonucu oluşan gerilme parametrelerini ve çatlak ilerlemesini tahmin etmektedir. Elasto-plastik sonlu elemanlar modelinde farklı ısıl yükler altında tekerleğin yorulma ömrü araştırılmıştır. İşletme şartlarında mekanik etkiye bağlı von-Mises gerilme değerinin 604 MPa olduğu ve kritik çatlak uzunluğunun 37 mm olduğu ancak geometrik olarak bu değere pratik şartlarda ulaşmadan tekerleğin kırılacağı değerlendirilmiştir. Seo vd. [6] çalışmada üretim esnasında ve işletme şartlarında frenleme şartlarında oluşan kalıntı gerilmeleri incelemiştir. Çevrimsel yük sonlu elemanlar analizi yöntemi ile simüle edilmiştir. En yüksek kalıntı gerilmenin 320 MPa olduğu ve işletme şartlarında frenleme ile bu değerde sırasıyla üst ve alt noktada 60 MPa ve 40 MPa'lık artış olduğu görülmüştür. Arslan ve Kayabaşı [7] sonlu elemanlar analizi yönteminde demiryollarında en temel problemlerden olan temasının daha gerçekçi modellenmesi için gerekli adımları analiz etmiştir. Modelde yük akstan tekerleğe ve oradan raya aktarılmaktadır. Çalışma sonucu gerilim ve gerinim değerlerinin elde edildiği üç boyutlu tekerlek ve ray modeli, iki boyutlu simetrik eksenel modele göre daha doğru sonuçlar vermiştir. Yongming vd. [8] tekerlekler için çok eksenli bir yorulma modeli geliştirmiştir. Üç boyutlu elasto plastik sonlu elemanlar modelinde gerilme analizi yapılmıştır. Yorulma çatlakları oluşumunda ve kullanılan modelde tekerlek çapı, dikey yükler, malzeme sertliği, malzemenin yorulma özellikleri dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda modellerin doğrulanması için daha fazla genişletilmiş deneysel veriye ihtiyaç olduğu değerlendirilmiştir. Hem sertlik değerinin hem de dikey yüklemenin tekerlek üzerindeki değişime etkisinin aynı anda değerlendirildiği ve lineer olmayan daha pek çok farklı değişkenin etkisinin araştırıldığı daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Masoudi Nejad [9] demiryolu tekerleklerinde kalıntı gerilmeleri analiz eden bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Çalışmada monoblok tekerleklerde ısıl işleme bağlı oluşan gerilme değerleri analiz edilmiştir. Tekerlek üretiminde su verme ve tavlama işlemleri simüle edilmiştir. Çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları saha verileriyle doğrulanmıştır. Demiryolu tekerleklerinde kalıntı gerilmelerin yorulma ömrü için önemli bir parametre olduğu ve bu değer

553 MPa'a eriştiği görülmüştür. Toumi vd. [10] sürtünme altındaki tekerlek ray yuvarlanma temasını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. Liangliang vd. [11] yüksek hızlı trenlerde tekerleklerde oluşan apletinin oluşturduğu kuvvetler ve gerinim oranını sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırmıştır. Çalışmada işletme şartlarında oluşan tekerlek yükü statik aks yüküne göre tekerlekte apleti olsun veya olmasın en az iki kat büyüklükte olduğu analiz edilmiştir. Xiongfei vd. [12] düz rayda tekerlek ray tepkisinin dinamik modellemesini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz etmiştir. Çalışmada en yüksek temas kuvvetinin ve Von Mises gerilmelerinin işletme hızının artmasıyla arttığı görülmüştür. Bunun yanında en yüksek temas basıncının ve yanal gerilmelerin hızın artmasıyla azaldığı görülmüştür. Tekerlek ray temasında Hertz temas teorisinin elastik temas şartları için hala etkin sonuçlar verdiği fakat elastik ve plastik temas koşulları için sonlu elemanlar analizi yönteminin daha doğru sonuçlar elde edebilmek için ilk seçenek olduğu değerlendirilmiştir. Zulkifli vd. [13] demiryolu tekerleklerinin farklı yüklenme şartlarında sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yapmıştır. Xin vd. [14] tekerlek takımının demiryolu ayırımı noktalarında dinamik analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmiştir. Yüksek hızlı yük taşımacılığı gibi artırılmış yüklenme şartlarında demiryolu tekerlek ve ray malzemeleri için gelişmiş mekanik özellikler gösteren beynitik mikroyapıdaki çeliklerin uygulanabilirliği halen yoğun olarak araştırılmaktadır [15-18]. Boehm vd. [19] Avrupa ölçeğinde, yük taşımacılığının karayolu tırlarından, yüksek hızlı demiryolu hatlarına değişimi durumunu analiz etmiştir. Buna göre karayolu taşımacılığıyla kıyaslandığında, yüksek hızlı demiryolu yük taşımacılığında maliyetlerin %70 oranında arttığı ancak CO₂ emisyonlarının %80 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla çevre dostu işletmecilik açısından yük taşımacılığında da yüksek hızlı demiryolu dikkate değer bir alternatif olarak gözükmektedir.

Bu çalışmada yüksek hızlı tren işletmeciliğinde kullanılan 0,85 m çapındaki monoblok tekerleklerin farklı işletme şartları altındaki gerilme analizi yapılmıştır. Farklı dinamik ve statik yüklenme koşullarında, işletme şartlarında demiryolu araç tekerleğinin temas koşulları ve diğer etkiler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Geliştirilen üç boyutlu model hem tekerleğe yuvarlanma yüzeyinden etkileyen yükleri hem de temas alanının geometrik özelliklerini dikkate almaktadır. Bunun yanı sıra yüksek hızlı yük işletmeciliği yapılan ülkelerde elde edilen yüklenme koşulları ve sınır şartları dikkate alınarak, mekanik etkiler sonucu oluşan gerilme durumu düz yol ve kurpta işletmecilik koşulları için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu çalışmada özellikle dünyada farklı ülkelerde uygulama alanı bulan raylı sistemlerde yüksek hız ile yük taşımacılığı düz yol ve dar kurplu şartlar için incelenmiştir.

2. Metot

2.1. Kullanılan malzemeler ve metot

Dünyada farklı uygulamalar olmakla birlikte Avrupa genelinde demiryolu araç dinamiğine ve altyapı şartlarına bağlı olarak tekerlek çapları farklı işletmeciler için 0,85 m to 1,10 m aralığında değişmektedir [20]. Buna göre, bu çalışmada ülkemizde yüksek hızlı tren hatlarında kullanılan 0,85 m çapındaki monoblok tekerleklerin katı modeli oluşturulup sonlu elemanlar analiz yazılımına aktarılmıştır. Tekerlek çeliği 900 MPa çekme mukavemetine, 580 MPa akma gerilmesine sahiptir [21]. Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu sırasıyla 210 000 MPa, 0,3 ve 7850 kg/m³'dür [20-23]. Tekerlek ile etkileşim halinde olan ray malzemesi yüksek mukavemet gerektiren ve işletme frekansı yüksek olan hatlarda kullanılan UIC 60 profil ray çeliğinden oluşmaktadır [24, 25]. Buna göre tekerlek ve ray malzemesinin temel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

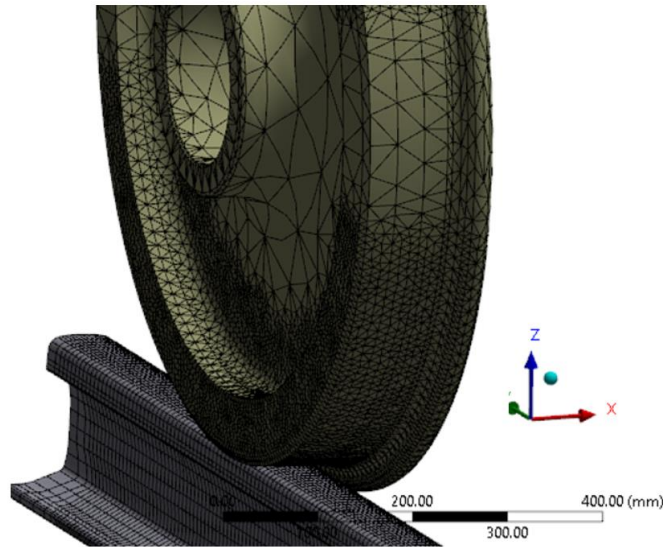
Tablo 1. Tekerlek ve ray malzemelerinin temel mekanik özellikleri [20-25]

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Young Modülü (E) (GPa)	Poisson's Oranı (ν) (-)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Tekerlek	7850	210	0,3	900
Ray	7860	210	0,3	880

Yüksek hızlı yük taşımacılığının uygulandığı farklı ülkeler bulunmaktadır. Bunlar arasında Fransa'da işletilen TGV trenleri, Almanya'da işletilen ICE ve ayrıca Japonya ve İspanya'da da farklı hatlarda yüksek hızlı yük taşımacılığı yapılmaktadır [26].

2.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme

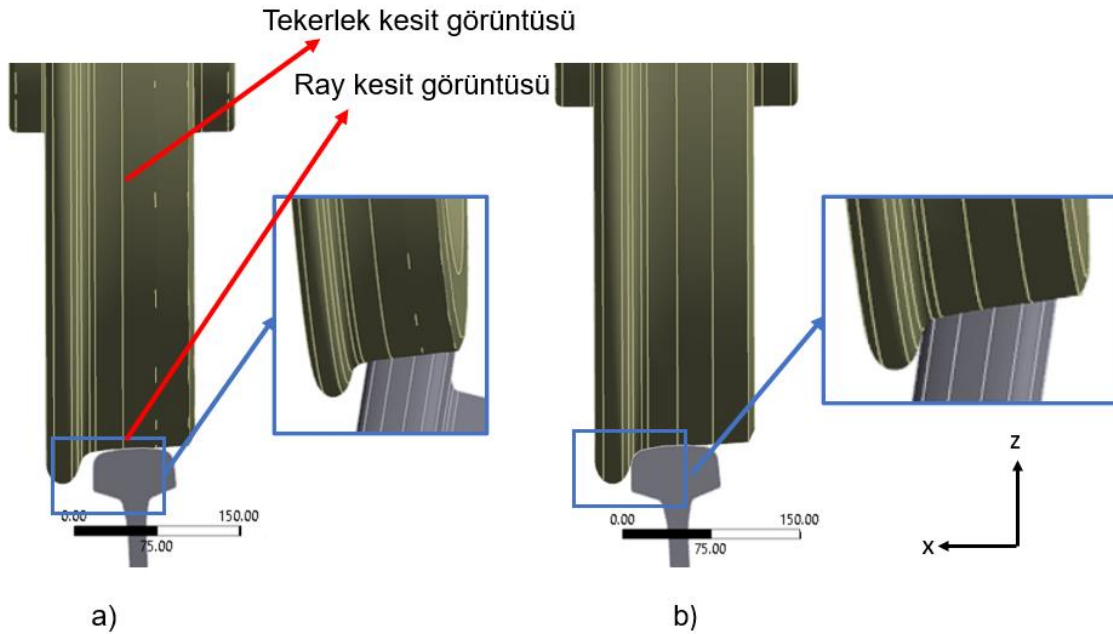
Tekerleğin temas koşulları sonlu elemanlar modelinde elastik plastik şartlarda tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar ile analiz (SEA) yöntemi gerçek durumda meydana gelen yüklemeler ve çevresel koşulları içeren mevcut sınır koşullarının gerçekçi simülasyonu için etkin bir yöntemdir. İşletme şartlarındaki trenlerde her boji iki akstan oluşmaktadır ve akstan aktarılan statik yük değeri tren seti üzerindeki yolcu veya ekipman yüküne, bileşenlerdeki süreksizliklere bağlı olarak değişmekle birlikte 70,49 kN'dur, traversler arası açıklık ise standartlar gereği 60 cm'dir [18]. Genellikle altyapı ve üstyapı bileşenleri için tasarım yüklemeye değerleri yüksek tutulmaktadır. Ancak işletmecilik koşullarında işletme maliyetlerini ve bakım periyotlarını düşürmek için gerçek yüklemeye değerleri daha düşük kalmaktadır. Geliştirilen modelde balast altı bileşenlerin bulunduğu yüzeyler, ray tabanı sabit bağlantı olarak tanımlanmış, tekerlek ve rayın -z ekseninde hareketi serbest bırakılmıştır. Tekerlek ve ray temas noktalarında analiz hassasiyeti için atanan ağ sayısı fazladır. Böylece temas olmayan noktalarda daha kaba eleman atanmışken, tekerlek ray temas noktasının olduğu bölgelerde analiz hassasiyeti için daha ince ağ atanmıştır. Buna göre modeldeki nokta sayısı 128564, eleman sayısı ise 52754'dür. Ağlara bölünmüş model Şekil 1'de yer almaktadır. Modelde ray taban yüzeyi seçilerek ray malzemesi sabitlenmiştir. Statik ve dinamik etkiler sonucu oluşan yatay ve dikey yükler tekerlek bileşenine tanımlanmıştır. Buna göre tekerlek aksının monte edildiği yüzeye dikey yük değeri, tekerlek flanşının iç yüzeyinden de yatay yük değeri tanımlanmıştır. Analizde yatay ve dikey tanımlanmış statik ve dinamik yük değerleri kademeli olarak (ramped effects) tekerleğe iletilmiştir.



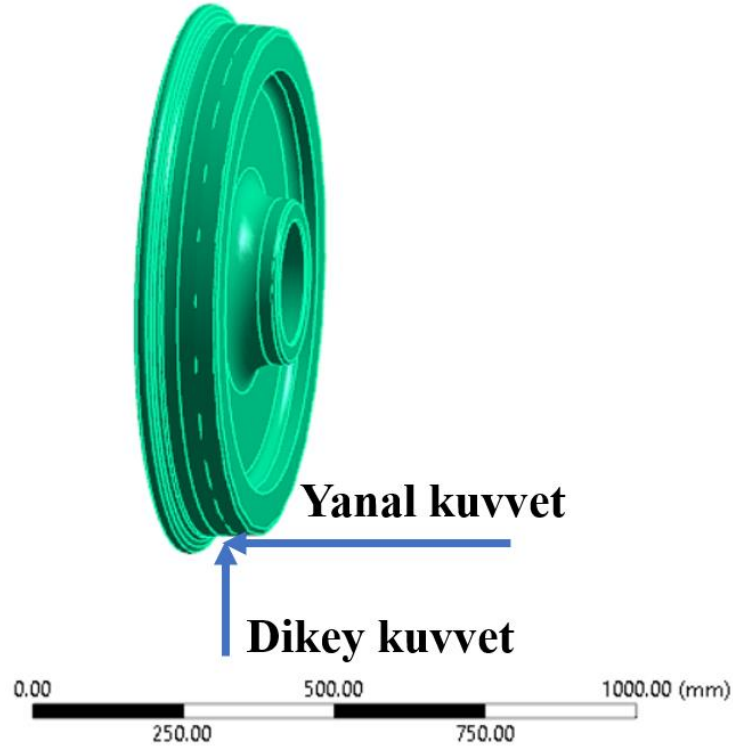
Şekil 1. Tekerlek-ray temas noktasında ince ağlara bölünmüş tekerlek modeli

Yüksek hızlı yük taşımacılığının yapıldığı Fransa'da yer alan veriler dikkate alındığında TGV trenleri için yük taşımacılığında oluşan kuvvetlerin yolcu taşımacılığında oluşana göre oldukça fazla olduğu analiz edilmiştir. Buna göre boş bir TGV vagonu tamamen yolcu ile yüklendiğinde ağırlığı ortalama %15 oranında artmaktadır. Ancak boş bir yük vagonu tam kapasite yüklendiğinde ağırlığının iki katına çıktığı anlaşılmaktadır. Bu fazladan yükler tasarım, imalat ve işletmecilik anlamında farklı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Referans alınan TGV trenleri 31 ton boş vagon yüküne sahiptir ve dinamik etkiler, frenleme, mekanik etkiler ve temas sonucu tekerleğe etkiyen yükün iki katına çıktığı belirtilmektedir [26, 27]. Hız ve farklı dinamik koşullara bağlı sınır şartları altında tekerlek bileşenine etkiyen yüklerin arttığı ve güvenli işletmecilik için tasarım ve işletme için belirli yük değerlerinin üzerine çıkılmaması gerektiği mevcut yüksek hızlı yük taşımacılığı yapan ülkelerin tecrübelerinden anlaşılmaktadır. Buna göre hızlı yük taşımacılığı için 30 ton aks yükü değerinin üzerinde güvenli taşımacılık şartlarından uzaklaşıldığı sonucuna varılmıştır [26]. Çalışmada yüksek hızlı yük taşımacılığı için 20 ton aks yükü altında 100 km/h hızda oluşan dinamik etkilerin 17 ton aks yükü ile 270 km/h hızda aynı etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [26]. Farklı çalışmalarda dinamik yükler altında tekerlek bileşenine gelen yük değerinin %40 oranında arttığı ifade edilmektedir [1]. Buna göre bu çalışmada geliştirilen tekerlek modeli doğrulandıktan sonra %40 artırılmış yük altında ve yüksek hızlı yük işletmeciliği dikkate alınarak yuvarlanma yüzeyinde oluşan temasa bağlı yüklemenin yanında, yüksek tonajda frenleme ve diğer mekanik etkilerle oluşan 149,45 kN yük altında oluşan gerilme değerleri düz yol ve dar karp şartları için analiz edilmiştir.

Şekil 2'de eğimli ray profili ve tekerlek malzemesinin kesit görüntüsü yer almaktadır. Oluşturulan bu katı modeller sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Tekerlek ile ray teması arasında sürtünme katsayısı modelde 0,35 olarak tanımlanmıştır [28]. Tren setindeki vagon yükü akslara aktarılmakta akstan da tekerleklere iletilmektedir. Buna göre yükler -z ekseninde tanımlanmış ve tekerlek ve ray bileşenlerinin bu ekseninde hareketi sınır koşulu olarak serbest bırakılmıştır. Şekil 3'de tekerlek malzemesinin yuvarlanma yüzeyine etkiyen yan ve dikey kuvvetler görülmektedir. Düz yolda yüke bağlı olarak dikey kuvvet bileşeni etkin bir parametredir. Yol geometrisine, tekerlek veya altyapıda olan kusurlara bağlı olarak yan kuvvet bileşeni değişiklik göstermektedir. Düz yolda temel sadece tekerleğin yuvarlanma yüzeyinde gerçekleşirken kurplu geometride temasın flanşın belirli bölgelerine de yayıldığı bilinmektedir.



Şekil 2. Modelde kullanılan tekerlek ve ray kesiti a) düz yol şartları için temas b) kurplu işletme şartları için temas

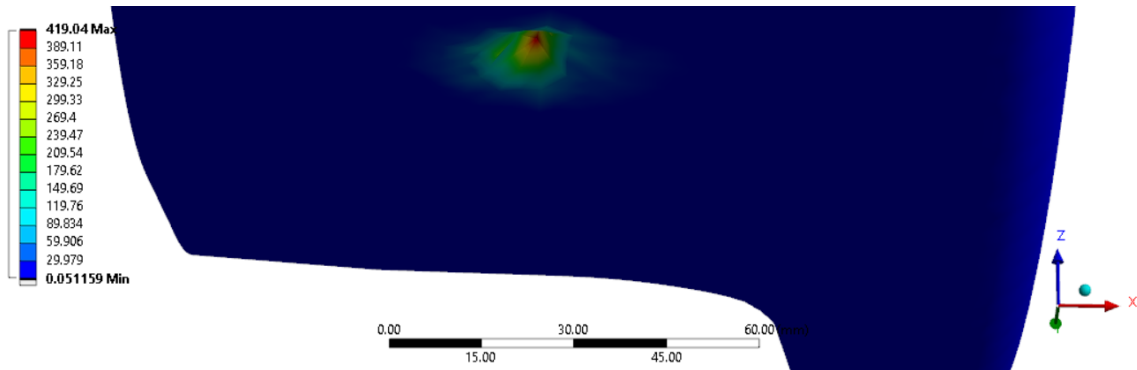


Şekil 3. Tekerlek çeliğine etkiyen yanal ve dikey kuvvetler

3. Bulgular

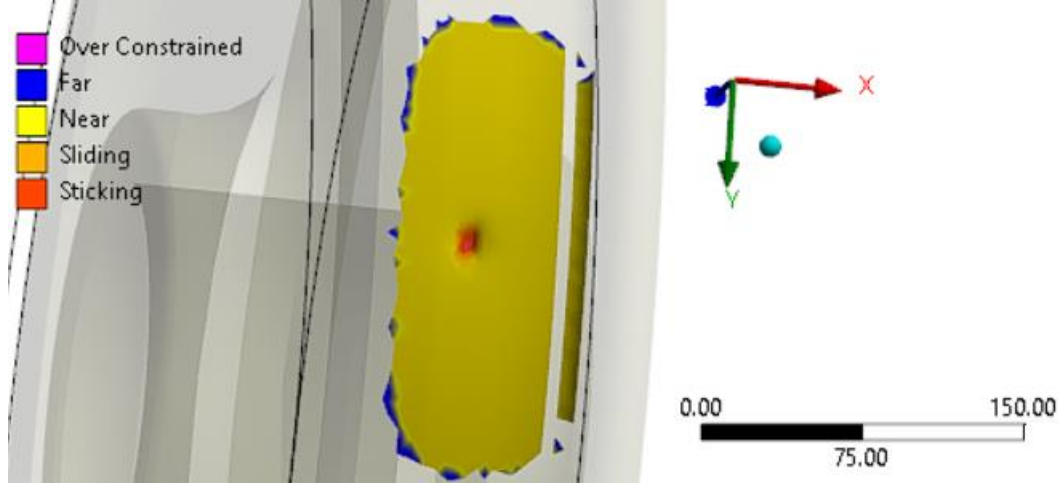
3.1. Doğrulama

Ramanan vd. [1] çalışmasında tekerlek modeline gelen aks yükü 16,25 ton olarak alınmıştır. Aynı çalışmada dinamik etkilerin yükü %40 oranında artırdığı hesaba katılarak analizler yapılmıştır. Buna göre işletme şartlarını simüle eden tam modelde temas bölgesinde eşdeğer Von-Mises gerilme değeri 425 MPa olarak bulunmuştur. Bu çalışmada geliştirilen lokal modelde aynı sınır koşulları ve tekerlek ray yuvarlanma yüzeyi profillerinin dikkate alındığı koşullarda temas noktasında oluşan en yüksek eşdeğer Von-Mises gerilmesi 419,04 MPa olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla geliştirilen modelin literatürde yer alan çalışmaya oldukça yakın gerçekçi sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Şekil 4’de doğrulama sonucu tekerlek temas noktasında oluşan en yüksek Von-Mises eşdeğer gerilme değeri ve yüzeyde gerilme dağılımı yer almaktadır.

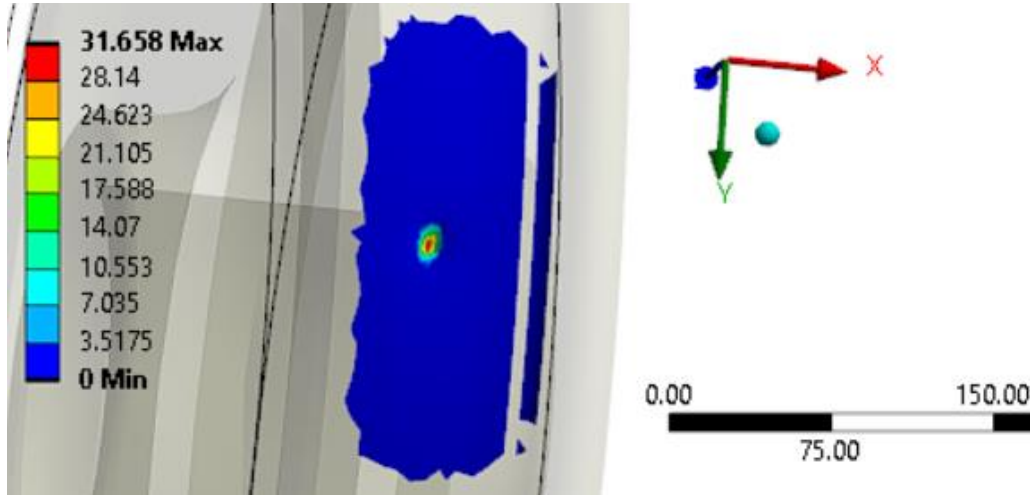


Şekil 4. 16,25 ton aks yükü altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde oluşan Von-Mises gerilmesi dağılımı

Şekil 5’de temas yüzeyi ve tekerlek yuvarlanma yüzeyinde temasa yakın bölgeler analiz edilmiştir. Buna göre beklenildiği gibi tekerlek yuvarlanma yüzeyinde küçük bir eliptik yüzeyde temas ve kayma olduğu analiz edilmiştir. Bunun yanısıra Şekil 6’da temas noktası ve yakın yüzeylerde oluşan sürtünme gerilme değeri mega-paskal biriminde yer almaktadır.



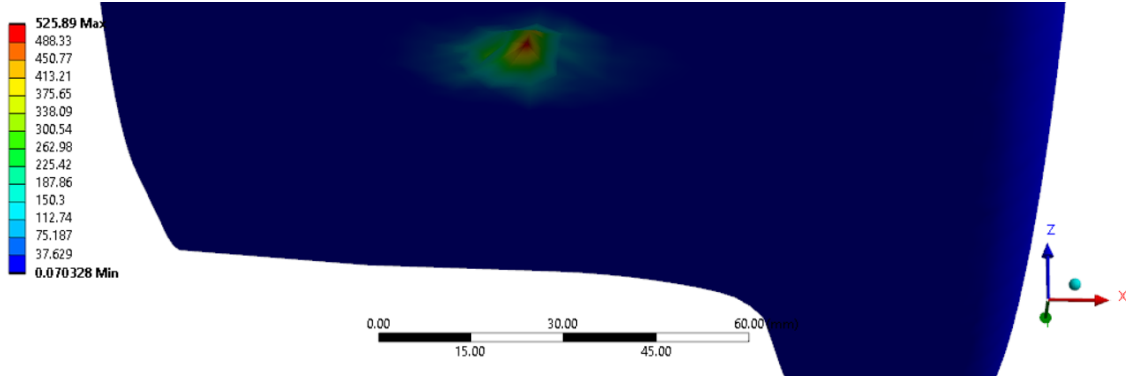
Şekil 5. Analiz için tanımlanan sınır koşulları altında tekerlek üzerinde temas noktası ve yakın yüzeyler



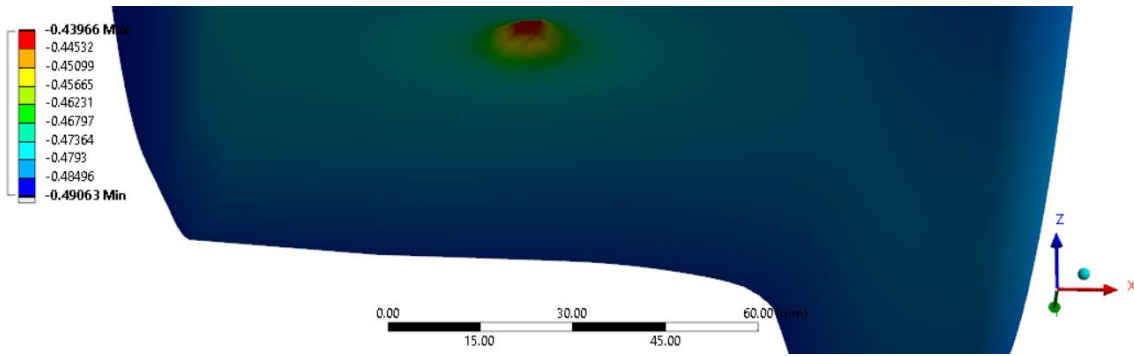
Şekil 6. Analiz için tanımlanan yük değeri altında tekerlek üzerinde temas noktası ve yakın yüzeylerde oluşan sürtünme gerilme değeri

3.2. Farklı sınır koşullarında düz yol ve dar kurp için yüksek hızlı yük işletmeciliği şartları altında elde edilen analiz sonuçları

Araç tekerleği için geliştirilen model dinamik etkilerin karşılığı olan %40 ek yük koşullarında tekrardan analiz için kullanılmıştır. Buna göre yük altında dinamik şartlarda temas bölgesinde oluşan en yüksek Von-Mises gerilme değeri 525,89 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 7). Aynı sınır koşulları altında araç yükünün tekerleğe etki ettiği -z ekseninde yer değiştirme değeri 0,49 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 8).

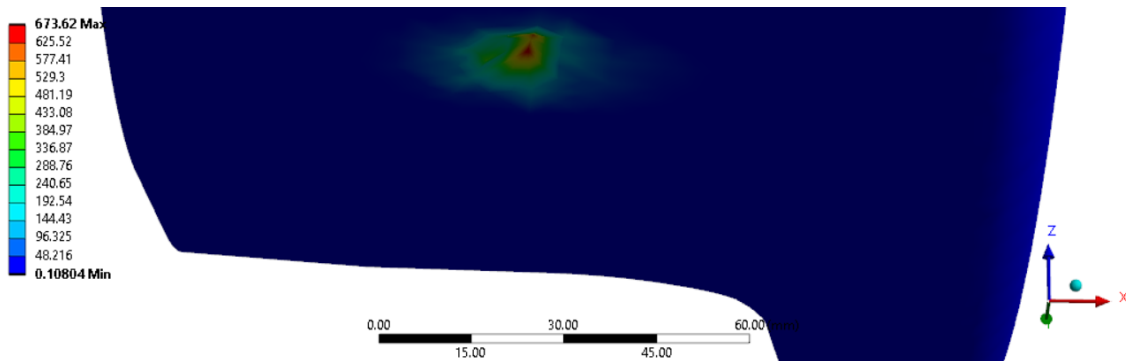


Şekil 7. %40 artırılmış yük altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilme değeri dağılımı

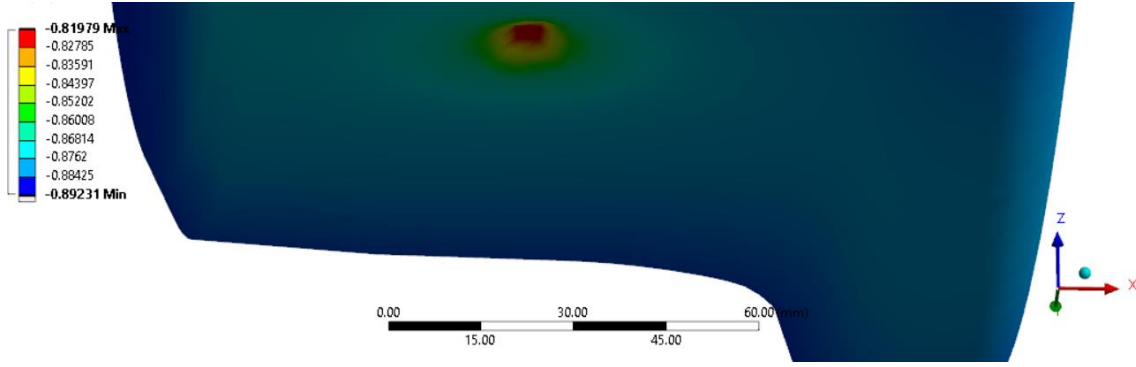


Şekil 8. %40 artırılmış yük altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde -z ekseninde oluşan yerdeğiştirme değeri

Fransa'da işletilen TGV yüksek hızlı trenleri aynı zamanda yük taşımacılığı için de kullanılmaktadır. Buna göre artırılmış dinamik, frenleme ve diğer mekanik yükleme şartları altında oluşan 149,45 kN yükleme koşullarında [26] tekerlek temas yüzeyinde oluşan gerilme değeri 673,62 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 9). Aynı analiz ile elde edilen -z eksenindeki yer değiştirme değeri 0,89 mm'dir (Şekil 10). Buna göre hıza bağlı dinamik yükler dikkate alındığında elde edilen 525,89 MPa gerilme ve 0,49 mm yerdeğiştirme değerinin çok üzerinde zorlu şartlar altında işletmecilik yapılacağı anlaşılmaktadır.



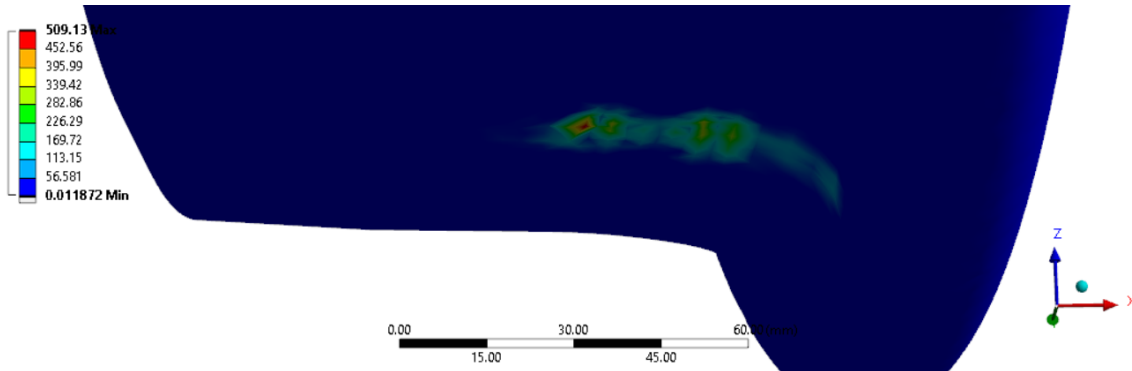
Şekil 9. 149,45 kN artırılmış yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilme değeri dağılımı



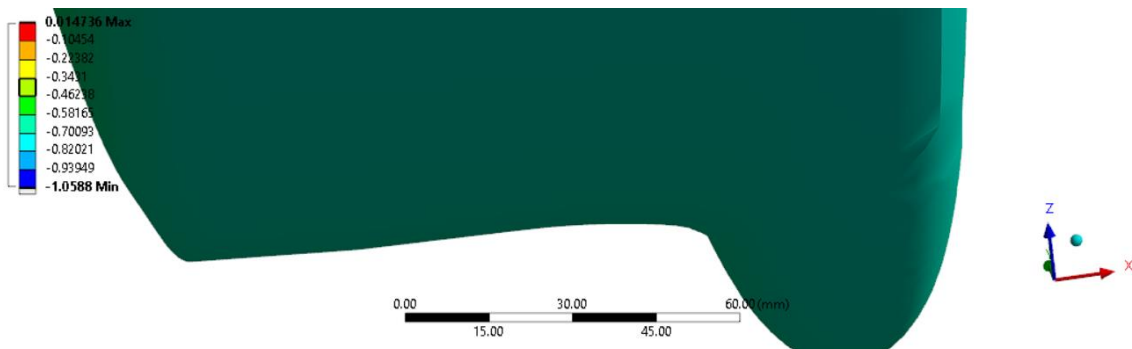
Şekil 10. 149,45 kN artırılmış yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde -z ekseninde oluşan yerdeğiştirme değeri

Deng vd. [29] çalışmasında yüksek hızlı yük taşımacılığı için yatay yüklerin modellesini yapmıştır. Buna göre demiryolu aracının en az 5500 m kurp, 169 mm dever ve 350 km/s hız ile işletilmesi şartları analiz edilmiştir. Geliştirilen lineer-plastik malzeme modelinde tekerlek ray sürtünme katsayısı 0,32-0,35 alınmış ve tekerlek takımına iletilen en büyük yanal yük değerinin stabil yükleme durumu için 22 kN olduğu analiz edilmiştir.

Bu çalışmada 22 kN yatay yük değeri kurplu yüksek hızlı işletmecilik şartlarında oluşan yükleme durumu olarak ele alınmış ve analizler yapılmıştır. Buna göre kurplu işletme şartları altında en yüksek gerilme değeri 509 MPa (Şekil 11), yerdeğiştirme değeri ise 1,05 mm (Şekil 12) olarak elde edilmiştir. Dar kurplu işletme şartlarında tekerleğin flanş alanına yakın bölgelerin de ray yuvarlanma yüzeyiyle temasta olduğu dikkate alındığında gerilim değerlerinin tekerlek yuvarlanma yüzeyinde yayıldığı ve bir kısmının flanş bölgesinde toplandığı analiz edilmiştir.



Şekil 11. 149,45 kN dikey ve 22 kN yatay artırılmış yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilme değeri dağılımı



Şekil 12. 149,45 kN dikey ve 22 kN yatay artırılmış yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde -z ekseninde oluşan yerdeğiştirme değeri

4. Sonuç

Bu çalışmada yüksek hızlı tren işletmeciliğinde yolcu naklinin yanında yük nakli durumu değerlendirilmiştir. Dünyada farklı ülkelerde yük taşımacılığı yüksek hız ile yapılmaktadır. Buna göre Fransa’da işletilen yüksek hızlı trenler için kargo ulaştırmasında elde edilen hız, yükleme, frenleme gibi sınır koşulları altında oluşan yükleme değerleri dikkate alınarak gerilme ve yerdeğiştirme analizleri yapılmıştır. Bunun yanısıra hıza bağlı dinamik yükleme şartlarının %40 arttığı durum için analizler ayrıca tamamlanmıştır. Buna göre %40 artırılmış dinamik etkiler altında elde edilen 525,89 MPa gerilme ve 0,49 mm yerdeğiştirme değerinin, tanımlanan sınır koşulları altında yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları için 673,62 MPa ve 0,89 mm olarak yükseldiği görülmektedir. İşletmede kullanılan monoblok tekerlek çeliğinin akma mukavemetinin 580 MPa olduğu dikkate alındığında %40 artırılmış dinamik etki altında ulaşılan gerilme değerinin bu limitin altında kaldığı ancak tanımlanan sınır koşulları altında yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları için elde edilen gerilme değerinin bu değerin üzerine çıktığı görülmektedir.

Dar kurp şartlarında artan yatay yüklemelerin dikkate alındığı analizlerde, gerilme konsantrasyonunun tekerlek ray etkileşimine bağlı olarak yuvarlanma yüzeyinin yanısıra tekerlek flanşına doğru yayıldığı görülmüştür. Bu şartlarda elde edilen en yüksek gerilme değeri 509 MPa, yerdeğiştirme değerinin 1,05 mm olduğu analiz edilmiştir. Demiryollarında tekerlek ray teması uzun yıllardır, demiryollarının dünyada kullanılmaya başlandığı günden itibaren yoğunlukla çalışılan bir konu olmuştur. Günümüzde karmaşık işletme şartları, çok boyutlu analiz girdileri dikkate alındığında konunun halen yoğun olarak araştırmacılar tarafından ele alındığı görülmektedir. Sonlu elemanlar analizinde belirlenen sınır koşulları analiz hassasiyetini ve sonuçları birincil dereceden etkilemektedir. Bu nedenle daha hassas analizler için daha yoğun ağların atıldığı simülasyon çalışmalarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada tanımlanan sınır koşulları altında dar kurp ve düz yol yükleme şartları için tekerlek bileşeninin analizi yapılmıştır. Analiz ile edilen değerler dikkate alındığında gelecekte tekerlek bileşeni için kullanılmak üzere malzemelerin daha yüksek mukavemette tasarlanıp üretilmesi güvenli işletmecilik açısından dikkate alınması gereken önemli bir durumdur. Bu konuda son yıllarda tekerlek çeliğinin mikroyapısı manipüle edilerek yüksek mukavemet gerektiren durumlarda bey nitelik çeliklerin kullanımı makas, kurp veya yük taşımacılığı için alternatif malzeme olarak yoğunlukla araştırılmaktadır.

Kaynakça

- [1] L. Ramanan, R. K. Kumar, and R. Sriraman, “Thermo-mechanical finite element analysis of a rail wheel,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 41, no. 4–5, pp. 487–505, 1999, doi: 10.1016/S0020-7403(98)00078-2.
- [2] E. Kabo and A. Ekberg, “Fatigue initiation in railway wheels - A numerical study of the influence,” *Wear*, vol. 253, no. 1–2, pp. 26–34, 2002, doi: 10.1016/S0043-1648(02)00079-0.
- [3] M. Krácalík, G. Trummer, and W. Daves, “Application of 2D finite element analysis to compare cracking behaviour in twin-disc tests and full scale wheel/rail experiments,” *Wear*, vol. 346–347, pp. 140–147, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2015.11.013.
- [4] H. M. El-sayed, H. N. Zohny, H. S. Riad, and M. N. Fayed, “A three-dimensional finite element analysis of concrete sleepers and fastening systems subjected to coupling vertical and lateral loads,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 122, no. September 2020, p. 105236, 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105236.
- [5] R. Masoudi Nejad, K. Farhangdoost, and M. Shariati, “Numerical study on fatigue crack growth in railway wheels under the influence of residual stresses,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 52, pp. 75–89, 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.03.002.
- [6] J. W. Seo, S. J. Kwon, H. K. Jun, and D. H. Lee, “Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 16, no. 7, pp. 2493–2507, 2009, doi: 10.1016/j.engfailanal.2009.04.013.

- [7] M. A. Arslan and O. Kayabaşı, “3-D Rail-Wheel contact analysis using FEA,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 45, no. 1, pp. 325–331, 2012, doi: 10.1016/j.advengsoft.2011.10.009.
- [8] Y. Liu, B. Stratman, and S. Mahadevan, “Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels,” *Int. J. Fatigue*, vol. 28, no. 7, pp. 747–756, 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.09.007.
- [9] R. Masoudi Nejad, “Using three-dimensional finite element analysis for simulation of residual stresses in railway wheels,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 45, pp. 449–455, 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.07.018.
- [10] M. Toumi, H. Chollet, and H. Yin, “Finite element analysis of the frictional wheel-rail rolling contact using explicit and implicit methods,” *Wear*, vol. 366–367, pp. 157–166, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.06.008.
- [11] L. Han, L. Jing, and L. Zhao, “Finite element analysis of the wheel-rail impact behavior induced by a wheel flat for high-speed trains: The influence of strain rate,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 232, no. 4, pp. 990–1004, 2018, doi: 10.1177/0954409717704790.
- [12] X. Zhou, L. Jing, and X. Ma, “Dynamic finite element simulation of wheel-rail contact response for the straight track case,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 24, no. 5, pp. 856–869, 2021, doi: 10.1177/1369433220971733.
- [13] M. A. Che Zulkifli, K. S. Basaruddin, M. Afendi, W. H. Tan, and E. M. Cheng, “Finite Element Simulation on Railway Wheels under Various Loading,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 429, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/429/1/012002.
- [14] L. Xin, V. L. Markine, and I. Y. Shevtsov, “Numerical analysis of the dynamic interaction between wheel set and turnout crossing using the explicit finite element method,” *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 3, pp. 301–327, 2016, doi: 10.1080/00423114.2015.1136424.
- [15] A. B. Rezende *et al.*, “Wear behavior of bainitic and pearlitic microstructures from microalloyed railway wheel steel,” *Wear*, vol. 456–457, no. January, p. 203377, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203377.
- [16] M. R. Zhang and H. C. Gu, “Microstructure and properties of carbide free bainite railway wheels produced by programmed quenching,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 8, pp. 970–974, 2007, doi: 10.1179/174328407X192831.
- [17] B. Gao *et al.*, “Accelerated Isothermal Phase Transformation and Enhanced Mechanical Properties of Railway Wheel Steel: The Significant Role of Pre-Existing Bainite,” *Steel Res. Int.*, vol. 93, no. 2, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1002/srin.202100494.
- [18] Y. Sarikavak, “Wheel Rail Interaction; a Finite Element Analysis on Fatigue Failure Resistance of Pearlitic and Bainitic Steels,” *Railw. Eng.*, no. 14, pp. 65–76, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.934471.
- [19] M. Boehm, M. Arnz, and J. Winter, “The potential of high-speed rail freight in Europe: how is a modal shift from road to rail possible for low-density high value cargo?,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 13, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s12544-020-00453-3.
- [20] E. C. Martínez, “Maintenance management and maintenance processes in railway operators: Case studies,” Barcelona, 2016.
- [21] A. Ghidini, M. Diener, A. Gianni, and J. Schneider, *Innovative steel by Lucchini RS for high-speed wheel application*.
- [22] L. Boussalia and A. Bellaouar, “Numerical simulation of the tread defects’ form impact on the eigen frequencies of a railway wheel,” *UPB Sci. Bull. Ser. D Mech. Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 63–74, 2018.
- [23] E. Norm, “EN 13979-1; Railway applications - Wheelsets and bogies - Monobloc Wheels - Technical approval procedure - Part 1: Forged and rolled wheels,” 2006.
- [24] EN 13674-1, “Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above applications,” 2013.
- [25] Y. Sarikavak, “Demiryollarında Ön Germeli Traverslerin Farklı İşletme Yükleri Altında Mekanik Analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 115–121, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.832641.
- [26] D. Plotkin, “Carrying freight on high-speed rail lines,” *J. Transp. Eng.*, vol. 123, no. 3, pp. 199–201, 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1997)123:3(199).
- [27] G. Troche, “High-speed rail freight - Efficient train systems for freight transport,” KTH Railway Group Report 0512, Stockholm, 2005.
- [28] S. D. Iwnicki, S. Stichel, A. Orlova, and M. Hecht, “Dynamics of railway freight vehicles,” *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 53, no. 7, pp. 995–1033, 2015, doi: 10.1080/00423114.2015.1037773.
- [29] G. Deng, Y. Peng, and C. Yan, “Running safety evaluation of a 350 km / h high-speed freight train negotiating a curve based on the arbitrary Lagrangian-Eulerian method,” 2021, doi: 10.1177/0954409720986283.

Özgeçmiş**Yasin SARIKAVAK**

Makine Yüksek Mühendisi, Dr.; Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Aynı yıl TCDD, Ankara Demiryolu Fabrikası, Motor Grup Müdürlüğü'nde mühendis olarak göreve başlamıştır. Yüksek Hızlı Tren Bakım Onarım Müdürlüğü'nde ve kurucu mühendisleri arasında yer aldığı Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi (DATEM)'nde görev yapmıştır. Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC), Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı (JICA) gibi uluslararası kurumlarda çeşitli komisyonlarda ve projelerde görev almıştır. Halen Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: sarikavak@gmail.com; ysarikavak@ybu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



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

Seçkin ULUSKAN^{*1} , Ahmet Mert AKDAĞLI² 

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

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

*seckinuluskan@eskisehir.edu.tr

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

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

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

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

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

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

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

1. Giriş

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

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

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

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

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

2. Raylı Sistem Frenleme Eğrileri

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

2.1. Frenleme eğrileri ve hız-konum grafikleri

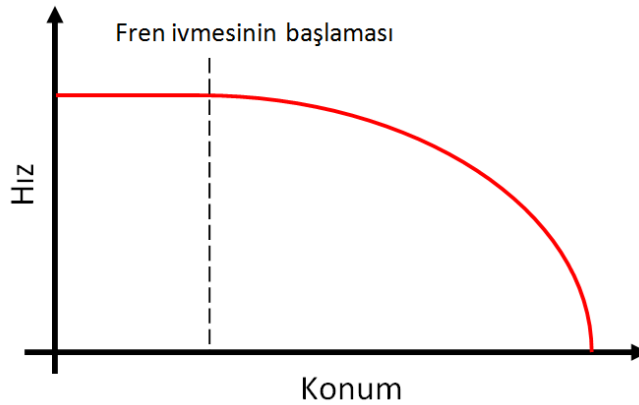
Bu bölümde tren frenleme eğrilerinin genel denklemleri aktarılacaktır. Tren frenleme eğrileri temel olarak, bir trenin frenleme karakteristiğini hız-konum grafikleri aracılığıyla gösteren grafiklerdir. Frenleme anında tren için alınan yol denklemi, zamana bağlı olarak şu şekilde ifade edilir:

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

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

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

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



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

2.2. Avrupa Demiryolları Ajansı frenleme eğrileri

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

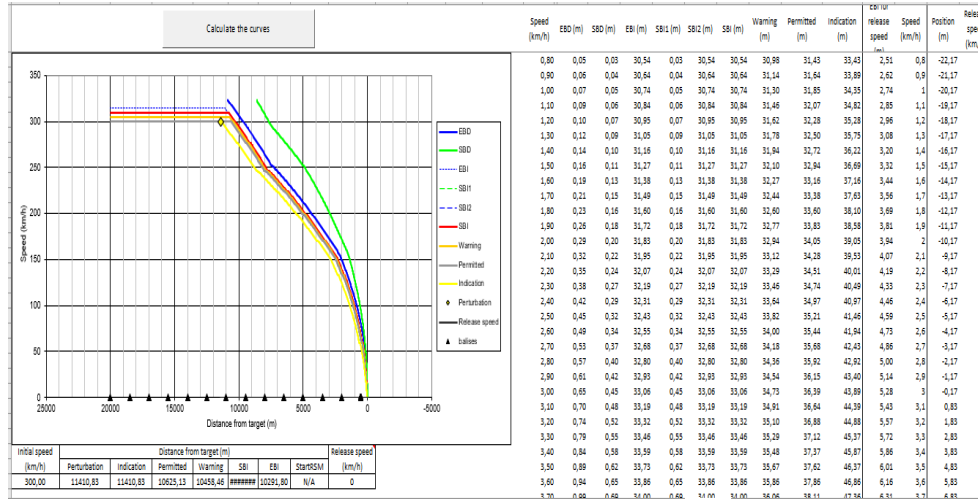
Avrupa Demiryolları Ajansının (ERA) frenleme eğrilerini modellemek amacıyla oluşturduğu Excel dokümanında, trenlere ve hatlara yönelik çok sayıda parametrenin girilebilmesi için farklı çalışma sayfaları bulunmaktadır. Bu çalışma sayfalarından ilki olan tren parametreleri sayfasında, tren türü, fren konumu,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

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

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

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

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



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

3. Frenleme, Hata ve Kaza Önleme Simülasyonları

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

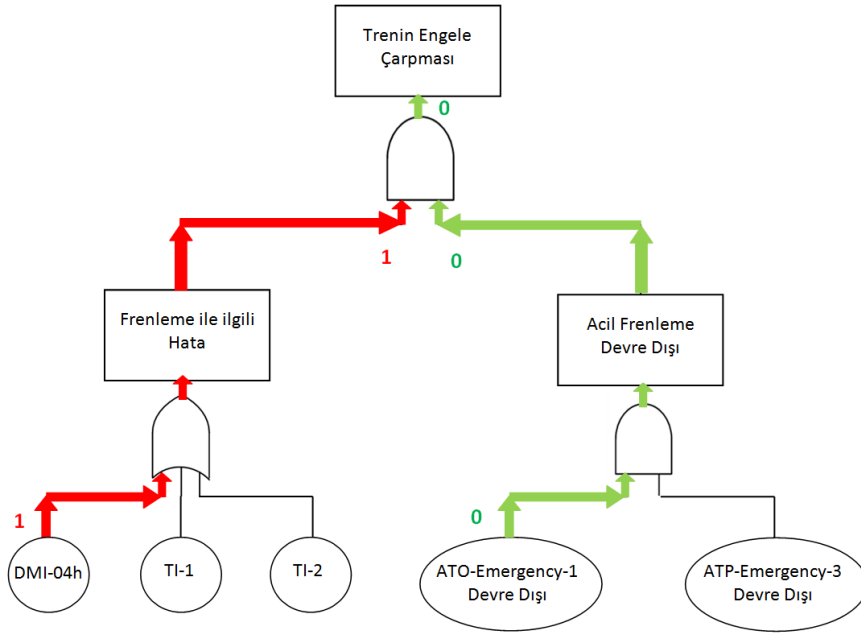
3.1. Hata ağacı analizi

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

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

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

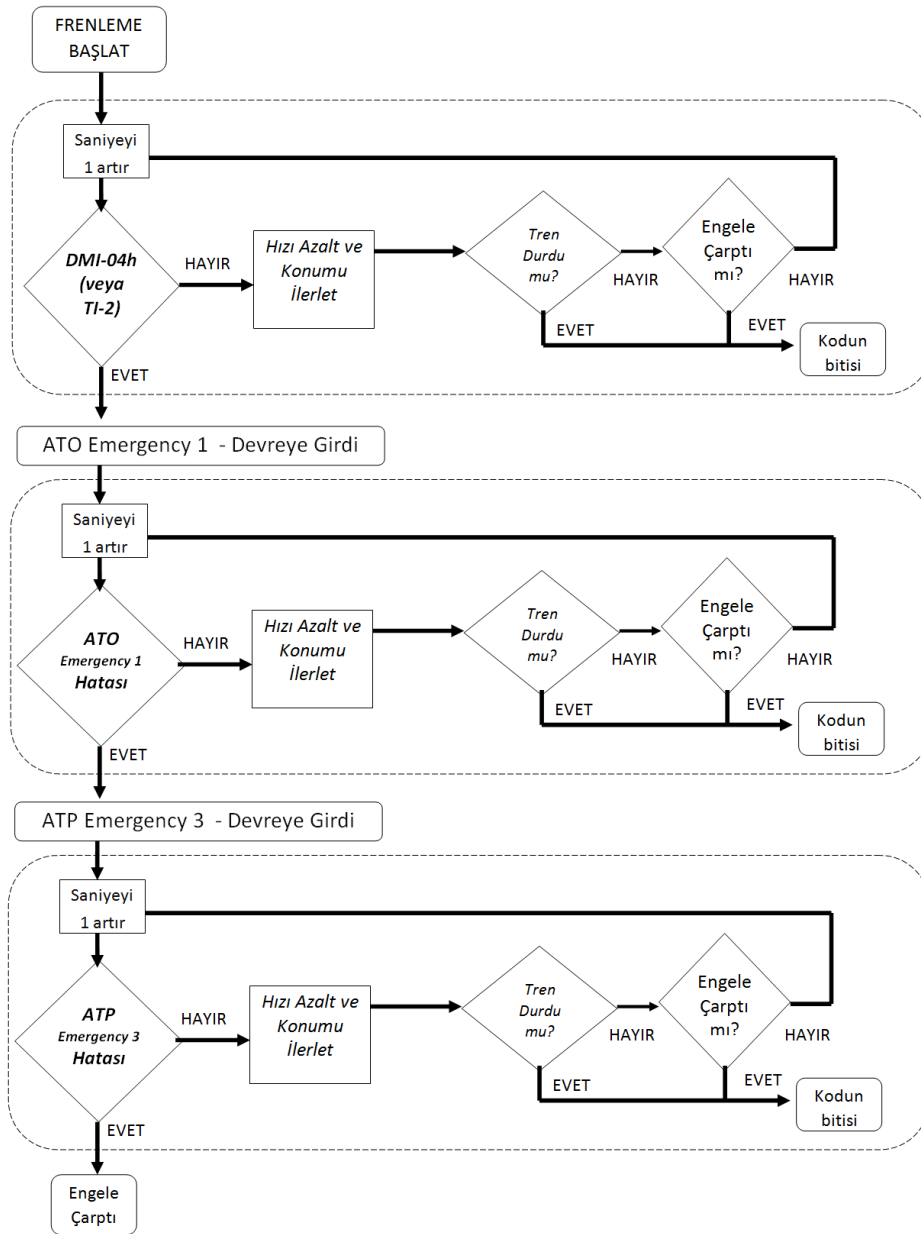
Bu hataların kazaya yol açmasını önlemek için EN 13452-1 standardında belirtilen ATO-Emergency-1 ve ATP-Emergency-3 adlarına sahip acil durum frenleri kullanılmıştır. Oluşturulan örnek hata ağacı Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'te, örnek olarak DMI-04h hatası geliştiğinde, acil frenlerin engele çarpmayı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



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

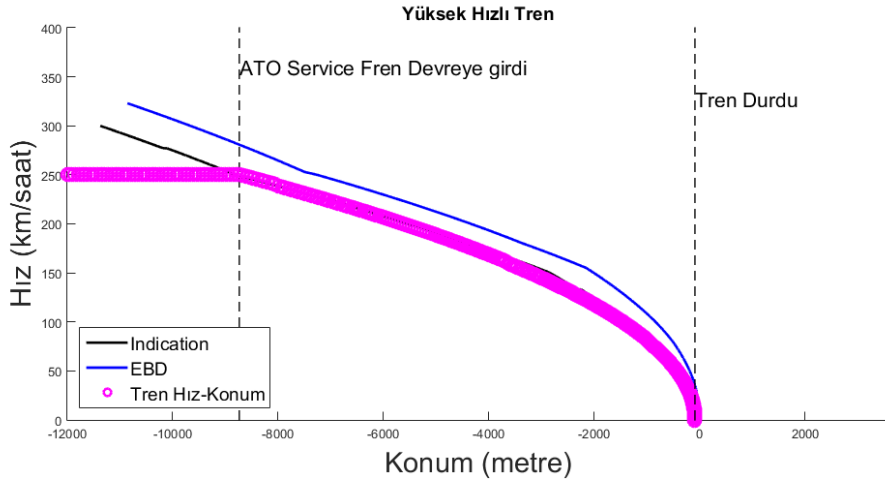
3.2. Matlab ortamında frenleme ve kaza simülasyonları

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

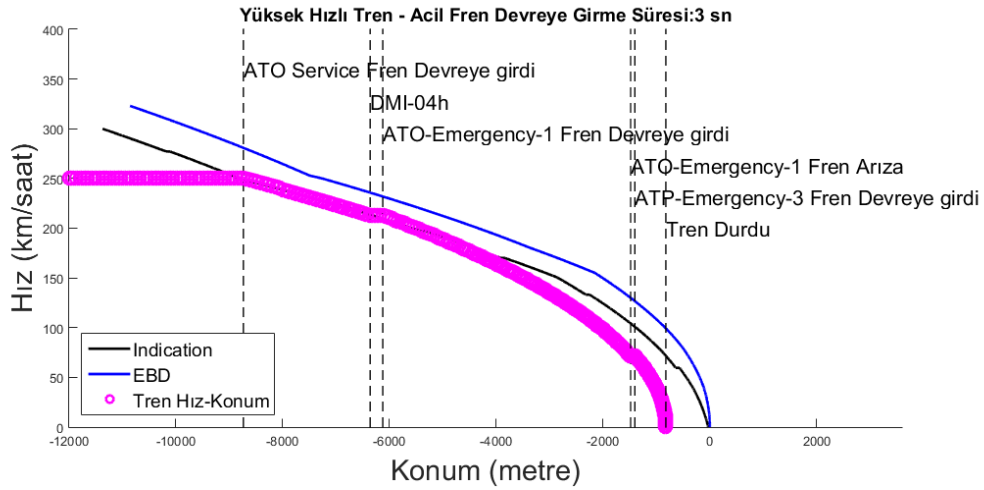


Şekil 4. Kaza simülasyonu için Matlab koduna yönelik örnek bir akış diyagramı

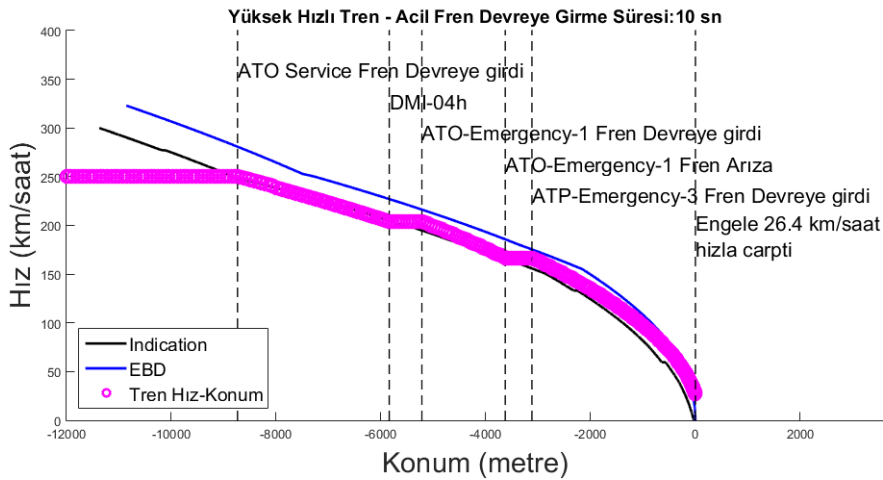
Matlab ortamında oluşturulan simülasyon görüntüleri aşağıda sunulmuştur. Şekil 5'te gösterilen Yüksek Hızlı Tren (YHT) simülasyonunda, tren ilk olarak sabit hızla giriş yapmaktadır. Hata olmaması durumunda, Şekil 5'te gösterildiği üzere, işaret çizgisine ulaştığında frenleme başlayarak, engele çarpmadan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



Şekil 5. Simülasyonlarla elde edilen normal frenleme grafiği



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



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

3.3. Monte Carlo simülasyonları ile kaza oranları

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. Sonuç ve Değerlendirme

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

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

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

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

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

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

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

Tesekkür

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

Kaynakça

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

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

Özgeçmiş



Seçkin ULUSKAN

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

E-Posta: seckinuluskan@eskisehir.edu.tr



Ahmet Mert AKDAĞLI

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

E-Posta: ahmetmertakdagli@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

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



Demiryollarında Akıllı Ulaşım Sistemi Çözümleri için Bir Öneri: Dijital Demiryolu

Hasan Burak GÖKÇE*¹, Serhan SUBAŞI², Ercan KIZILAY²,
Ahmet Ertuğrul HACİCAFEROĞLU², Sami Özge ARIOĞLU²

¹ Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş., İstanbul, Türkiye

² Yapı Merkezi İDİS A.Ş., İstanbul, Türkiye

*burak.gokce@ym.com.tr

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

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

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

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

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

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

1. Giriş

1.1. Demiryollarının kimi sorunları

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

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

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

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

1.2. Demiryollarında yeni hat yapılması ve mevcut hat modernizasyonu ikilemi

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

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

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

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

1.3. Demiryollarında dijitalleşme

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

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

Tablo 2. Dünyada demiryollarında bazı dijitalleşme adımları

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

1.4. Amaç ve kapsam

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

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

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

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



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

2. Deprem Uyarı Sistemi

2.1. Genel

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

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

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

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

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

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

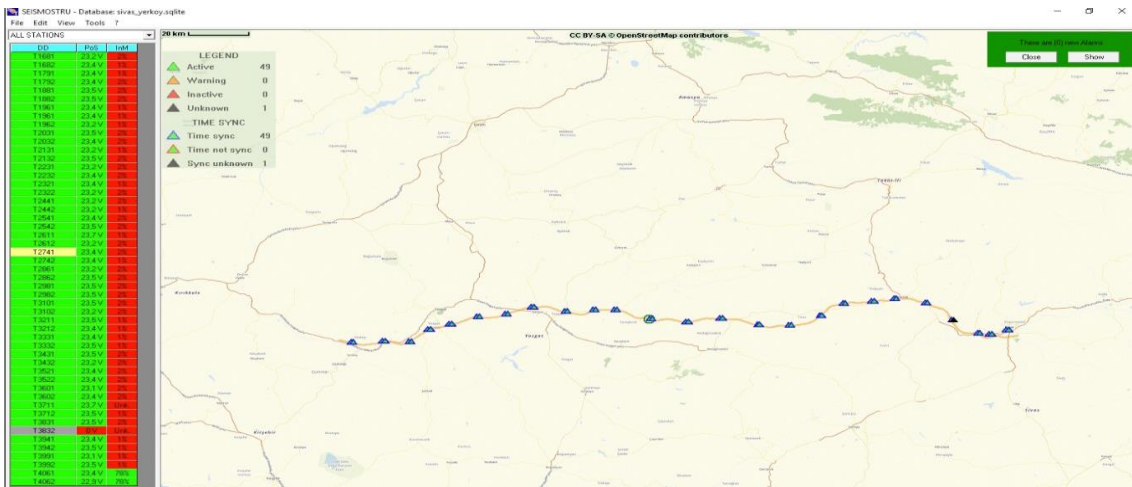
Deprem uyarı sisteminin Türkiye’de bir demiryoluna ilk kez entegre edilmesi için seçilen Yerköy-Sivas projesinde ölçüm sistemi Yapı Merkezi İDİS şirketi ve danışman akademisyenlerin işbirliği ile hayata geçirilmiştir. Kurulan sistemde güzergâh boyunca ortalama her 10 km’de birbirini yedeklemeli iki algılayıcı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



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

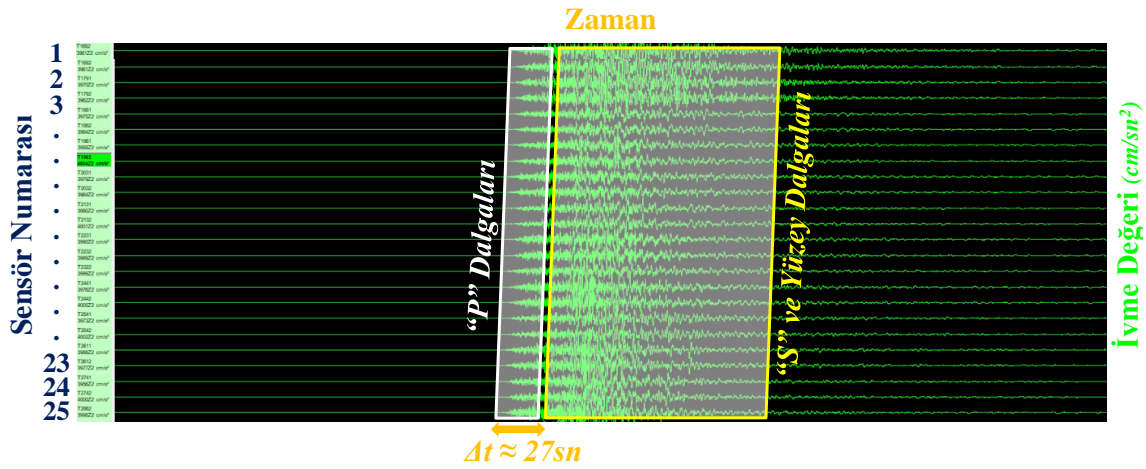
6 Şubat 2023 günü saat 04:17'de AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı verilerine göre merkez üssü Pazarcık-Kahramanmaraş (E: 37.288, B: 37.043), moment büyüklüğü $M_w=7,7$ ve odak derinliği 8,6 km olan yıkıcı bir deprem meydana gelmiştir. Aynı gün, ilk depremden yaklaşık 9 saat sonrasında yine AFAD verilerine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

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



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

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



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

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

3. Akıllı Travers

3.1. Genel

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

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

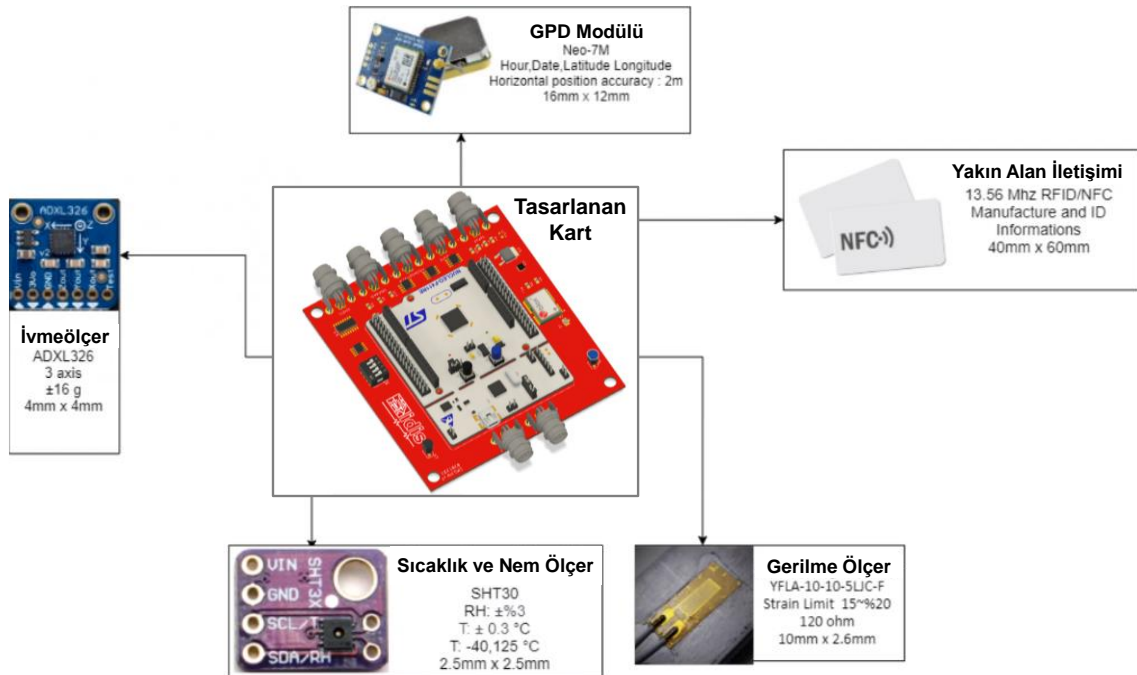
Ayrıca, travers üzerinden toplanan statik ve dinamik veriler ile balastın donması ve soğuk havada ray pedinin sertleşmesi gibi olgular ortaya çıkarılabilmektedir [29]. İtalya’da ise travers yüzeylerine yerleştirilen fotoelektrik pil modülleri ile güneşten [32] veya travers üzerinde yer alan tek serbestlik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

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

3.2. Geliştirilen sistem ve laboratuvar uygulaması

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

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

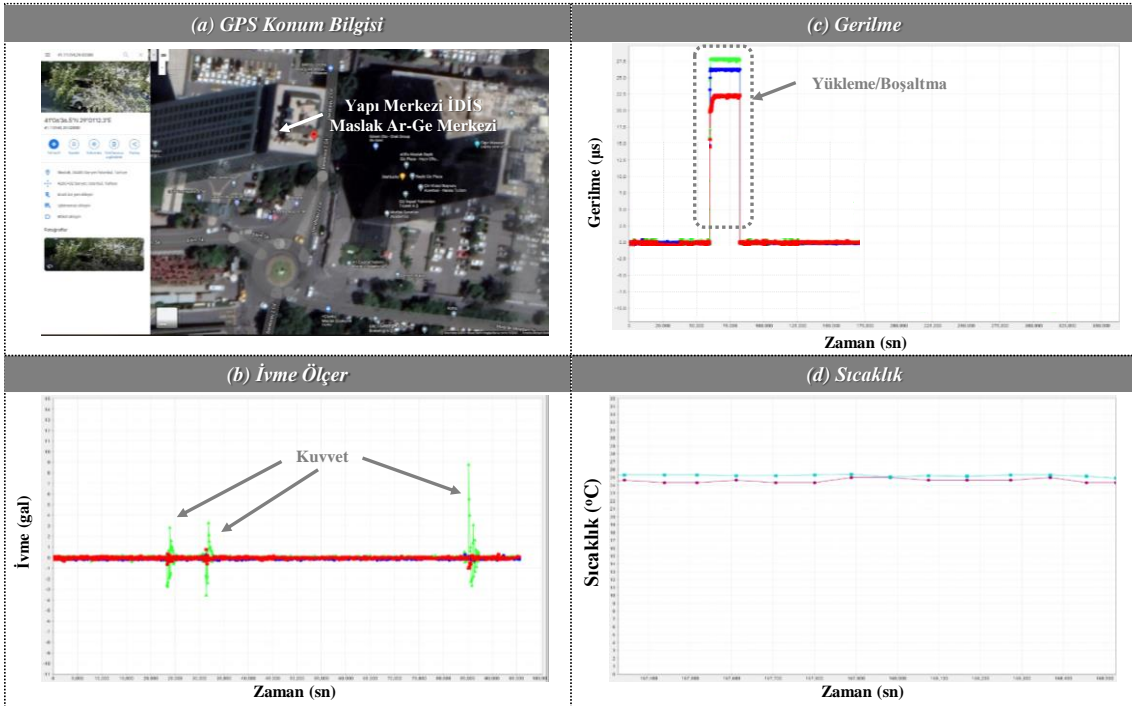


Şekil 5. Sıcaklık, ivme, gerilme ve GPS ölçümleri yapabilecek kabiliyete sahip, yerli olarak tasarlanan ve üretilen özel kartın bileşenleri

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



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



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

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

4. Çevresel Kontrol Sistemi

4.1. Genel

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

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

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

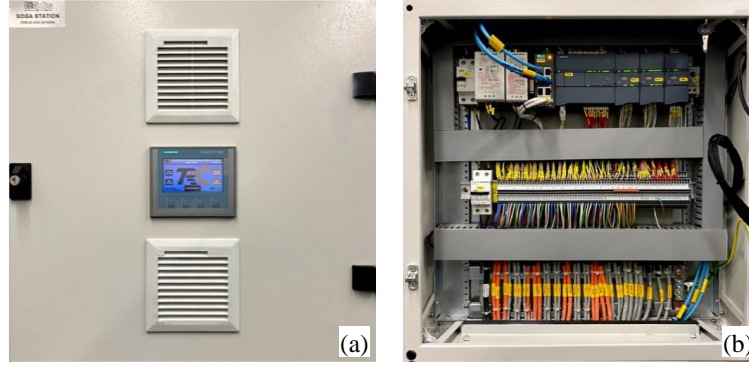
Tanzanya’da önemli demiryolu hamlelerinden biri olan Morogoro-Makutupora Demiryolu Projesi toplam 336 km tek hatta sahip olup, yük ve yolcu trenleri tasarım hızları sırasıyla 120 ve 160 km/saat’tir. Projede 8 yolcu istasyonu, 5 yük istasyonu, 1 depo ve manevra sahası, 1 çok modlu taşımacılığa uygun konteyner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

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

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

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

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



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



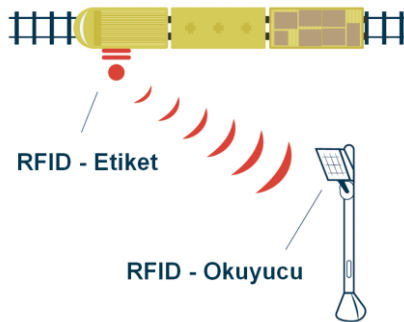
Şekil 9. Projenin SCADA sisteminde (a) alarm sisteminin genel görünüşü ve (b) istasyon görünüşü

5. Demiryolu Araçları Yönetim Sistemi

5.1. Genel

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

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



Şekil 10. RFID teknolojisinin şematik gösterimi

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

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

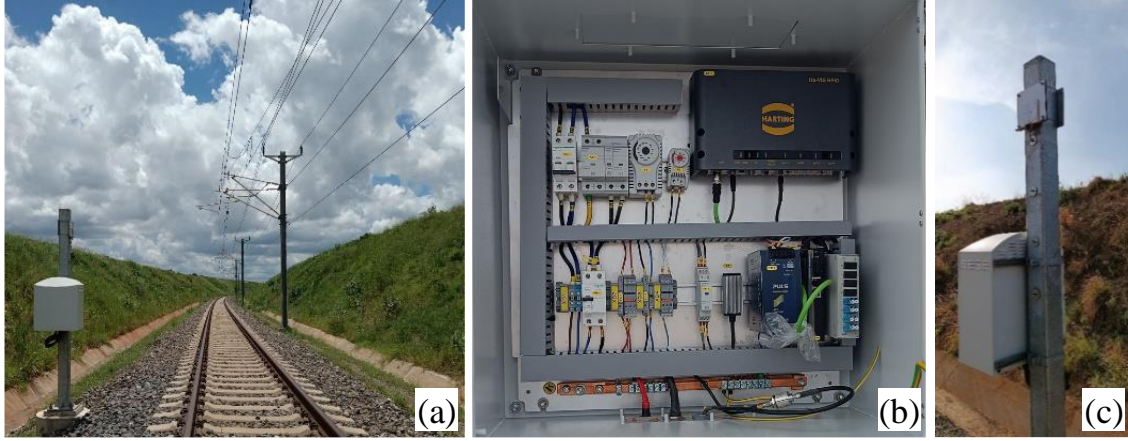
Tanzanya'da yer alan, 205 km tek hat uzunluğuna sahip Dar Es Salaam-Morogoro Demiryolu Projesi'nde yük ve yolcu trenleri için tasarım hızları sırasıyla 80 km/sa ve 160 km/sa olarak belirlenmiştir. Söz konusu proje, 6 adet yolcu ve 4 adet yük istasyonlarının yanı sıra 1 adet depo ve manevra sahası ile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

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

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

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

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



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

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

6. Sonuçlar

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

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

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

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

Teşekkür

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

Kaynakça

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

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

Özgeçmiş

**Hasan Burak GÖKÇE**

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

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

**Serhan SUBAŞI**

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

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

**Ercan KIZILAY**

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

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

**Ahmet Ertuğrul HACICAFEROĞLU**

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

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

**Sami Özge ARIOĞLU**

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

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

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

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



Görüntü İşleme Yoluyla Otonom Tren-Hayvan Kazası Önleme Sistemi

Mustafa Kaan BALTACIOĞLU*¹, Mustafa Tunahan BAŞAR^{2,3}, Muharrem KARAASLAN⁴, Zafer ÖZER⁵, Sefa ÖCAL¹

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

² Amasya Üniversitesi, Taşova Yüksel Akın Meslek Yüksek Okulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Amasya, Türkiye

³ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

⁴ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

⁵ Mersin Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

*mkaan.baltacioglu@iste.edu.tr

(Alınış/Received: 23.05.2023, Kabul/Accepted: 19.07.2023, Yayınlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Çalışmada tren yolu ulaşımlarında yol güzergâhı üzerinde bulunan hayvan ölümlerinin önlenmesi üzerine odak sağlanmıştır. Hemzemin geçitlerde bulunan bariyer sistemleri raylı ulaşım araçlarının çarpışma kazalarını önleyici unsur olarak görülse de kırsal bölgelerde yolculuk güvenliklerinin sağlanması ve maddî kayıpların önlenmesi için alternatif çözümler gerekmektedir. Çalışma kapsamında prototip ölçeklerde tasarlanan bir araç üzerine sesli uyarı sistemi, yavaşlama mesafesinde menzile sahip su püskürtme mekanizması, kamera ve lazer mesafe sensörleri konumlandırılmıştır. Aracın enerji gereksinimleri 11.1 Volt Lipo-Batarya ile desteklenmektedir. Kameradan alınan veriler doğrultusunda görüntü işleme prosesleri gerçekleştirilerek yol üzerinde bulunan engelin türü %80'den daha büyük oranlarda belirlenebilmektedir. Ayrıca araç engeli gördüğü andan itibaren 20 cm/s hızla giderken öncelikle hızını 11,75 cm/s seviyelerine düşürerek sesli uyarı sistemini devreye almaktadır. Eğer hala engel yol üzerinde ise araç hızını 7,85 cm/s seviyelerine düşürmekte ve engele 30 cm mesafede durarak su püskürtme sistemini çalıştırmaktadır. Engel yoldan çekildiği taktirde hareketine devam etmektedir. Sonuç olarak aracın hız kontrolleri, görüntü işleme analizleri ve uyarı sistemlerinin gerçek ölçeklerde araç özelliklerine göre düzenlenmesi ve geliştirilmesi gelecekte çarpışma kazalarının önlenmesinde önemli çıktılar ortaya koyabilir.

Anahtar kelimeler: Raylı ulaşımlar, Çarpışma kazaları, Görüntü işleme, Uyarı sistemleri, Doğal yaşam

Autonomous Train-Animal Crash Prevention System by Image Processing

Abstract: In the study, the focus is prevention of animal deaths on the road route in railway transportation. Although the barrier systems at level crossings are seen as a preventive factor for impact accidents of rail transportation vehicles, alternative solutions are needed to ensure travel safety and prevent financial losses in rural areas. Within the scope of the study, an audible warning system, a water spray mechanism with a range in the deceleration distance, a camera and laser distance sensors are positioned on a vehicle designed in prototype scales. The vehicle's energy requirements are supplied by 11.1 Volt Lipo-Battery. By performing image processing in line with the data received from the camera, the type of obstacle on the road can be determined at rates greater than 80%. In addition, from the moment the vehicle sees the obstacle, it activates the audible warning system by first reducing its speed to 11.75 cm/s while traveling at 20 cm/s. If the obstacle is still on the road, it reduces the vehicle speed to 7.85 cm/s and stops 30 cm from the obstacle, activating the water spray system. If the obstacle is out of the way, it continues to nominal

Atıf için/Cite as: M.K. Baltacıoğlu, M.T. Başar, M. Karaaslan, Z. Özer, S. Öcal, "Görüntü işleme yoluyla otonom tren-hayvan kazası önleme sistemi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 150-161, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1300927

movement. As a result, the regulation and development of vehicle speed controls, image processing analysis and warning systems at real scales according to vehicle characteristics may reveal important outputs in the prevention of impact accidents in the future.

Keywords: Rail transportation, Impact accident, Image processing, Warning systems, Natural life

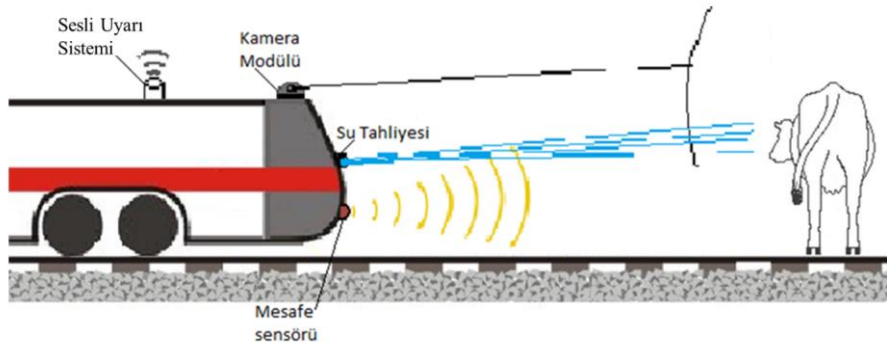
1. Giriş

Günümüzde kalabalık nüfus, ekonomik ve çevresel etkiler bakımından toplu taşıma unsurları içerisinde raylı ulaşım büyük bir öneme sahiptir. Bununla birlikte raylı ulaşımlarda otomatik kontrollü sistemlerin geliştirilerek yolculuk koşullarının iyileştirilmesi üzerine araştırmalar gerçekleştirilmektedir [1]. Tren yolu güvenliklerinin sağlanabilmesi için sinyalizasyon sistemlerinin aracın hız ve konum verileri ile haberleşmesini sağlayan sistemlerin geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda bilgisayar kontrollü sistemlerin raylı ulaşımlarda yaygınlaştırılmalarının güvenlik ve yolculuk konforu açısından önemli çıktıları ortaya koyabileceği düşünülmektedir [2]. Taşımacılıkta sağladığı avantajlar doğrultusunda yaygın kullanıma sahip olan raylı ulaşımların yol güvenliklerinin artırılması üzerine çalışmaların sürdürülmesi gerekliliği vurgulanmaktadır [3]. Ancak sürekli gelişen dünya ve ihtiyaçlar doğrultusunda artan raylı ulaşım beraberinde artan kazaları meydana getirmektedir. Bundan dolayı yapay zekâ uygulamaları gibi akıllı sistemlerin geliştirilmesi üzerine odak sağlanmıştır [4]. 2018 yılında elde edilen verilere bakıldığında Avrupa Birliği bölgesinde 1666 kaza meydana geldiği bildirilmektedir. Bu sayının 939'u hareket halindeki vagonları ve insanları (intiharlar hariç) ve 442'si yayaları içeren hemzemin geçit kazalarını içermektedir. Aynı zamanda 2010 ile 2018 yılları kaza sayılarının nerede ise dörtte bir oranında azaldığı belirtilmektedir [5-6]. Ülkemiz için bir değerlendirme yapıldığında son yıllarda incelenen kaza raporları doğrultusunda 39 kaza meydana gelmiştir. Bu kazalar içerisinde raporlar detaylı incelendiğinde hemzemin geçit, çarpışma ve deray kazaları başlıca kaza türleri olarak bildirilmektedir [7]. Bu perspektiften bir değerlendirme yapıldığında kazaların önlenmesi adına çevresel koşulların iyileştirilmesi ve araç yapının teknik donanım açısından geliştirilmesi gerekliliği öne çıkmaktadır [8]. Raylı ulaşımlarda meydana gelen kazaların genel oluşum nedenleri incelendiğinde; Hemzemin geçit kazaları, deray kazaları ve çarpışma kazalarının sebebiyet verdiği gözlemlenmektedir. Genel bir değerlendirme yapıldığında bu kaza oluşumları içerisinde ülkemiz için ve genel Avrupa ülkeleri düzeyinde en çok meydana gelen kaza türleri sırası ile hemzemin, deray ve tren çarpışma kazaları olduğu ortak kanaattir [7]. Bu kaza türlerinin etkin bir şekilde çözümlenebilmesi için haberleşme sistemlerinin ve otonom araç mekanizmalarının geliştirilmesi bir gereksinim haline gelmiştir. Demiryolu haberleşme sistemlerinde insan yönetiminde uygulamaların kullanılması gelecekte risk oluşturabilecek unsurlar arasında belirtilmektedir [9]. Bununla birlikte raylı ulaşımlarda mesafe kontrollerinin sağlanarak ulaşımda bulunan trenlerin birbiri ile haberleşmesi güvenlik parametrelerinin geliştirilmesine katkı sağlayabileceği bildirilmektedir [10]. Yol güvenliklerinin sağlanabilmesi adına deray gibi kritik bir kaza analizinin gerçekleştirilmesine bağlı olarak sesli ve görsel olarak makinist uyarı sistemlerinin geliştirilmesi üzerine çalışmaların gerçekleştirildiği bildirilmektedir. Bu bağlamda otomasyon sistemlerinin raylı ulaşımlara uyarlanması önem verilmektedir [11]. Ek olarak demiryolu güvenliğinde insan etkileşimleri incelendiğinde önemsememe, dikkatsizlik, bilgi eksikliği, yorgunluk, yanılma gibi etkenlerin kazalara doğrudan sebebiyet verebileceğine değinilmektedir [12]. Öte yandan otonom uygulamaların geliştirilerek trenlerde anlık haberleşme sistemlerinin daha düşük hata oranlarında gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Tren yolu üzerinde bulunan hayvanlara tren çarpması sonucu meydana gelen kazalarda hayvanların telef olması, araç yapının maddi zarar görmesi ve aracın kontrolden çıkması gibi çok büyük problemlerin oluşması muhtemeldir. Bu durumun önlenmesi adına literatürde yol üzerinde kusurların belirlenmesi için nesne algılama ve algılanan nesnenin türünün belirlenerek çözüm yöntemleri türetilmesi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [13-15]. Çoklu sensör kullanımları ile yol üstü engel tespitlerinin gerçekleştirilmesi üzerine gerçek ölçeklerde çalışmalar yürütülmektedir [16]. Demiryollarında hayvan teleflerinin önlenmesi

adına çoklu sensör uygulamaları kullanılarak başarılı bir şekilde yol üzerinde unsur tespitlerinin sağlanabileceği ifade edilmektedir [17]. Ancak optik sensörler, kamera kullanımları gibi pahalı ekipmanların gerekliliği gerçek ortamlarda deneysel çalışmaların maliyetini arttırmaktadır. Bu çalışmada artan deneysel maliyetlerin azaltılması doğrultusunda prototip ölçeklerde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı görüntü işlemeye dayalı tespit edilen unsurların güvenli bir şekilde yoldan uzaklaştırılmasını sağlamak için bir uyarım mekanizması tasarımının geliştirilmesidir. Bu bağlamda tasarlanan prototip araç üzerine yerleştirilen kamera ve sensör uygulamaları ile sağlıklı bir şekilde yol üzerinde ki engellerin tespit edilebileceği ve bu engellere karşı çözümleyici sonuçların analiz edilebileceği çalışmanın özgün değerini vurgulamaktadır. Çalışma kapsamında yol üzerinde engellerin algılanabilmesi adına kamera modülünden alınan görseller tanımlanmaktadır. Tanımlanan görseller engel olarak algılama menziline girdiği taktirde sesli uyarı sistemleri ve fiziki olarak su püskürtme sistemleri sırası ile devreye alınmaktadır. Ayrıca bu uyarı sistemleri ile araç hızları birbirine entegre bir şekilde modellenmektedir. Sonuç olarak aracın belirtilen uygulamalar dahilinde çarpışma kazalarında önleyici bir yöntemi ortaya koyabileceği düşünülmektedir.

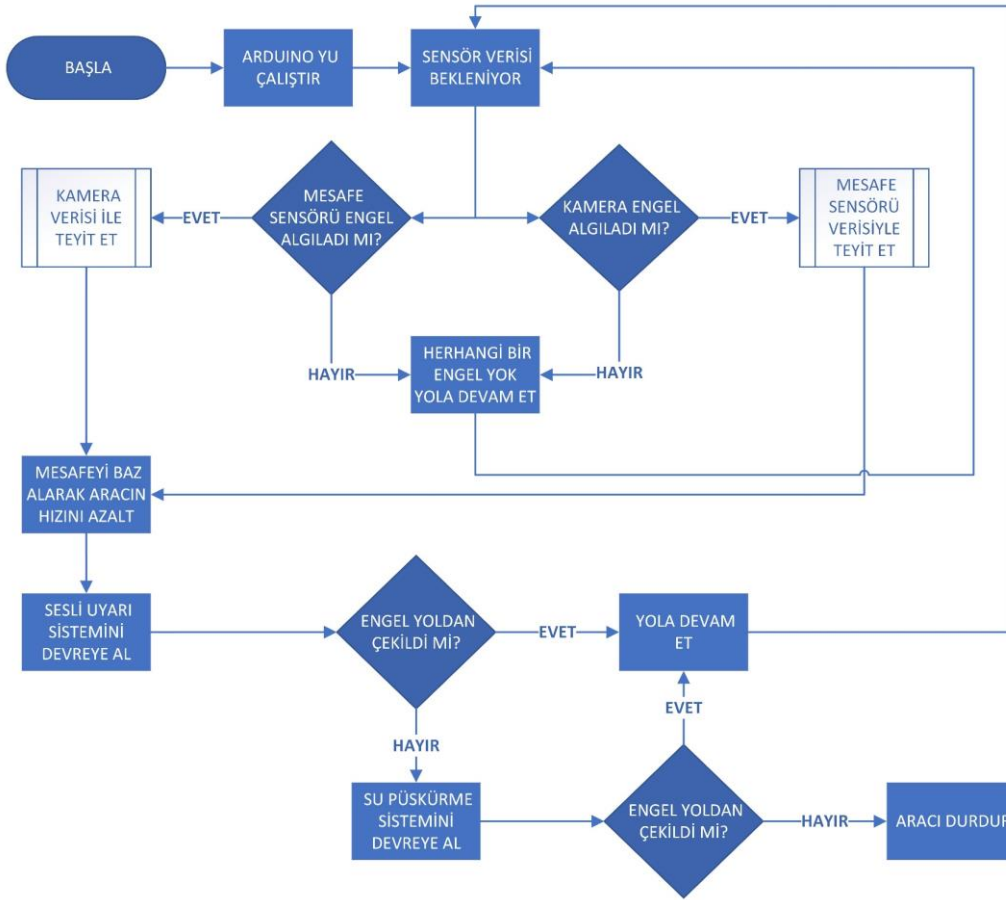
2. Metot

Çalışma da tasarlanan bir prototip araç üzerinden görüntü analizleri bir kamera modülü ile gerçekleştirilerek öncelikle yolda bulunan unsurların tanımlanması hedeflenmiştir. Tespit edilen engel oluşumlarının uyarımlarının sağlanabilmesi adına hız verilerinde kontrol sağlanarak gerekli uyarım sürelerinin kazanılması hedeflenmektedir. Yavaşlama süreci gerçekleşirken uyarım sistemi olarak sesli ve fiziksel olarak su püskürtme sistemi aracın şasesine yerleştirilmiştir. Şematik olarak çalışma kapsamında benimsenen analizlerin gerçekleştirilmesi Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışmanın şematik gösterimi

Şekil 1’de görüldüğü üzere öncelikle kamera modülü yol üzerinde bulunan engeli algılandığında engeli tanımlamaya çalışmaktadır. Bu süreçte araç hızında azalmalar meydana gelirken sesli olarak engeli uyarı gönderilmektedir. Devam eden süreçte hala engel yol üzerinde ise sesli uyarı ve araç hız düşümü devam etmektedir. Son olarak engeli 30 cm kalınlığında su püskürtme mekanizması devreye alınarak araç durdurulmaktadır. Engel yoldan çekildiği taktirde araç yola devam etmektedir. Aksi durumda uyarı sistemleri efektif olarak uyarıya devam etmekte ve araç harekete geçmemektedir.



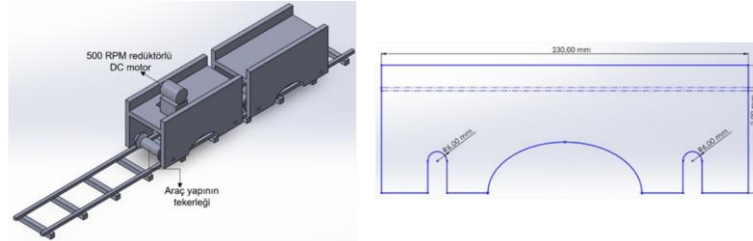
Şekil 2. Akış algoritması

Şekil 2’de çalışma kapsamında programlanan kamera ve sensör yapıların çalışma prensipleri gösterilmektedir. Önüne çıkan ehli ve yabani hayvanları kamera ve sensörler yardımıyla tespiti gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Kamera modülünü kullanarak hayvanların görüntüsünü bilgisayar ortamına aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar HC06 kodlu bluetooth modülü ile mikrodenetleyici ile haberleştirilmiştir. Mesafe sensörlerini kullanarak hem engele olan mesafenin ölçülmesi hem de engelin olup olmadığı bilgisi elde edilmiştir. Sağlanan verilere göre engel ile aracın arasındaki mesafe bilgisi kontrol edilmektedir. Sensörden alınan mesafe bilgisi oluşturulacak karar mekanizmasına aktarılmaktadır. Bu sayede mesafeye göre yavaşlama sistemi devreye sokulup aracın hız azaltımı gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. İlk aşamada Arduino Mega’ya bağlı olan sesli uyarı modülü devreye sokulup hayvanın ürkütülüp kaçması hedeflenmektedir. Eğer hayvan yoldan çekilmez ise ikinci aşama olan su püskürme ile fiziksel müdahale gerçekleştirilip hayvanın yoldan çekilmesi amaçlanmaktadır. Karar mekanizmasına hala yolda bir engel bilgisi geliyor ise aracın harekete devam etmemesi üzerine bir karar mekanizması oluşturulmuştur. Kullanılan denetleyiciler hem sensör verilerini değerlendirmeye hemde aracın hız ve uyarı sistemini yönetmeye eğitilerek belirtildiği gibi işlev görmektedir.

Çalışma da gerçekleştirilen görüntü analizlerinde bir kamera modülünü kullanarak tren yolu boyunca gerçek zamanlı görüntünün bilgisayara ortamına aktarımı gerçekleştirilmiştir. Aktarılan görüntü Python ile Open CV’de (Açık Kaynaklı bilgisayar görüşü) Mobile Net-SSD dedektör kullanarak ve önceden eğitilmiş hayvan kitaplığından (Microsoft Coco) yararlanılarak hayvanların algılanması gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin tercih edilme sebebi yüksek doğrulukta çalışma imkânı sağlayabilmesidir [18]. Open CV gerçek zamanlı bilgisayar görüşü üzerine odaklanmış bir programlama fonksiyonları kütüphanesidir [19]. Genel olarak, nesne tespit bir görüntüdeki bir nesneyi konumlandırmak için nesne lokalizasyonu ve bulunan nesneyi uygun

katgoride sınıflandıran nesne sınıflandırması olmak üzere iki adımdan oluşur. SSD (Single Shot Detector (Tek Atış Dedektörü)), tek kısa devrede iki adımın üzerinde performans gösteren gerçek zamanlı nesne algılama algoritmasıdır. Mobile Net, görüntü sınıflandırması için kullanılan bir başka algoritmadır. Görüntü gerçek zamanlı video olarak sisteme alındıktan sonra belirli karelere bölünür ve değerlendirilerek çıktı olarak tanımlanabilmektedir.

Çalışma kapsamında prototip olarak tasarlanan araç değerlendirildiği takdirde bir adet araç hareketini sağlayacak lokomotif ve sensörlerin konumlandırılacağı bir adet vagon yapının birleştirilmesi ile meydana getirilmiştir.



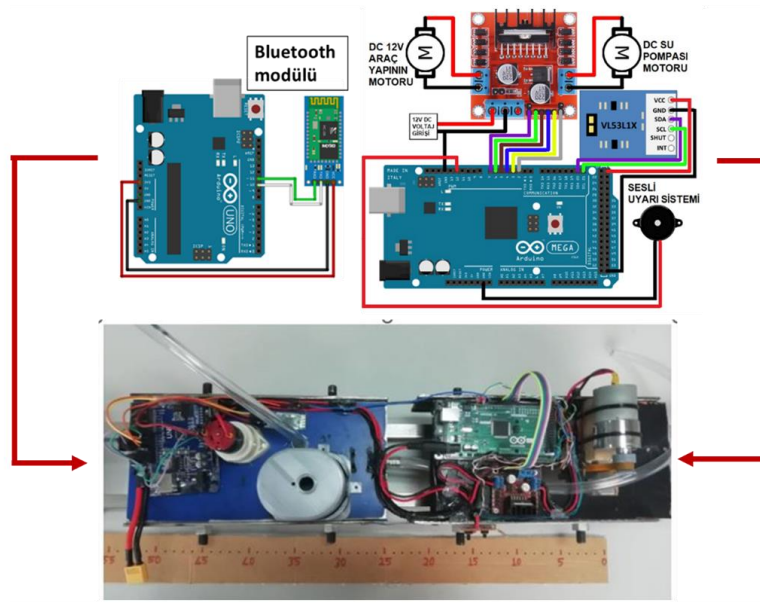
Şekil 3. Araç yapının 3B tasarımı ve dış şase ölçüleri

Araçın 3B tasarımı ve motor yapının konumlandırılması Şekil 3’de gösterildiği gibidir. Araç hareketleri 9-12 V 500 rpm DC motor ile sağlanmaktadır. Araç ölçülerine bakıldığında her bir vagonun 230 mm uzunluğa ve 80 mm genişliğinde 4 adet plakadan imal edilmektedir. Daha sonrasında bu plakalara 0.1 mm kalınlığında kanal açılarak şase gövdesi kanallar arasına yerleştirilmektedir. L298N motor sürücü ile Arduino Mega denetleyicisi kullanılarak aracın hız verileri kontrol edilmektedir.



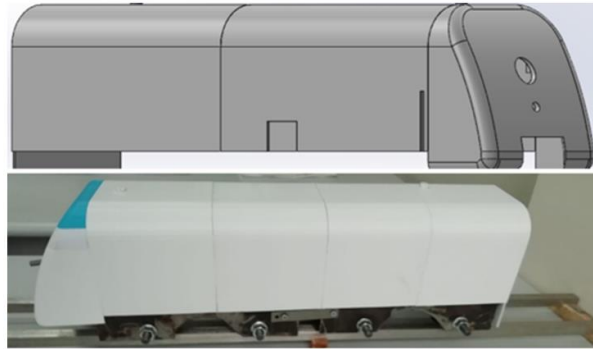
Şekil 4. Araçın güç aktarımı için tasarlanan dişli mekanizması

DC motordan elde edilen torkun aracın hareketinde kayıplar oluşturulmaması için Şekil 4’de görüldüğü üzere bir dişli yapı 3B yazıcı kullanılarak tasarlanmıştır. Burada kayış kasnak mekanizması ile hareket motordan tekerlere aktarılmaktadır. Dişli kullanımları kayıpları büyük oranda azaltmıştır. Kasnak yapı GT2 kayış standartlarına uygun diş yapısı ile tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Tasarlanan araç yapıda elektronik bileşenlerin bağlantıları ve araç üzerindeki yerleşimleri

Görüntü işleme süreçlerinde kamera modulünden elde edilen görseller bilgisayarda elde edildikten sonra Arduino Mega üzerinden bluetooth modülü ile mesafe sensörünün zamanlama hatalarını önlemek için bluetooth modülü başka bir mikrodenetleyiciye bağlanarak işlemler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede bilgisayar üzerinden elde edilen görüntü işleme sonuçları zaman kaybı ve kablolu bağlantı zorunluluğu olmaksızın sisteme entegre edilebilmiştir. Görsel analizler ile hız parametrelerinin kontrol edildiği iki ayrı mikrodenetleyici arasında seri haberleşme protokolü kullanılarak aracın kontrolü sağlanmaktadır (bkz. Şekil 5). Arduino mega mikro denetleyicisi görüldüğü gibi lokomotif unsurun bulunduğu bölüme konumlandırılmıştır. Su tankı, su pompası, lipo batarya ve Arduino Uno kartları ise vagon tasarımı olarak üretilen kısma konumlandırılmıştır.



Şekil 6. Araç kabuk tasarımı

Şekil 6'da tasarlanan ve araç üzerine montajı gerçekleştirilen kabuk tasarımı 3B yazıcı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan yapının başlıca amacı araç üzerinde ki komponentlerin dış ortam koşullarından etkilenmemesini sağlamak ve görsel olarak kirliliğe sebep veren görüntünün ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Tüm bileşenleri ile araç bu hali ile 4.2 kg değerinde bir ağırlığa sahiptir. 20 cm/s hızlara kadar çıkabilmektedir.



Şekil 7. Aracın hareket ettiği hattın kesiti

Şekil 7’de görüldüğü üzere aracın hareket ettiği yol unsur için 6 adet 1 m uzunluklarında 15x15 mm en kesit ölçülerine sahip çelik paslanmaz çubuklar kullanılmıştır. Ray malzemesinin zeminde kaçıklıklar oluşturmaması için 20x20 mm en kesite sahip 120 mm uzunluğunda ki ağaç traversler kullanılmıştır. Bu traversler üzerine açılan kanallara sıkı geçme ile yerleştirilen çelik paslanmaz çubuklar harekette meydana gelebilecek sapmalar önlenmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen üretim işlemlerinin ardından deneysel olarak çalışmalar gerçekleştirmek için bazı ehli hayvan görsellerinin çıktıları hazırlanmıştır. Deneysel olarak çalışmalar gerçekleştirilerek sonuçlar bölümünde analizler gerçekleştirilmektedir.

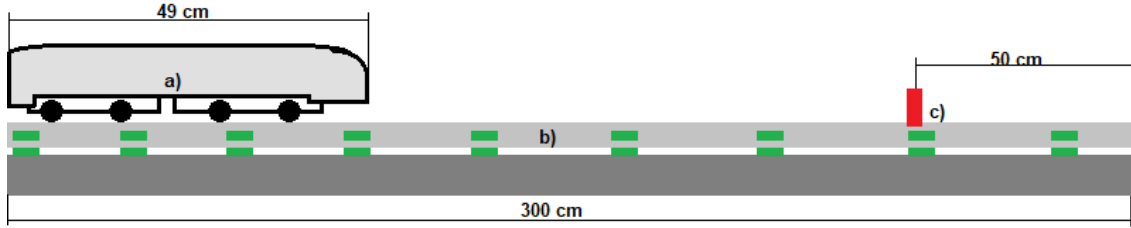
3. Bulgular

Görüntü analizlerinde eğitilmiş veri setinde bulunan 6 adet hayvan (köpek, kedi, at, inek, koyun ve ayı) görseli karton levhalar üzerine basılarak görüntü işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen görüntü analizlerinde kameranın etkin bir şekilde gördüğü engellerin türünü %80’in üzerinde bir başarı oranında tespit edebildiği gözlenmiştir (bkz. Şekil 8). Buradan hareketle tanımlanan engel türünde çeşitlilik arttırılabileceği ve zaman parametresinde tanımlama özelliklerinin daha kısa sürelerde gerçekleştirilebileceği de saptanmıştır. Genel olarak görüntü işleme algoritması başarılı bir şekilde çalışmaktadır. Bununla birlikte gelecek çalışmalarda algılanan görsellere karşı tren hızlarında artışların meydana getirilmesine bağlı olarak tepki sürelerinin kısaltılması üzerine odak sağlanabilir. Karayolu güvenliği üzerine sürdürülen bir çalışmada araç-hayvan çarpışmalarının önlenmesi için benzer bir yaklaşım ile görüntü analizlerinin tanımlanarak kullanıcı uyarım sistemlerinin geliştirilebileceğine değinilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen verilere göre yol üzerinde bulunan unsurların %82,5 gibi efektif bir değerde tespit edilebileceği öngörülmüştür. Öte yandan çalışmalar kapsamında zaman parametrelerinin iyileştirilerek uyarım mekanizmasının araç hızları ile uyumlu çalışması gerekliliği de bildirilmektedir [20]. Benzer sonuçların elde edilebilmesinin yanı sıra yarı otonom olarak sürücü uyarımlı sisteme göre tamamen otonom çalışma prensibine sahip raylı ulaşım araçlarının geliştirilmesine sağladığı bakış açısı ile çalışma özgün bir nitelik taşımaktadır.



Şekil 8. Hayvan figürlerinin görüntü işleme ile tanınması

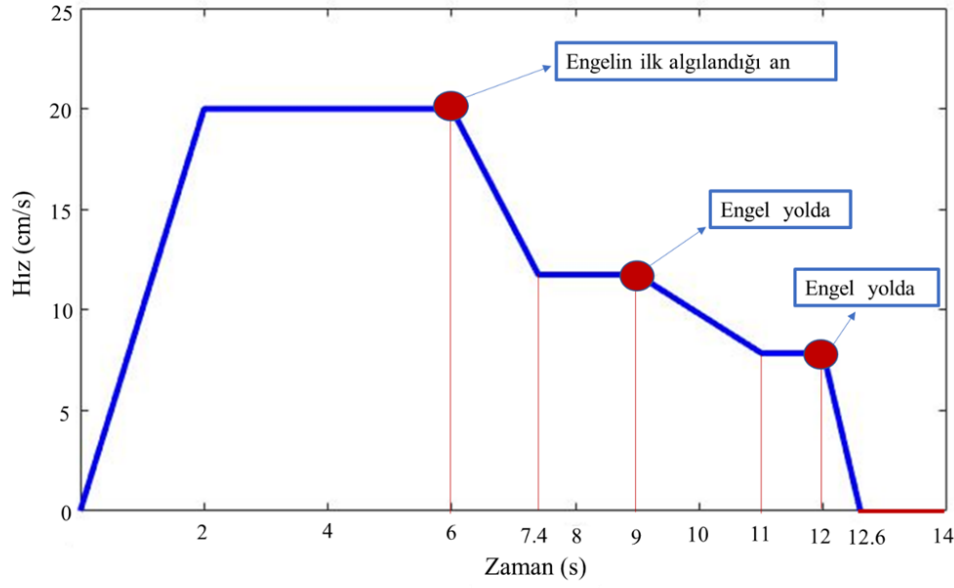
Görüntü işleme proseslerinde elde edilen başarılı tanımlama süreçlerinin ardından aracın engele karşı verdiği tepkiler anlık takip edilerek önerilen yöntemin işlevselliği ortaya konmuştur. Burada araç beklendiği gibi engeli gördüğü andan itibaren görüntüyü tanımlama sürecinden görüntünün kaldırıldığı sürece kadar doğrusal olarak hız azaltımı gerçekleştirmiştir.



Şekil 9. Araç hareketinin şematik gösterimi a) Araç yapısı b) Yol c) Engel

Şekil 9’da belirtildiği üzere aracın boyu 49 cm değerindedir. Yolun tüm uzunluğu 300 cm ve kırmızı olarak belirlenen engel ile yolun son kısmı arasında ki mesafede 50 cm değerindedir. Bu durumda araç harekete geçmeden önce engel ile araç arasında 201 cm değerinde mesafe bulunmaktadır. Bununla birlikte araç ilk 100 cm boyunca hızlanan ve sabit hızlı hareket gerçekleştirirken engeli algıladığı andan itibaren yavaşlama ivmeleri göstererek engele 30 cm mesafede durup uyarım işlemini sürdürmektedir.

Şekil 10’da görüldüğü gibi araç ilk 6 s içerisinde 20cm/s hıza çıkarak sabit hızlı hareket sergilemektedir. Engeli ilk algıladığı anda engele olan uzaklık 71 cm olarak belirlenmiştir. Bu süreçten itibaren araç 1,4 s boyunca hızını %43,75 azaltarak 11,75 cm/s hız ile yoluna devam ederken ilk uyarı sistemi devreye girmekte ve sesli uyarı engel yönünde oluşturulmaktadır. Araç 141 cm yol aldıktan sonra engel hala yolda olduğu için hızını %33,19 daha azaltarak 7,85 cm /s değerine indirmektedir.



Şekil 10. Aracın hız-zaman grafiği

Bu hız düşümü ile beraber ses şiddetinde de artışlar meydana getirilmektedir. 1 s boyunca araç sabit hız ile hareketine devam ettikten sonra 0.6 s içerisinde yavaşlayarak tamamen durmaktadır. Araç tüm hareketi boyunca 171 cm yol alarak engele 30 cm bir mesafede durarak grafikte görülen kırmızı bölge boyunca su püskürtme işlemini engele uygulamaktadır. Eğer engel hala yolda ise araç pozisyonunu koruyarak sesli ve mekanik uyarı işlevine devam etmekte engel çekildiğinde ise sabit hızlı olarak hareketini sürdürmektedir.

4. Sonuç

Görüntü işleme ve algılanan görüntünün tanımlanarak hız parametrelerinin buna entegre bir şekilde kontrol edilebilmesi çalışmanın başarılı sonuçları içerisinde yer almaktadır. Öte yandan görüntü analizlerinde ortalama olarak %83,59 değerinde tespit sağlanabileceği görülmüştür. Bununla birlikte tren hızlarında kontrollü yavaşlamanın öncelikle yarı yarıya daha sonra belirgin bir yavaşlama ile uyarım sistemine tam entegrasyonu söz konusudur. Yüksek verimlilikle önerilen sistemin gerçek ortam koşullarında da sesli ve mekanik uyarı sistemlerinin hız verileri ile bütünleşik bir formda işlev görebileceği düşünülmektedir.

Raylı ulaşımların yol perspektifleri değerlendirildiğinde dağlık bölgelerde, kırsal alanlarda ve tarımsal arazilere sınır olarak yoğunluğun belirgin bir şekilde dağılım sergilediği bilinmektedir. Bu noktada sürekli otonom olarak önerilen sistemin başarılı olması yol üzerinde tam zamanlı güvenlik önlemlerinin alınabilmesine imkân tanıyabilir. Özellikle ehli ve yabani hayvanların telef olmalarının önlenilmesinin yanı sıra çarpışma sonucu meydana gelebilecek maddi kayıpların azaltılmasına da katkı sağlayabilir.

Ek olarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek kaza senaryolarının incelenmesi, otomatik kontrollü uyarı mekanizmaları geliştirilerek çarpışma kazalarına yönelik önlemlerin alınması önemli araştırma konuları arasındadır. Ancak gerçek ortamlarda deneysel çalışmaların yüksek maliyetler ve uygulanan deney sayılarının az olması gibi problemleri meydana getirmektedir. Bundan dolayı bu çalışma kapsamında prototip ölçeklerde otomatik uyarım sistemlerinin geliştirilmesi çarpışma kazalarının önlenmesine farklı bir bakış açısı kazandırmaktadır. Öte yandan küçük ölçeklerde prototip deney seti sayesinde çoklu deneylerin gerçekleştirilmesine imkân tanınmaktadır. Gelecekte raylı ulaşımlar için tasarlanan iyileştirme ve geliştirme

çalışmalarında simülatif sonuçların ya da çeşitli ortam koşullarının prototip ölçeklerde değerlendirilerek bir araştırma alanı oluşturulabileceği düşünülmektedir. Özellikle son dönemde ülkemizde ve dünyada kullanımı yaygınlaşan yüksek hızlı trenler için oldukça önemli bir kullanım alanına sahip olacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte gelecek çalışmalar içerisinde araç hızlarına bağlı olarak elde edilen görüntü analizlerine uyumlu uyarım sistemlerinin oluşturulmasında frenleme mekanizmalarının sisteme dahil edilmesi, frenleme sonucunda meydana gelen sürtünme etkilerinin araştırılması, raylı sistemin alt sistemlerinde yer alan boji vb. kısımlarda meydana gelebilecek atalet kuvvetlerinin değerlendirilmesi gibi konular üzerine odak sağlanması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Tübitak-2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri kapsamında 1919B012204725 başvuru numarasına sahip, “ Görüntü İşleme ve Su Püskürtme Teknolojileri ile Raylı Ulaştırmada Hayvan Kazalarının Önlenmesi” isimli projenin destekleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Kaynakça

- [1] J. Yin, T. Tang, L. Yang, J. Xun, Y. Huang, Z. Gao, “Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 85, pp. 548-572, 2017, doi: 10.1016/j.trc.2017.09.009
- [2] C. Atılgan, Ö. T. Kaymakçı and T. V. Mumcu, "Haberleşme Tabanlı Tren Kontrolünün (CBTC) Otomatik Tren Korumasına (ATP) İlişkin Dağıtılmış-Hiyerarşik Kontrol Yaklaşımı", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 66-81, Jan. 2023, doi:10.47072/demiryolu.1191856
- [3] A. Çelik , "Demiryolu Ray ve Kusurlarını Tespit Etmek İçin Geliştirilen İki Yeni Yöntem", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 12, pp. 52-63, Jul. 2020, doi:10.47072/demiryolu.737624
- [4] R. Tang et al, "A literature review of Artificial Intelligence applications in railway systems." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.140;103679, 2022, doi: 10.1016/j.trc.2022.103679
- [5] Eurostat, “Rail accident fatalities in the EU,” 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Archive:Rail_accident_fatalities_in_the_EU&oldid=497205 [Accessed on 15 January 2021]
- [6] D. Ristić-Durrant, M. Franke, K. Michels, “A review of vision-based on-board obstacle detection and distance estimation in railways,” *Sensor*, vol 21, 2021, doi: 10.3390/s21103452
- [7] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. “Kaza İnceleme Raporları”. [Online]. Available: <https://ulasimemniyeti.uab.gov.tr/demiryolu> [Accessed on 18 May 2022]
- [8] Z. Wang, “Application research of rail transit safety protection based on laser detection,” *Proceedings of the SPIE*, vol. 10153, pp. 91-98, 2016, doi: 10.1117/12.2244605
- [9] S. Küçük , "Demiryollarında Arıza Durumunda Otonom Trenler için Yedek Sistem Tasarlanması", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 9, pp. 38-60, Jan. 2019
- [10] S. Yıldırım, "Yüksek Hızlı Tren Hatlarında Sinyalizasyon Blok mesafelerinin Hesaplanması", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 14-25, Jul. 2021, doi:10.47072/demiryolu.869933
- [11] H. Sümbül, A. Bogrek and A. Tunçer, "Demiryolu Ulaşım Güvenliği için Makinist Uyarım Sistemi Kavramsal Tasarımı ve Simülasyonu", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 1-13, Jul. 2021, doi:10.47072/demiryolu.832113
- [12] S. Yavuz, “Demiryolu Kazalarında Sistem ve İnsan Etkeni,” *Demiryolu Mühendisliği*, 2018, (7), 54-55.
- [13] T. Ye, B. Wang, P. Song, J. Li, “Automatic railway traffic object detection system using feature fusion refine neural network under shunting mode,” *Sensors*, vol. 18, 2018, doi: 10.3390/s18061916
- [14] A. Chernov, M. Butakova, A. Guda, P. Shevchuk, “Development of intelligent obstacle detection system on railway tracks for yard locomotives using CNN,” *Dependable Computing - EDCC 2020 Workshops*, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-58462-7_3

- [15] P. Hyde, C. Ulianov, J. Liu, M. Banic, M. Simonovic, D. Ristic-Durrant, "Use cases for obstacle detection and track intrusion detection systems in the context of new generation of railway traffic management systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 236, pp. 095440972110410, 2021, doi: 10.1177/09544097211041020
- [16] S. Mockel, F. Scherer, P.F. Schuster, "Multi-sensor obstacle detection on railway tracks," Intelligent Vehicles Symposium, 2003. *Proceedings. IEEE*, pp. 42-46, 2003, doi: 10.1109/IVS.2003.1212880
- [17] T. K. Rajan et al, "IoT Based Remote Surveillance For Animal Tracking Near Railway Tracks," In 2023 International Conference on Networking and Communications (ICNWC), April 2023, (pp. 1-7). IEEE.
- [18] IG Fernandez ve C. Wada, "Shoe detection using SSD-MobileNet architecture," 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) , Kyoto, Japonya, 2020, s. 171-172, doi: 10.1109/LifeTech48969.2020.1570618965
- [19] G. Bradski and, A. Kaehler, "Learning OpenCV", OReilly Publications, 2008.
- [20] S. U. Sharma and D. J. Shah, "A Practical Animal Detection and Collision Avoidance System Using Computer Vision Technique," in IEEE Access, vol. 5, pp. 347-358, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2642981.

Özgeçmiş



Mustafa Kaan BALTACIOĞLU

1984 yılında doğmuştur. Lisans eğitimini Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, Yüksek Lisans Eğitimini Mustafa Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında ve Doktora eğitimini Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında tamamlamıştır. Halen İskenderun Teknik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde Doçent olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: mkaan.baltacioglu@iste.edu.tr



Mustafa Tunahan BAŞAR

1994 yılında doğmuştur. Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini İskenderun Teknik Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Doktora eğitimine İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde devam etmektedir. Halen Amasya Üniversitesi Taşova Yüksel Akın Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: tunahan.basar@amasya.edu.tr



Muharrem KARAASLAN

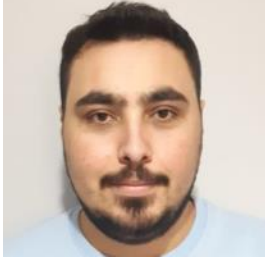
1975 yılında doğmuştur. Lisans eğitimini Gaziantep Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Eğitimini Mustafa Kemal Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği ve doktora eğitimini Çukurova Üniversitesi Fizik bölümünde tamamlamıştır. Halen İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliğinde Profesör olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: muharrem.karaaslan@iste.edu.tr

**Zafer ÖZER**

1970 yılında doğmuştur. Lisans eğitimini İTÜ Sakarya Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Eğitimini Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği ve doktora eğitimini Çukurova Üniversitesi Fizik bölümünde tamamlamıştır. Halen Mersin Üniversitesi Mersin Meslek Yüksekokulu'nda Doçent olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: zaferozer@mersin.edu.tr

**Sefa ÖCAL**

1999 tarihinde doğmuştur. Ön Lisans eğitimini Marmara Üniversitesinde tamamlamıştır. Lisans eğitimine İskenderun Teknik Üniversitesinde devam etmektedir. İlgi alanına giren araştırma konuları Gömülü sistem tasarımları, Görüntü işleme teknolojisi, Yapay zekâ alanlarıdır.

E-Posta: sefaocal.mdBf20@iste.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mustafa Kaan BALTACIOĞLU: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım.

Sefa ÖCAL: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Mustafa Tunahan BAŞAR:

Görselleştirme, İnceleme. Muharrem KARAASLAN: Kontrol. Zafer ÖZER: Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Türkiye’de Dizelli Tren İşletmeciliğinde Enerji Verimliliği ve Emisyonların Araştırılması

Mehmet Emin AKAY*¹, Veli ÇELİK²

¹KBÜ Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Programı, Karabük, Türkiye
²Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Ankara, Türkiye

*eminakay@karabuk.edu.tr

(Alınış/Received: 04.07.2023, Kabul/Accepted: 22.07.2023, Yayınlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Bu çalışmada Türkiye’de dizelli lokomotiflerle yapılan yük ve yolcu taşımacılığı kaynaklı enerji verimliliği ve yıllık emisyon miktarları hesaplanmıştır. Verimlilikte ana kriter hamton.km olarak alınmış, 2013-2017 yıllarını kapsayan 5 yıllık dönem için 1 hamton.km seyir için harcanan yakıt ve 1 litre yakıt ile gidilen hamton.km değerleri hesaplanmıştır. Dönem sonuna göre, 1 hamton.km seyir için harcanan yakıt miktarının azaldığı ve 1 litre yakıt ile gidilen hamton.km değerinin arttığı görülmüştür. HC, CO, NO_x ve PM₁₀ kirleticilerinden oluşan emisyon toplamının 2014 yılında zirve yaptığı, sonraki yıllarda azaldığı gözlenmiştir. CO ve NO_x emisyonları en yüksek miktar olmuştur. Çözümler olarak; elektrikli loko kullanımının artırılması, maden cevheri vb. ağır tonajlı taşıma yapılan işletme bölgelerinde taşımaların E lokolarla yapılması, enerji giderinin ve emisyonların azaltılmasında TSİ sisteminin yaygınlaşması ile, yoğun yük taşımacılığı yapılan bölgelerde çift hat yapımına öncelik verilmesi önerileri yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu taşımacılığı, Dizelli taşıtlar, Enerji verimliliği, Emisyonlar, Türkiye

Energy Efficiency in Diesel Train Management and Modeling of Emissions in Türkiye

Abstract: Energy efficiency and annual emissions from freight and passenger transportation with diesel locomotives in Turkey have been calculated. The main criterion in efficiency was taken as gross.ton.km, and the fuel spent for 1 gross.ton.km cruising and the gross.ton.km traveled with 1 liter of fuel were calculated for the 5-year period covering the years 2013-2017. Compared to the end of the period, it was observed that the amount of fuel consumed for 1 gross.ton.km cruising decreased and the value of gross.ton.km traveled with 1 liter of fuel increased. It was observed that the total emissions of HC, CO, NO_x and PM₁₀ pollutants peaked in 2014 and decreased in the following years. CO and NO_x emissions were the highest. The highest amount of pollutants belongs to CO and NO_x emissions. As solutions; increasing the use of electric loco, especially for ore transport and heavy hauls. Suggestions were made to give priority to the construction of double lines in regions with heavy cargo transportation, with the widespread use of the CTC system to reduce energy costs and emissions, and to carry out the transportation in the operating regions where heavy tonnage transportation is carried out.

Keywords: Rail transport, Diesel vehicles, Energy efficiency, Emissions, Türkiye

1. Giriş

Dünyada demiryoluyla yolcu ve yük taşımacılığı düşük enerji tüketimi, yüksek seyir güvenliği, çevre dostu elektrikli tren işletmesi gibi nedenlerde büyük öneme sahiptir. 1950’li yıllardan beri ihmal edilen demiryolu taşımacılığı 2003 yılından itibaren yeniden devlet politikası olmuş ve yatırımlar başlatılarak; şebeke iyileştirme, çeken-çekilen araç yenilemelerle reformlar da uygulamaya konulmuştur. Bu reformların başında 6461 sayılı Demiryolu Taşımacılığının Serbestleşmesi Kanunu” gelmekte olup, bununla sektörde liberalleşme yapılmıştır. Türkiye AB üyeliğine aday olmasıyla, AB’nin kurumsal müktesebatına (acquis communautaire) uyum

Atıf için/Cite as: M.E. Akay, V. Çelik, “Türkiye’de dizelli tren işletmeciliğinde enerji verimliliği ve emisyonların araştırılması,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 162-170, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1322615

amacıyla, demiryolu taşımacılığının hukuki durumu ve işletme yapısı yeniden tanımlanmıştır. Kanuna göre, demiryolu hizmetleri tekeli kaldırılmakta, TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü “altyapı operatörü” olarak tanımlanmaktadır. Kurumun bünyesinden; yolcu, yük ve cer daireleri ayrılarak, yeni kurulan TCDD Taşımacılık AŞ’yi (TCDDT) oluşturmuştur. Kurum demiryolu tren işletmecisi (DTİ) olarak tanımlanmaktadır. Kanun demiryolu sektöründe ruhsat alan özel sektöre de tren işletme hakkı tanımaktadır. Ayrıca KHK ile Ulaştırma Hizmetleri Düzenleme Genel Müdürlüğü (UHDGM) kurulmuştur ve bu kurum sektörde düzenleyici ve denetleyici görev yaparak, kurumlara sektördeki çeşitli faaliyetler için, tren işletme lisansı verecektir [1].

Demiryolu emisyonlarının modellenmesinde daha önce aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır:

Dincer and Elbir, çalışmalarında Türkiye’de 2000-2005 dönemi demiryolu taşımacılığı kaynaklı emisyonları hesaplamışlardır. Çalışmanın ana girdisi DE lokomotiflerin ve DMU araçlarının lokomotif kilometre ve çalışma saatleridir. 6 yıllık dönemi kapsayan çalışmada, azot oksitler, hidrokarbonlar, karbon monoksit, partikül madde, kükürt dioksit ve karbon dioksit kirletici miktarları hesaplanmıştır. Sonuçlar gram/yolcu.km ve gram/ton.km cinsinden, HC, CO, PM₁₀, CO₂, SO₂ ve NO_x gibi 6 tür kirletici açısından bulunarak, farklı ülkelerle karşılaştırılmıştır [2].

Biliaiev et al. çalışmalarında, demiryolu istasyon aktivitelerinde oluşan egzoz kirleticilerinin, 3 boyutlu dağılımın matematik modeliyle dağılımının bulunarak, atmosferik kirlenmesini modellemiştir. Girdi olarak; rüzgâr yönü ve 10 m yüksekte rüzgâr hızı, lokomotif seyir hızı ve ortam ozonu konsantrasyonu kullanılmış, Euler metoduyla kirleticilerin NO, NO₂ formlarına dönüşümü ile, istasyon bölgesini çevreleyen yerleşim alanlarındaki etkisi bulunmuştur [3].

Cansız ve Ünsalan, makalelerinde, yapay sinir ağları (YSA) yardımıyla demiryolu taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonu tahmin modelleri oluşturmuşlardır. Çalışmada Türkiye’de demiryolu ulaşım modu kullanımının yıllara göre değişimi incelenmekte ve demiryolu taşımacılığı için yapay sinir ağları metoduyla, tahmin modelleri oluşturulmaktadır. Tahmin modellerinde, demiryolu hattı uzunluğu, yolcu sayısı ve yük miktarı, tren-kilometre, yolcu-kilometre ve ton-kilometre verileri girdi olarak; 2, 3, 4, 5 ve 6’lı kombinasyonlarla kullanılmıştır. Tahmin modellerinin hem performansın artırılması hem de kullanılan altı değişkenin etkisinin de modele girdirilmesi amacıyla temel bileşen analizi (TBA) ile yeni girdiler oluşturulmaktadır. Modellerin performans değerlendirildiğinde, en iyi tahmin modeli 2 değişkenli NPFA çıkmaktadır. Modelin hataların karesinin ortalaması (HKO) $6,48 \times 10^{-5}$, ortalama yüzde hata (OYH) %0,125 ve korelasyon katsayısı (R) %99,65’tir. Sonuçta TBA’nın modeller üzerine kayda değer etkileri görülmüştür [4].

Heinold makelesinde emisyon modellemesinde 4 farklı yöntemin bir değerlendirmesini yapmıştır. Bu modeller; Meet, Artemis, EcoTransit World ve Mesoscopic model olarak adlandırılmaktadır. Meet modeli bir trenin enerji tüketimini iki nokta arasındaki mesafeye ve trenin ortalama hızının bir fonksiyonu olarak kabul ederken, Artemis modeli ise, seyir yapılan mesafedeki trenin seyir direncinin entegrasyonu ile katarın enerji tüketimini hesaplamaktadır. Mesoscopic model, Artemis modeli gibi mikroskobik modellerden elde edilen fiziksel ilkeleri, Makroskopik modellerden elde edilen ampirik verilerle birleştirip, sonuçlandırmaktadır [5].

Kim et al, Kore’de DE lokomotiflerin anahat seyir şartlarında CO₂, N₂O ve CH₄ kaynaklı emisyonlar Tier 3 bağlamında hesaplanmıştır. CO₂ emisyonu relantide 282 g/kWh ve tam gazda 701 g/kWh olduğu bulunurken, CH₄ için relantide 0,0394 g/kWh ve tam gazda 0,0103 g/kWh ve N₂O relantide 0,0181 g/kWh ve tam gazda 0,0107 g/kWh olmuştur [6].

Bıyık ve Civelekoğlu, makalelerinde, Emisyon hesaplamalarında IPCC’nin Tier 1 ve Tier 2 hesaplama metodolojisi ile Isparta iline kayıtlı motorlu araçlarının 2010-2016 yılları arasındaki

karbon ayak izini hesaplamışlardır. Modelleme sonucunda, Tier 1 yöntemiyle hesaplamada 2010-2016 yılları arasında %34'lük bir artış gösterdiği, Tier 2 yöntemi ile hesaplanan karbon ayak izi hesabında ise, aynı dönemde %43'lük bir artış gözlenmiştir [7].

Annadanam and Kota, çalışmalarında demiryolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonların envanteri için, yukarıdan-aşağıya ve aşağıdan-yukarıya tespit yöntemlerinin verimliliğini karşılaştırmışlardır. Sektördeki yakıt tüketimi istatistikleri kullanılarak yukarıdan-aşağıya yöntemle hesaplanan emisyon envanterlerinde; taşıt yaşı, gücü ve loko tipi gibi farklı, yaş, güç ve lokomotif tipi gibi farklı parametreler, sonuçta büyük belirsizlikler içerdiği görülmüştür. Bunu yerine, aşağıdan-yukarıya bir yaklaşım yöntemi denenmiştir. Sonuçta yukarıdan-aşağıya yönteminin diğerine göre NOx emisyonlarının, yolcu trenlerinde %246 azaldığını, yük trenlerinde de %36 arttığı bulunmuştur [8].

Jiang et al, "Mobil kaynakların emisyon envanterlerine yönelik son gelişmeler ve perspektifler: Derleme yaklaşımları, veri toplama yöntemleri ve vaka çalışmaları" başlıklı makalelerinde, yukarıdan-aşağıya ve aşağıdan-yukarıya yöntemleriyle emisyon envanteri hesaplama metodlarını karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Karayolu motorlu taşıtlar için geliştirilmiş bir trafik akış modeli ve hıza bağlı emisyon faktörleri ile aşağıdan-yukarıya yöntemi yüksek çözünürlüklü bir emisyon envanteri geliştirmektedir. Yol dışı mobil kaynaklar ve demiryollarında ise, yakıt tüketimine veya güce dayalı yukarıdan-aşağıya bir yaklaşım benimsenmenin daha doğru sonuç verdiği görülmüştür. Daha sonra da emisyon azaltma potansiyeli, maliyet-fayda modeli yaklaşımları değerlendirilmiştir [9].

E. Lindgreen, S. C. Sorenson hazırladıkları raporda, "Demiryolu taşımacılığında Artemis emisyon modelleme metoduyla enerji tüketimi ve emisyonlarının hesaplanma metodlarını" açıklamışlardır. Metod trenlerini hareket şartlarına etkileyen; yuvarlanma, aerodinamik, yerçekimi ve hızlanma dirençlerini hesaplamak amacıyla, çalışma koşulları, hızlar ve ivmeler matrisi kullanılmaktadır. Emisyonlar, ortalama yakıt bazlı emisyon faktörleri ve elektrik üretimi emisyon faktörleri kullanılarak enerji tüketiminden hesaplanmaktadır. Sonuçlar, modelleme yaklaşımından elde edilen enerji tüketiminin, bilinen çalışma yöntemlerine göre %10'dan daha iyi sonuç verdiğini olduğunu göstermektedir [10].

2. Türkiye'de Demiryolu Taşımacılığı

2.1. TCDD Şebekesi

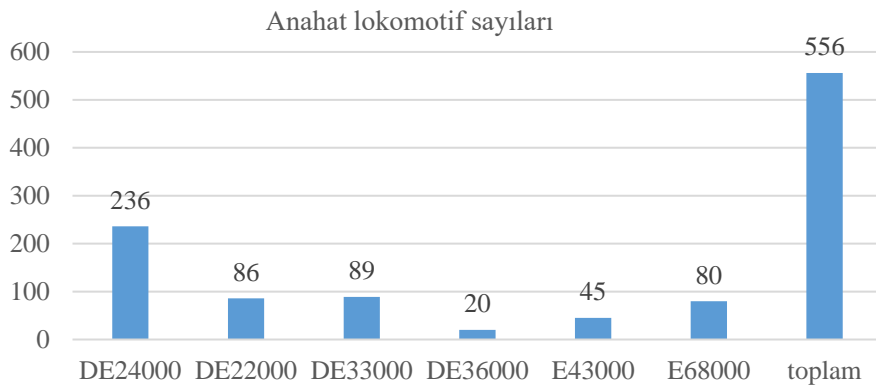
2023 yılı başında konvansiyonel TCDD şebekesi uzunluğu 11.668 km olup, Ankara-Sivas hattının da 26 Nisan 2023'te hizmete girmesiyle, uzunluğu 1.646 km'ye çıkan YHT şebekesi vardır. Konvansiyonel şebekenin 219 km'si hızlı hat olup, şebeke %87,6 oranında (11.500 km) tek hatlı, %55,1 oranında sinyalli (7.235 km) ve %47,6 (6.244 km) oranında da elektrikli [11]. TCDD şebekesinde, 14,543 km uzunluğunda 24 viyadük, 180 km uzunluğunda 764 tünel, 24.710 köprü vardır. Mevcut 2909 hemzemin geçidin 2.090 adedi kontrollüdür. Demiryollarının gelişimi için 2003-2017 döneminde hükümetlerin ayırdığı mali kaynak 71 milyar TL olmuştur [11].

TCDD'nin en önemli darboğazı, şebekenin "geometrik standardının düşüklüğü" olup, tek hatlı işletmecilik, dar kurlar ve yüksek eğim şeklinde tren işletimine yansıyan bu durumda, katarlar buluşmak ve öne geçmek için birbirlerini istasyonda beklemek zorunda kalmaktadır. Plansız gecikmelerin de doğmasıyla, hat üzerinde çalışan tüm tren seferleri aksamakta, trenlerin seyir sürelerinin de uzamasıyla, yaygın olan dizelli tren işletmesinin de etkisiyle aşırı yakıt tüketimi ve egzoz gazı emisyonu doğmaktadır [12].

2.2. Çeken taşıtlar envanteri

2017 yılında tüzel kişilik kazanan TCDD Taşımacılık AŞ'nin lokomotif envanterinin incelenmesiyle, emisyon modellemesi hakkında bir ön bilgi verilebilir. Bu amaçla kurumun 2023 yılı başında anahat lokomotif mevcudu türlerine göre Şekil 1'de gösterilmiştir.

Toplamı 431 olan DE lokoların, kurum envanterindeki oranı %77,5 iken, 125 adetli E lokoların oranı da %22,5 dur. TCDD şebekesindeki 2023 yılı elektrikli hat oranı %47,6 (6.244 km) iken, E lokomotif mevcudunun %22,5 gibi düşük oranda kalması, elektrikli hatlarda daha dizelli işletmeciliğe sebep olmakta, bu nedenle de daha düşük işletme verimli dizel yakıtı harcanmakta ve egzoz emisyonları da kaçınılmaz olarak artmaktadır. Şekil 1'den görüleceği gibi, kurumdaki mevcut 456 adet anahat lokomotifinin 322 adedi (DE24000 ve DE22000), yani %70,6'sı verimli taşıt ömrü olan 30 yaşın üzerindedir. Özellikle DE24000 lokomotifleri, yüksek işletme ve enerji gideri ile sıklıkla arıza yapmakta ve yüksek emisyonlar doğurmaktadır.



Şekil 1. TCDDT'nin anahat lokomotif mevcudu [11]

2.3. Enerji tüketimi ve emisyonlar

Cer araçlarının; anahat seyri, ranfor, tek loko seyri ve manevra gibi farklı çalışma şartları vardır. Dizelli raylı taşıtların çalışma şartları, rölanti ve seyir olarak iki gruptan oluşur. DE loko motoru istasyonlarda yolcu alırken ve buluşma halinde, rölanti şartlarında çalışırken, seyir şartlarında, hattın durumuna göre farklı gaz kademelerinde dizel motorunun ve ona aküple alternatörün cer motoru için ürettiği cer akımı çalışır. [13].

Dizel motorlu taşıtlarında yanma sonucunda, tam yanma ürünü CO₂ ve NO_x oluşurken, eksik yanma sonucu CO, PM₁₀ ve HC da doğmaktadır [14]. NO_x'ler hem ozon öncülleri doğururken, diğer yandan da atmosferde nitrik asit oluştururlar. Yer seviyesinde ozon ve PM₁₀ solunması akciğer dokuları zarar vermekte ve kalp rahatsızlıklarını da arttırmaktadır [15]. Taşıma modları arasında, atmosfere atılan kirletici miktarlarına göre bir mukayese yapıldığında, İngiltere'de yapılan bir araştırmaya göre, bir yükün demiryoluyla 1 ton.km taşınmasıyla 30 gram CO₂ havaya atılırken, karayolunda bu rakam 120 gram CO₂ değerine çıkmaktadır [16]. Bu durum demiryolu taşımacılığının, karayoluna göre atmosferi daha az kirlettiğine bir örnektir. Dizelli taşıtlarda 10 ppm kükürtlü Eurodizel5 kullanılması nedeniyle emisyonlarda SO₂ dikkate alınmamaktadır.

Raylı sistemde yolcu ve yük taşıma verimliliği ve enerji tüketimi hamton.km kriteriyle değerlendirilir. Bu değer 1 brüt ton ağırlığındaki trenin 1 km götürülmesiyle harcanan enerjiyi temsil eder. Enerji değeri dizelli taşıtlarda hamton.km/litre yakıt olarak hesaplanırken, elektrikli taşıtlarda ise hamton.km/kWh birimiyle ifade edilir. TCDDT'nin taşıma verileri Tablo 1'de dizelli taşıtlar için de, Tablo 2'de elektrikli taşıtlar için verilmiştir.

Tablo 1. Dizelli taşıtlarla yolcu ve yük taşıma verileri [18]

	Motorin (litre)	Yolcu taşıma hamton.km	Yük taşıma hamton.km	Toplam taşıma hamton.km	Enerji gideri litre/hamton.km
2013	142.018	3.109.789	11.828.160	14.937.949	0,010
2014	157.216	3.386.947	15.560.999	18.947.946	0,008
2015	134.951	3.414.894	14.010.220	17.425.114	0,008
2016	126.839	2.648.774	14.036.721	16.685.495	0,008
2017	122.245	2.898.609	15.499.069	18.397.678	0,007
Ortalama	136.654	3.091.803	14.187.034	17.278.836	0,008

Tablo 1'deki dizelli taşımacılığın 5 yıllık enerji giderleri ortalamasının 0,008 litre/hamton.km olduğu görülmekte olup, 1 hamton.km taşıma için 0,008 litre yakıt harcanıyor demektir. Aynı durum Tablo 2'te verilen elektrikli taşıma incelendiğinde, ortalamanın 0,031 kWh olduğu görülmüştür. Yani 1 hamton.km değerinde bir taşıma için 0,031 kWh enerji harcanmaktadır.

Tablo 2. Elektrikli taşıtlarla yolcu ve yük taşıma verileri verileri [17]

	Elektrik (kWh)	Yolcu taşıma hamton.km	Yük taşıma hamton.km	Toplam taşıma hamton.km	Enerji gideri kWh/hamton.km
2013	172.729	974.391	2.721.728	3.696.119	0,047
2014	192.320	2.642.448	3.427.706	6.070.154	0,032
2015	196.475	2.993.897	3.977.181	6.971.078	0,028
2016	217.492	3.653.884	5.167.009	8.820.893	0,025
2017	228.653	3.941.914	5.536.058	9.477.972	0,024
Ortalama	201.534	2.841.307	4.165.936	7.007.243	0,031

EPA'ya göre dizelli taşıt emisyon faktörleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi, lokoların imal yıllarına göre emisyon miktarlarının azaltılması öngörülmektedir.

Tablo 3. Lokomotif emisyon faktörleri (gram/litre) [2]

Lokomotif imal yılı	Loko tipi	HC	CO	NO _x	PM ₁₀
Tier 0 (1973 – 2001)	Anahat	2,64	7,03	47,01	1,77
	Manevra	5,55	10,06	69,21	2,43
Tier 1 (2002 – 2004)	Anahat	2,59	7,03	36,72	1,77
	Manevra	5,55	10,06	53,36	2,43
Tier 2 (2004 →)	Anahat	1,43	7,03	27,21	0,95
	Manevra	2,91	10,06	40,15	1,14

3. Materyal ve Yöntem

Emisyon modellemesinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- ~ Enerji tüketiminde yük ve yolcu taşıması birlikte değerlendirilmiştir.
- ~ Analize esas taşıma ölçüsü hamton.km/litre birimidir.
- ~ Modellemede kullanılan girdiler, TCDD Taşımacılık AŞ'den alınmıştır.
- ~ Araçların yaş ortalaması yüksek olduğundan, Emisyon faktörleri Tier 0'a göre alınmıştır.

Modellemede geçerli emisyon faktörleri yolcu ve yük trenleri için Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kullanılan emisyon faktörleri (gram/litre) [2]

DE lokomotif	Emisyon faktörleri (g/litre)			
	HC	CO	NO _x	PM ₁₀
	2,64	7,03	47,02	1,77

Bir trenin seyri esnasında açığı çıkan emisyonlar Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$E = E_f \times F_y \times 1/1.000.000 \quad (1)$$

Emisyon faktörleri (E_f) 1 litre yakıt için gram kirletici olarak verilmektedir. Bu eşitlikteki ögeler; E_f emisyon faktörünü (gram/litre), F_y yakıt miktarını (litre), 1/1.000.000 katsayısı da emisyonları (ton/yıl) olarak dönüştürmekte kullanılmaktadır.

4. Sonuçlar, Değerlendirme ve Öneriler

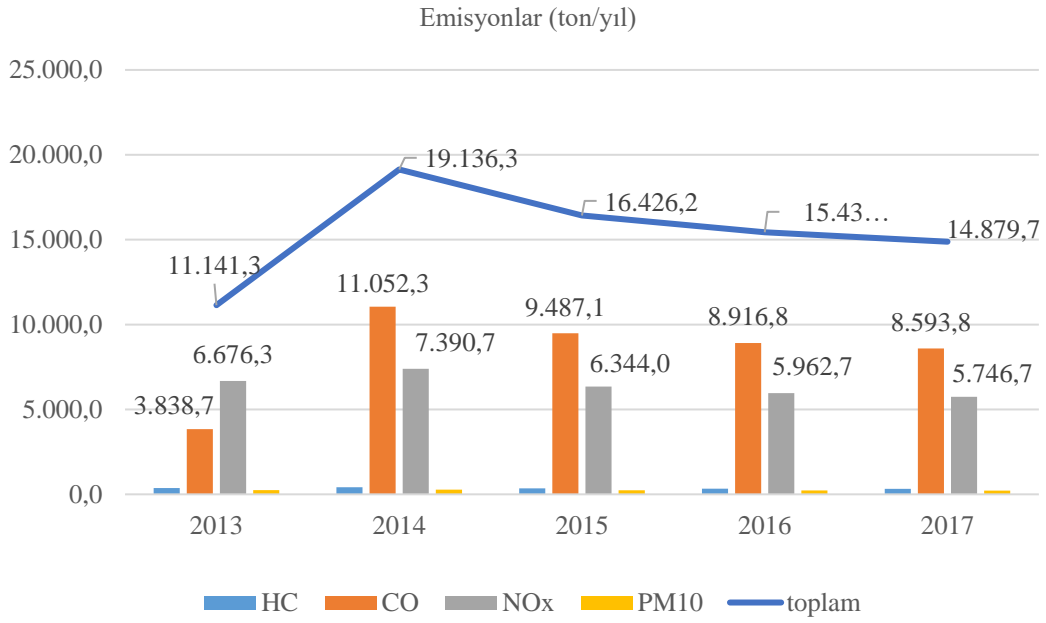
Demiryolu taşımacılığının enerji tüketimi dizelli taşıtlarda; hem 1 litre yakıtla taşınan hamton.km olarak, hem de 1 hamton.km taşıma için tüketilen yakıt olarak incelenirken, elektrikli taşıtlar için de 1 kWh enerjiyle gidilen hamton.km ve 1 hamton.km için harcanan kWh enerji hesaplaması yapılmış ve sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir. 5 yıllık dönemde 1 hamton.km taşıma için de ortalama 0,008 litre yakıt harcanırken, 1 litre yakıtla ortalama 106 hamton.km taşınabilmektedir. 1 litre yakıtla taşıma mesafesi yıllar içinde artmıştır. Elektrikli taşımada ise, 1 hamton.km taşıma için ortalama 0,029 kWh enerji harcanırken, 1 kWh enerjiyle gidilen mesafe yıllar içinde artarak, 41 hamton.km değerine kadar yükselmiştir.

Tablo 5. Dizelli ve elektrikli taşımada verimlilik

	Dizelli taşıma		Elektrikli taşıma	
	Enerji gideri litre/hamton.km	Gidilen mesafe hamton.km/litre	Enerji gideri kWh/hamton.km	Gidilen mesafe hamton.km/kWh
2013	0,010	105	0,047	21
2014	0,008	121	0,032	32
2015	0,008	129	0,028	35
2016	0,008	132	0,025	41
2017	0,007	150	0,024	41
Ortalama	0,008	126	0,029	35

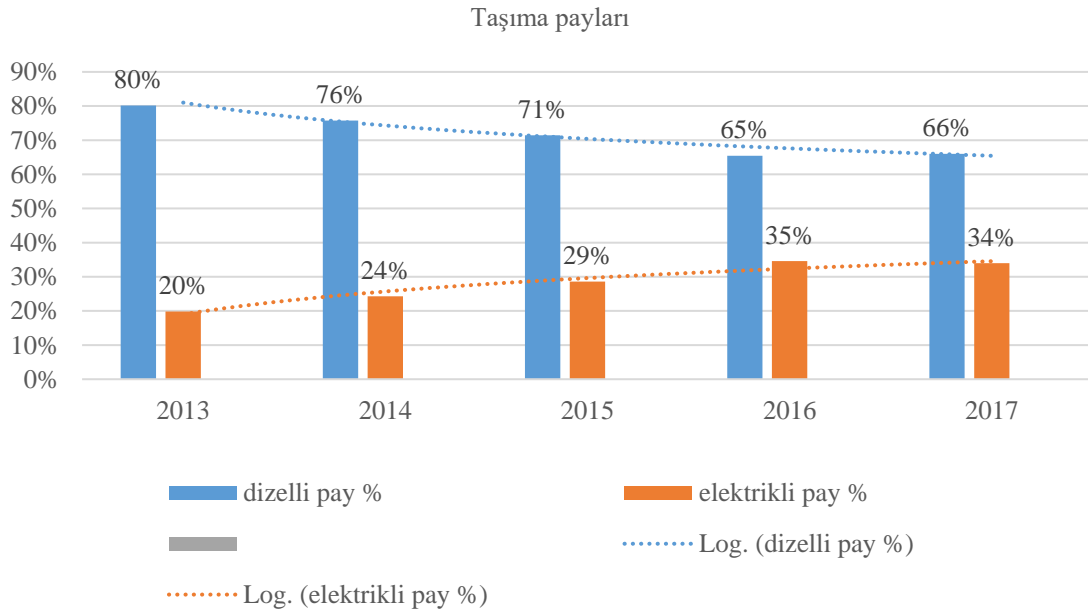
Emisyon modelleme için incelenen 5 yıllık dönemde hamton.km cinsinden yıllık taşıma verilerine göre emisyonlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Taşımacılık 2014 yılında 18.947.946 hamton.km değerle zirve yaptığı yıl olup, toplam emisyonlar da 19.136,3 ton olarak en yüksek değerde çıkmıştır. Takip eden yıllarda taşıma değeri azalırken, emisyonlar da düşmüştür.

Taşımacılıkta atmosfere atılan kirleticileri toplam değeri Şekil 2'de çizgisel olarak gösterilmiştir. Buna göre emisyonların toplamı 19.136,3 ton ile 2014'te zirve yapmıştır. Benzer şekilde CO ve NO_x emisyonları da sırasıyla 11.052,3 ton ve 7.390,7 ton ile en yüksek noktalarına ulaşmışlardır.



Şekil 2. Dizelli demiryolu taşımacılığında emisyonlar (ton/yıl)

Türk demiryolu emisyonlarının ana kaynağı, dizelli demiryolu araçlarının yaygın kullanımındır. Şekil 3'te araştırılan 2013-2017 dönemindeki dizelli ve elektrikli cer karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.



Şekil 3. Yolcu ve yük taşımacılığında dizelli ve elektrikli taşıma payları [9].

İncelenen dönemde dizelli cer %80'den %66'ya düşerken, ona paralel olarak da elektrikli tahrik %20'den %36'ya yükselmiştir. Ancak halen elektrikli hatlarda dahi, yeterli E loko olmadığından veya kötü tren planlama sonucu dizelli trenlerin çalıştırıldığı gözlenmektedir. Bu durumda Şekil 1'de vurgulanan "yaşlı lokomotif varlığı" ve ranforlu yük treni çalıştırma ihtiyacı gibi "yüksek yakıt tüketimi" ve "emisyonları doğurması" kaçınılmaz olmaktadır.

Trenlerin işletilmesinde daha enerji verimli işletmecilik yapmak ve atmosfere atılan egzoz emisyonlarının azaltılması ve TCDDT'nin yakıt tüketimi ile taşıtların yüksek arıza yüzdelерinden kaynaklanan “yüksek işletme” giderleri sorunun temelini oluşturmaktadır. Sorunların asgariye indirilmesi için aşağıdaki öneriler yapılmıştır:

- ~ Dizelli taşıt emisyonlarının daha rasyonel tespiti için, yapay sinir ağları (YSA) yardımıyla modelleme yapılabilir, Meet, Artemis, EcoTransit World ve Mesoscopic modelleri kullanılması faydalı olacaktır.
- ~ TCDDT elektrikli lokomotif tedarikini hızlandırmalı ve lokomotif imalatçısı TÜRASAŞ da bu tedarik zincirine imal edeceği lokomotiflerle katkıda bulunmalıdır. İlk prototipi kullanıma sunulan E5000 lokosu buna bir örnek olup, bu tür loko imalatı hızlandırılmalıdır.
- ~ Maden cevheri vb. ağır tonajlı taşımaların yapıldığı II., IV., V., VI. ve VII. İşletme bölgelerinde şebekenin elverdiği ölçüde taşımalar E lokolarla yapılmalıdır.
- ~ 2023 yılı itibarıyla TCDD'nin 11.668 km olan konvansiyonel hattının 7.142 km'si elektrikli dir. Bu oran konvansiyonel hat için %62'ye denk gelmektedir. Dolayısıyla E lokoların tahsis önceliği, yolcu trenleri yerine yük trenleri olmalıdır.
- ~ Enerji giderinin ve emisyonların azaltılmasında TSİ sisteminin yaygınlaşmasının da önemi vardır. Bu sayede trenler istasyonlarda daha az bekleme yapacaklardır.
- ~ Yoğun yük taşımacılığı yapılan bölgelerde çift hat yapımına öncelik verilmelidir.

Kaynakça

- [1] Resmi gazete, “Türkiye’de demiryolu ulaştırmasının serbestleştirilmesi hakkında kanun,” 1.5.2013 tarih ve 28634 sayılı, 2013
- [2] F. Dincer and T. Elbir, “Estimating national exhaust emissions from railway vehicles in Turkey,” *Science of the Total Environment*, vol. 374, pp. 127–134, 2007. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.043
- [3] M. M. Biliaiev, T I Rusakova, V A Kozachyna, O V Berlov, V M Poltoratska, and Z M Yakubovska, “Simulation of environmental pollution from diesel locomotive”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 985, 012019, 2020
- [4] Ö. F. Cansız, K. Ünsalan, “Türkiye demiryolları karbon ayak izinin temel bileşen analizi destekli yapay sinir ağları yöntemi ile tahmini,” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 11(1), pp. 314-324, 2021
- [5] A. Heinold, “Comparing emission estimation models for rail freight transportation,” *Transportation Research Part D* vol. 86, 102468, 2020
- [6] Y. K. Kim, J. Y. Lee, Y. Rhee, Y. Y. Chun, “Country-specific greenhouse gas emission factors of diesel-electric locomotive in Korea,” *Transportation Research Part D* vol. 57, pp. 74–83, 2017
- [7] Y. Bıyık ve G. Civelekoğlu, “Isparta ilinde karayolu kaynaklı karbon ayak izinin hesaplanması,” *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, vol. 4, iss. 2, pp. 78-87, 2020
- [8] S. K. Annadanam and S. H. Kota “Emission of greenhouse gases and criteria pollutants from railways in India estimated using a modified top-down approach,” *Journal, of Cleaner Production*, vol. 213, 610e617, 2019
- [9] H. Jiang, H. Zhang, M. Fu, Z. Huang, H. Ni, H. Yin, Y. Ding, “Recent advances and perspectives towards emission inventories of mobile sources: Compilation approaches, data acquisition methods, and case studies,” *Journal of Environmental Sciences* vol. 123, pp. 460-475, 2023
- [10] E. Lindgreen and S. C. Sorenson, *Simulation of Energy Consumption and Emissions from Rail Traffic Evaluation*, Workpackage 700: Emission estimating methodology for rail transport, assessment and reliability of transport emission models and inventory systems, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2005.
- [11] TCDD resmi web sitesi, 2023. <https://www.tcdd.gov.tr/kurumsal/hakkinda> [Erişim 05.06.2023]
- [12] M. E. Akay and A. Ustaoglu “Energetic, exergetic, and environmental evaluation of railway transportation by diesel and electric locomotives”, *Environ Prog Sustainable Energy*, 41:e13804, 2022
- [13] M. E. Akay ve H. Aygün “Karabük-Zonguldak hattında demiryolu hat kapasitesinin modellenmesi,” *Politeknik Dergisi*, vol. 25(4), pp. 1817-1825, 2022. doi: 10.2339/politeknik.884305

- [14] M. E. Akay, “Kırıkkale metropoliten ortamında taşıt, konut ve endüstri kaynaklı hava kirliliği araştırması”, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2004
- [15] J. Kean, R. F. Sawyer, and R. A. Harley, “A fuel-based assessment of off-road diesel engine emissions,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 50, Nov. 2000
- [16] B. M. Graver and H. C. Frey, “highway vehicle emissions avoided by diesel passenger rail service based on real-world data,” *Urban Rail Transit*, vol. 2(3-4), pp. 153-171, 2006
- [17] T. Esters and M. Marinov, “An analysis of the methods used to calculate the emissions of rolling stock in the UK”, *Transportation Research, Part D* vol. 33, pp. 1-16, 2014
- [18] TCDD, “TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü istatistik yıllığı 2010-2014 ve 2014-2018,” 2018. [Erişim 08.06.2023]

Özgeçmiş



Mehmet Emin AKAY

1952 yılında İzmir’de doğdu. Gazi Üniversitesi Otomotiv Eğitimi Bölümünde 1975’te lisans, 1996’da yüksek lisans ve Kırıkkale Üniversitesinde 2005’te doktora eğitimini tamamlamıştır. 1987 – 2009 arası Kırıkkale Üniversitesinde öğretim görevlisi, 2009 – 2011 arası Bartın Üniversitesinde, 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 çok sayıda yayını vardır. 2015 yılından bu yana KBÜ Raylı Sistemler Mühendisliğinde Program Başkanı olarak görev yapmaktadır. E-Posta: eminakay@karabuk.edu.tr



Veli ÇELİK

1960 yılında Amasya’da doğdu. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde 1980’de lisans eğitimini tamamladı. Yüksek lisansını İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD’de 1983 yılında, doktorasını da aynı kurumda 1989 yılında tamamladı. SAÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde 1990 – 1996 yıllarında Yrd. Doç. Dr. ve Doç. olarak çalıştı. Profesör olarak atandığı Kırıkkale Üniversitesinde 1996 – 2014 yılları arasında Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi ve Dekan olarak görev yaptı. Halen Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Profesör olarak göreve devam etmektedir. E-Posta: vcelik@aybu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Lokomotif ve Vagonlardan Müteşekkil Bir Trenin Dinamik Modellenmesi ve Açık Çevrim Simülasyonu

Ege GÜNİNDİ^{1*}, Taha EFİL², Hakan ÜLKER¹

¹ Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

² Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Taşımacılık A.Ş., Ankara, Türkiye

*gunindiege@gmail.com

(Alınış/Received: 09.07.2023, Kabul/Accepted: 22.07.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Lokomotif ve vagonlardan teşekkül eden tren dizilerinin dinamiğinde çoklu ünite setlerinin dinamiğine nazaran bazı farklar mevcuttur. Bu sebeple trenin idaresinde makinist tarafından verilen kumandalar farklı durumlar ile neticelenmektedir. Bu vakianın halihazırda işleyen bir trenin seyrindeki tesirini göstermek maksadı ile MATLAB Simulink ortamında dinamik sistem modellenmesi yapılmış ve TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından halihazırda işletilen, DE 22000 tipi dizel elektrik lokomotif teminatındaki 14 adet Rgns tipi vagonlardan müteşekkil 23256 numaralı blok yük treninin seyrinden seçilen safhalardaki muhtelif durumlar açık çevrim simülasyona tabi tutulmuştur. Bu durumlara sebep olan parametrelerin tesirlerinin anlaşılması için matematik modelleri ile izahatı müteakiben tren teşkilatındaki araçlar ve başlangıç koşulları ile birlikte seyirden seçilen fren ve cer safahatı izah edilip simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlarda, fren safhasında kıyaslanan parametreler olan fren tutma ve çözme süresi ve sabo ile tekerlek arasındaki sürtünme katsayısının trenin seyrinde ciddi seviyede farka sebep oldukları; cer safhasında kıyaslanan parametreler olan seyir direnci ve kütle faktörünün ise nispeten düşük seviyede farka sebep oldukları görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Dinamik sistem modelleme, Açık çevrim simülasyonu, Tren dinamiği, Cer, Fren, Demiryolu araçları

Dynamic Modeling and Open Loop Simulation of a Train Consisting of Locomotive and Wagons

Abstract: The dynamics of train sets consisting of locomotive and wagons have some differences compared to multiple unit sets. For this reason, the commands given by the train driver result in different cases. In order to show the effect of this fact on the cruise of a currently operating train, dynamic system modeling is performed in the MATLAB Simulink and open loop simulations of various cases have been made for phases selected from cruise of the block train numbered 23256 operated by TCDD Transport, which is consisting of 14 Rgns type freight wagons hauled by a DE 22000 type diesel electric locomotive. Mathematical models are explained in order to understand the effects of the parameters that cause these different cases. Afterwards, the vehicles in the train consist and initial conditions are explained, as well as the braking and traction phases selected from the cruise and the simulation results are shown. According to these results, brake applying and releasing time and friction coefficient between brake shoe and wheel, which are the parameters compared in the braking phase cause serious differences in the cruise. It has been observed that the running resistance and especially the mass factor, which are the parameters compared in the traction phase cause a relatively small amount of difference in the cruise.

Keywords: Dynamic system modeling, Open loop simulation, Train dynamics, Traction, Braking, Rolling stock

1. Giriş

Ülkemiz konvansiyonel demiryolu trafiğinde işleyen anahat trenlerinden yük trenlerinin tamamı ve yolcu trenlerinin büyük kısmı lokomotif ve vagonlardan müteşekkil tren dizileri (kısaca “katar” denilecektir) ile temin edilmektedir [1]. Elektrikli ve dizel çoklu ünitelerin terkibi muhtelif sayıda motris ve römork vagonlardan meydana gelse de modern setler tek kumanda kolu ile basit şekilde

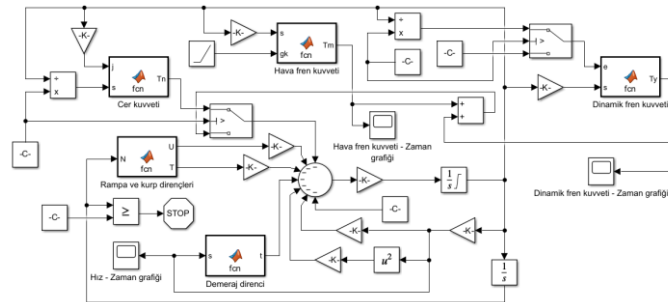
Atıf için/Cite as: E. Günindi, T. Efil, H. Ülker, “Lokomotif ve vagonlardan müteşekkil bir trenin dinamik modellenmesi ve açık çevrim simülasyonu,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 171-183, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1324847

kumanda edilmekte, bu ise uygun bir sinyalizasyon sistemi ile birleştiği takdirde tam otomasyonu dahi mümkün kılmaktadır. Öyle ki Marmaray'da otomatik modda insana ihtiyaç başlangıç yetkisinin aktive edilmesi ve yolcu kapıları içindir [2]. Buna mukabil katarlarda verilecek kumanda, zamanlaması ve kademesi tren teşkilatına bağlı olup farklı şartlarda uygun kumandalar ile trenin hem emniyetli ve konforlu hem de itinereye uygun seyrini temin etmek anahat tren makinistliğinde mesleki tecrübeyi şart koşmaktadır. Ülkemizde cer ve fren kumandalarının idaresi haricinde de insana ihtiyaç hayli fazladır zira makinistlik seyrüsefer kaidelerinde tren seyrinin ve aynı anda kompleks bir makinenin idaresidir. Ayrıca çoğu yük treninde şeftrenlik de yapıldığından servis boyunca dizideki tüm araçların muayenesi ve acil hallerde en kısa sürede fiziki müdahalesi makinistlerce yapılmaktadır. Ülkemiz şartına mukabil Avustralya'da bir firmanın devamlı aynı tren teşkilatında, aynı yolda işleyen blok yük trenleri 2018 yılından beri otomatik seyretmektedir [3]. Ülkemiz coğrafyası sebebiyle dünya modern demiryolları içinde en zorlu yol profillerinden birine sahip olmamızın insana ihtiyaç duyulan iş yükünü artırmasına ilaveten rutin işleyen trenlerin dahi tren teşkilatı neredeyse her serviste değişmekte, tekayyüdatlar sebebiyle livre hızları farklı yerlerde kısıtlanmakta, servis esnasında da trenin idaresinde fark yaratacak vaziyetler meydana gelebilmektedir. Tüm bu vaziyetler makinistin kumandaları ile telafi edilmektedir. Yanlış kumandaların neticesi de değişmekte; misal, yüksek sadme yalnız konforu düşürebileceği gibi kanca koparmaya da sebep olabilecektir. Kimi hallerde azami hızı riayet için kumanda zamanlamasını doğru yapmak gerekmektedir. Hatta bu hallerden olan dik rampa inişleri için hattı caride durup-kalkma noktaları (günümüzde "D feneri") ihdas edilerek arzulanmayan hızlanmalar bilvasıta önlenmiştir [4].

Bu çalışmada, katar hareketinin dinamik sistem modellemesi MATLAB Simulink ortamında yapılmış ve TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından halihazırda işletilen, DE 22000 tipi dizel elektrik lokomotif teminatında 14 adet Rgns vagonundan müteşekkil 23256 numaralı blok yük treninin seyrinden seçilen fren ve cer safhalarında makinist tarafından verilen kumandaların muhtelif durumlardaki neticeleri modelin açık çevrim simülasyon sonuçlarında gösterilmiştir. Bu sayede; normalde belirli değer kabulleri ile ele alınan, gerçekte ise makinistin treni idaresine direkt tesir eden parametrelerin farklı değerlerinin ilk defa gerçek bir tren ile ele alınmaları sağlanmıştır.

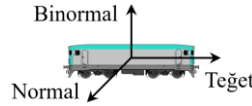
2. Metot

Bu çalışma kapsamındaki modelleme ve simülasyon işlemleri, The MathWorks, Inc. firması tarafından yayımlanan MATLAB paket programı içerisinde yer alan Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. MATLAB Simulink ortamında oluşturulan model

Tren teşkilatındaki her bir demiryolu aracı, yol profilinin alıyman yahut kurp, eğimsiz yahut rampa kesiminde bulunsun; daimi surette üç eksende kuvvetlere maruz kalmaktadır. Şekil 2.'deki lokomotif, eğri boyu hareket eden bir cisim olarak düşünülmelidir.



Şekil 2. Demiryolu aracının hareket eksenleri

Aracın müstakilen hareketi için bileşke kuvvetin her üç bileşeni sarfınazar edilemeyecek olsalar da mevzubahis beher araçtan ziyade tekml katarın hareketi olduğundan yalnız teğet bileşendeki kuvvetler nazarıtibara alınmalıdır. Eğri boyu hareket eden cisme tesir eden bileşke kuvvetin teğet bileşenin genel formu Denklem 1.'de gösterilmiştir.

$$F_t = m * \left(\frac{dv}{dt} \right) \quad (1)$$

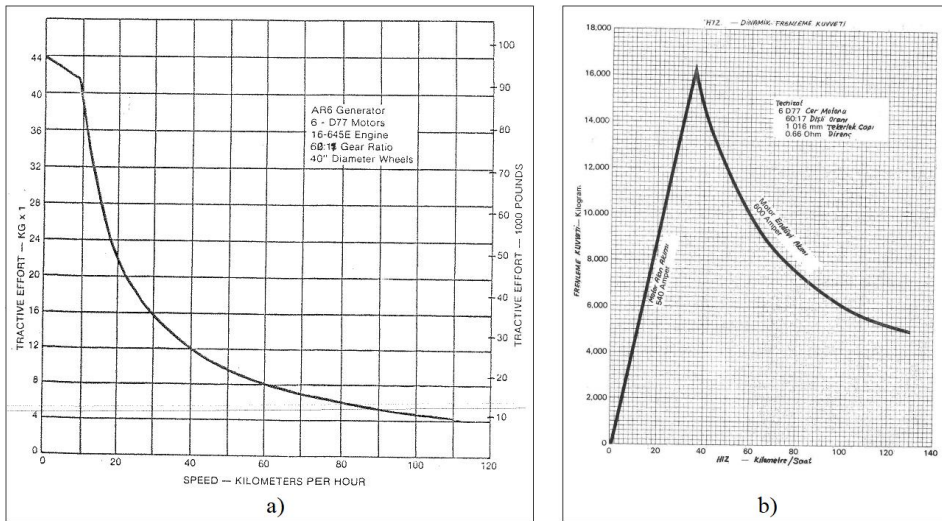
Denklem 1.'de " F_t " bileşke kuvvetin eğriye teğet bileşeni, " m " cismin kütlesi, " dv/dt " cismin çizgisel ivmesidir. Fakat ivmeli harekette hesaplamalar hakiki kütle (m) tekerlek takımları, transmisyon, cer motor endüvileri gibi dönme hareketi yapan komponentlerin atalet momentleri ilave edilerek elde edilen "fiktif kütle" (m_f) için yapılmalıdır. Denklem 2.'de " I " bu komponentlerin polar atalet momentlerinin toplamı, " r " aracın tekerleklerinin yarıçapıdır.

$$m_f = m + \sum \left(\frac{I}{r^2} \right) \quad (2)$$

Denklem 2.'deki tüm parametreler " m " ile sadeleştirildiği takdirde birimsizleşen " I/r^2 " ifadesine "kütle faktörü" (λ) denilecektir. Değeri araç tipine bağlıdır. Misal, vagonlar için 0,03 – 0,10; dolu katarlar için 0,06; elektrikli ve dizel lokomotifler için 0,15 – 0,30 değerleri verilmektedir [5].

2.1. Cer ve dinamik fren kuvvetleri

Cer ve dinamik fren kuvvetleri yalnız lokomotifte, hava fren kuvveti ise lokomotiften kontrol edilerek her bir aracın kendi teçhizatı ile tatbik edilmektedir. Bunun hayli müsbet etkisi, cer ve dinamik fren kuvvetlerinin kolay kontrolü ve makinist tarafından verilen kumandanın kısa süre içinde uygulanmasıdır. Bu çalışmada simüle edilen treni temin eden DE 22000 tipi dizel elektrik lokomotifin azami cer kuvveti ve azami dinamik fren kuvveti eğrileri Şekil 3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3. DE 22000 tipi lokomotif için a) Cer eğrisi [6] b) Dinamik fren eğrisi [7]

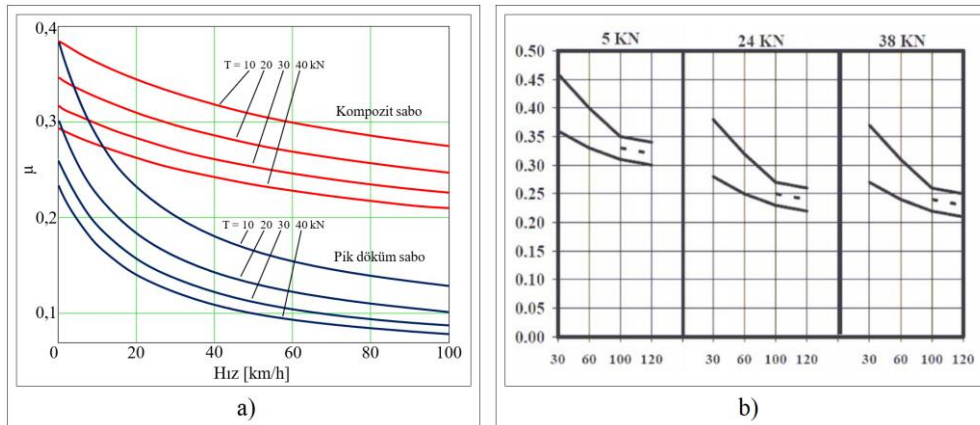
2.2. Hava fren kuvveti

Hava fren, katarın tamamında “endirekt fren sistemi” ile kontrol edilmektedir. Prensibi Westinghouse [8] adına motamot çevirisi ile “Akışkan tazyikli otomatik fren mekanizması” başlığında patentli olduğundan “Westinghouse otomatik fren sistemi” ifadesi ile de müsemmadır. Sistem, ana boru (kondüvit) hattında belirli bir “işletme basıncı”na tazyiklendirilmiş havanın bu basıncının kademeli düşürülmesi ile katar “fren atılması” yani dizideki araçların “fren tutmaları”, basıncın tek seferde yahut kademeli geri yükseltilmesi ile de “fren çözmeleri” (“tahliye etmeleri”) prensibi ile kontrol edilmektedir. Ülkemizin dahil olduğu standartlarda işletme basıncı 5 bar olup tam fren için $1,5 \pm 0,1$ bar fren atılmalıdır [9].

Kondüvit hattındaki basınç değişimleri; her bir aracın fren silindirlerinin fren tutarken hava ile doldurulup basınçlandırılmasını, fren çözerken ise bu havanın atmosfere tahliyesini intac etmektedir. Fren silindiri içindeki pistonu tatbik edilen kuvvet, tahrik uzvu piston tiji olan mekanizma vasıtası ile sabo baskı kuvvetine tahvil edilmektedir. Bu kuvvet bahsedilen pnömatik ve mekanik sistem ile kontrol edilmesine rağmen meydana gelen nihai fren kuvveti sabo ile tekerlek yuvarlanma yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısına bağlıdır. Denklem 3.’te “ F_f ” fren kuvveti, “ μ ” sabo ile tekerlek yuvarlanma yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı ve “ F_s ” sabo baskı kuvvetidir.

$$F_f = \mu * F_s \quad (3)$$

Ülkemizde lokomotifler ve yolcu vagonlarında sabolu fren yahut diskli fren, yük vagonlarında ise -yabancı istisnai vagonlar hariç- sabolu fren kullanılmaktadır. Denklem 3.’teki ifade diskli fren için de geçerlidir. Bu sefer “ μ ” balata ile fren diski arasındaki sürtünme katsayısı ve “ F_s ” balata baskı kuvveti olmaktadır. Diskli frende μ değerinin hıza bağlı değişimi hayli düşük seviyededir [10]. Bu sayede diskli frende μ değerinin belirli bir hıza kadar sabit kabulü caizdir. Fakat μ değerinin yüzey sıcaklığı gibi birçok parametreden etkilenmesi ve balata malzemesinin organik, sinterli, kompozit gibi farklı tiplerde olması gibi sebeplerle her halükarda farkları da havidir. Sabolu frende μ değeri hıza bağlı olarak ciddi seviyede değişmekte, ayrıyeten sabo malzemesi ve F_s ’nin değeri de farklılara sebep olmaktadır. Şekil 4.’te bu vaziyet görülmektedir.



Şekil 4. μ değerinin hıza bağlı değişimi a) Kompozit ve pik döküm sabolarda muhtelif F_s değerleri için eğriler [11] b) Simüle edilen trendeki vagonların saboları için bazı F_s değerlerinde tolerans eğrileri [12]

Şekil 4. (a) görselinde lacivert eğriler pik döküm sabo, kırmızı eğriler kompozit sabo için muhtelif sabo baskı kuvvetlerinde μ değerinin hıza bağlı değişimini göstermektedir. Bu çalışmada simüle edilen tren teşkilatındaki vagonların tamamı K tipinde, 1xBgu tertibinde kompozit sabolar ile mücehhezdir [13]. Şekil 4. (b) görselinde bu sabo tip ve tertibatı için muhtelif F_s değerlerinde μ

değerinin hıza [km/h] bağlı değişiminin asgari ve azami toleransları görülmektedir. Simülasyonlarda asgari ve azami μ değerleri için bu eğrilere itibar edilmiştir.

Endirekt fren sisteminde katarın fren tutma ve çözme süresi fren neviden ve katar uzunluğundan etkilenmektedir. Bu çalışmada simüle edilen trenin de tabii olduğu yavaş tesirli fren nevinde tek aracın fren tutması 18 s – 30 s aralığında, fren çözmesi 45 s – 60 s aralığında olmalıdır. Bazı araç karakteristikleri için bu sürelerde uzamalara da cevaz verilmektedir. Katar uzadıkça dizinin sonlarına doğru bu süreler de uzamaktadır. Misal, yavaş tesirli fren için son vagonun fren çözme süresi 750 m uzunluğundaki dizide azami 70 s olmalıdır [9]. Ayrıca boru içi akıştaki kayıplar sebebiyle dizinin sonlarına doğru kondüvit basıncı da düştüğünden normal servis frenlemelerinde uzun dizilerin son vagonlarının yeterince fren tutmaması da vakiadır. Bilhassa yük trenlerinde yavaş tesirli fren kullanılması zarureti, hayli uzun fren tutma ve çözme sürelerine sebep olmaktadır. Bu süreleri minimize etmek için yük trenlerinde dizide yavaş ve seri tesirli frenlerden bir arada istifade edilen uygulamalar da mevcuttur [14].

2.3. Harekete karşı gelen direnç kuvvetleri

Demiryolu araçlarının daimi surette maruz kaldıkları, harekete karşı gelen direnç kuvvetleri menşelerine göre tasnif edilmekte olup esas sınıflar “seyir direnci”, “rampa direnci” ve “kurp direnci”dir. Bu çalışmada “ R ” toplam direnci, “ r ” birim direnci ifade etmektedir. Metrik sistemdeki cer mekaniği literatüründe R ’nin birimi kilopond (kp, kg_f) olduğundan ton (t) birimindeki kütle için birim ağırlık başına düşen direncin (r) birimi kp/t_r olacaktır. Cer ve fren kuvvetleri SI birim sisteminde newton katlarında hesaplanacağı için direnç kuvvetlerinin de bu birimde olması faydalıdır. En yakın birim dekanewton (daN) olduğu için (1 kp = 0,980665 daN) dirençlerin seviyeleri nazarda tutulduğunda ufak fark kabili ihmal olduğundan formüllerde aynı değerler ile yalnız kp olan kuvvet biriminin daN ile tebdili modern çalışmalarda sıkça görülmekte olup bu çalışmada da tercih edilmiştir.

Seyir ve kurp dirençleri, cer mekaniği literatüründeki ampirik formülasyon ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada ülkemiz otoritelerince uzun yıllardır tercih edilen formülasyon kullanılmıştır.

Seyir direnci, aracın harekete müteallik komponentlerindeki sürtünme kuvvetlerinin, ray ile tekerleklerin temasında meydana gelen yuvarlanma direncinin ve aracın aerodinamik direncinin toplamıdır. Birim seyir direncinin genel formunu gösteren Denklem 4.’te “ v ” araç hızı, “ a ” hızdan bağımsız katsayı, “ b ” hız ile lineer artışı temin eden katsayı, “ c ” hızdaki artışın karesi oranında artışı temin eden katsayıdır.

$$r = a + bv + cv^2 \quad (4)$$

Lokomotif seyir direnci için tercih edilen formül, Davis [15] tarafından yapılan çalışmada elde edilen, Denklem 5.’teki formüldür [5].

$$r_L = f(w) + bv + \frac{CAv^2}{wn} \quad (5)$$

Denklem 5.’te “ r_L ” lokomotif birim seyir direnci, “ v ” araç hızı, “ w ” dingil basıncı, “ n ” dingil sayısı, “ A ” aracın ön yüzey alanı, “ $f(w)$ ” dingil basıncının fonksiyonu olan hızdan bağımsız katsayı, “ b ” hız ile birlikte lineer artışı temin eden katsayı, “ C ” hızdaki artışın karesi oranında artışı temin eden katsayıdır. Tercih edilen formül, elektrikli lokomotifler için verilen bu formüldeki formülün $A = 10 \text{ m}^2$ için toplam dirence intibak edilmiş halidir [5].

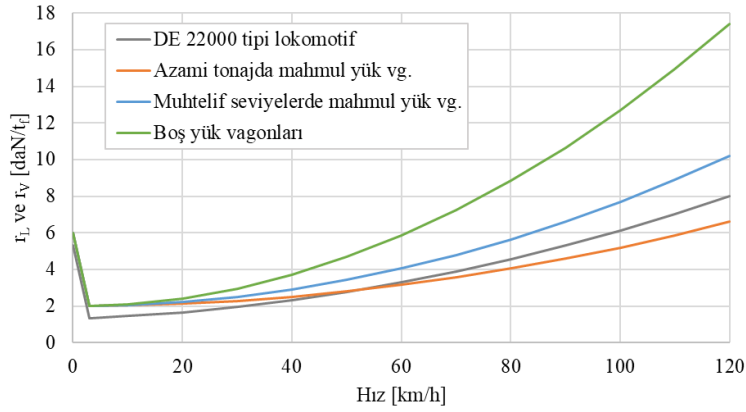
Vagon seyir direncinde tesiri en hissedilir parametreler vagon tipi ve dingil basıncı olup katar tonajında vagonların payı sebebiyle bu direnç hayli ehemmiyet arz etmektedir. Tercih edilen formül, Strahl [16] tarafından yapılan çalışmada elde edilen formülasyondan bir kabul olup Denklem 6.'daki formdadır [5]. Denklem 6.'da " r_V " vagon birim seyir direnci, " v " araç hızı, " a " hızdan bağımsız katsayı, " c " hızdaki artışın karesi oranında artışı temin eden katsayıdır. Bu " c " katsayısı için tavsiye edilen değerler, bahsedilen parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

$$r_V = a + cv^2 \quad (6)$$

En başta yapılan tasnif için seyir direnci sınıfına dahil edilebilecek, tren seyrinde demeraj safhasının başı yani kalkış anında yataklarda meydana gelen, hareketsiz muyluların ilk harekete karşı gösterdikleri ilave direnç olan "demeraj direnci", haliyle aracın dingil yataklamasında kullanılan yatak tipinden etkilenmektedir. Bu direnç ilave edildiğinde ilk hareket için seyir direnci esas değerinin birkaç katına yükselmektedir. Nihayetinde dinamik sistem için kati surette ihmal edilmemesi gereken bir dirençtir. Modern bir hesaplamada ilk harekette birim demeraj direncinin 4 kp/t_f olup hızdaki artış ile lineer azalıp 3 km/h hızda yok olacağı kabulü görülmektedir [17]. Bu değişim basitçe bir adi diferansiyel denklem ile çözüldüğü takdirde elde edilen ifade olan Denklem 7.'de " r_D " birim demeraj direnci [daN/t_f] ve " v " katarın hızı [km/h]’dır.

$$r_D = 4 - \left(\frac{4v}{3}\right) \quad (7)$$

Bu çalışmada simüle edilen tren teşkilatındaki araçlar için şimdiye kadar verilen formülasyon ile hesaplanan birim seyir dirençlerinin katar hızına bağlı değişimleri Şekil 5.'te gösterilmiştir. Lokomotifin (118 t) ve vagon dizisinin (1092 t) tonajları düşünüldüğünde r_V 'nin hissedilir seviyede farka sebep olacağı görülmektedir. Bu parametre (r_V) için çok sayıda ampirik formül mevcut olup bunlardan ülkemize en uygun olanın tespiti maksatlı deneyler de yapılmaktadır [18].



Şekil 5. Tren teşkilatındaki araçlar için birim seyir dirençlerinin hıza bağlı değişimi

Rampa direnci, araca tesir eden yer çekimi kuvvetinin yol eksenindeki bileşeninden ibarettir. Bu kuvvet cer mekaniğinde dirençler başlığında ele alınsa da inişlerde haliyle hareket ile aynı yönde tesir etmektedir. Eğimli yol yatay ile " θ " açısı yapan eğik düzlem, araç ise bu düzlem üzerindeki bir cisim olarak düşünülmelidir. Bu cisme tesir eden yer çekimi kuvvetinin eğik düzlem doğrultusundaki bileşeninin şiddeti haliyle bileşke yer çekimi kuvvetinin $\sin\theta$ katı kadar olacaktır. Misal, dik bir rampa olan %25 eğimli yol için $\theta = 1,43^\circ$ olacaktır. Çok küçük açılarda $\sin\theta \cong \tan\theta$ olduğundan $\tan\theta$ yani eğim ile oluşturulan Denklem 8.'de " R_R " toplam rampa direnci [daN], " m " aracın kütlesi [kg], " g " yer çekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$), " i " yolun binde eğimidir. Bu denklemdeki " mg " aracın ağırlığı olduğu için " r_R " birim rampa direnci " i " kadar daN/t_f olacaktır.

$$R_R = mg \left(\frac{i}{1000} \right) \quad (8)$$

Dik rampa inişlerinde seyir ve kurp dirençleri bu kuvvetin tesirini azaltsalar da nihayetinde makinist yer çekimi kuvveti hilafına fren kumandaları vererek tren hızını idare etmektedir. Simüle edilen fren safhası da bir dik rampa inişinden seçilmiştir.

Kurp direnci, yolun kurp kesimlerinde meydana gelen muhtelif menşeli kuvvetlerin toplamını ifade etmektedir. Tercih edilen formülü gösteren Denklem 9.'da " r_K " birim kurp direnci [daN/t_f] ve " ρ " kurp yarıçapı [m]'dır [5]. Misal, simüle edilen trenin güzergahında hattı carideki en dar kurp ($\rho = 249$ m) için $r_K = 3,2$ daN/t_f olmaktadır.

$$r_K = \frac{800}{\rho} \quad (9)$$

Konvansiyonel demiryolu için yapılan hesaplamalarda ekseriya ihmal edilen "tünel direnci" ise seyir direncinin terkib hisselerinden aerodinamik direncin tünel geçişlerindeki artışından ibarettir.

2.4. Simüle edilen tren ve seyir safhaları

TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından işletilen 23256 numaralı blok yük treni, DE 22000 tipi (tek) lokomotif teminatında, her biri eşit tonajda çift konteyner taşıyan (brüt 78 t) 14 adet Rgns tipi platform vagonun müteşekkil, lokomotif dahil 301 m uzunluğundadır. Yol profili ile araçların ve dizinin parametreleri, MATLAB Simulink ortamında oluşturulan modele tanımlanmıştır. Trenin seyirinden seçilen fren ve cer safhalarındaki her bir durum, ilgili safhada mukayese edilen parametrelerin şimdiye kadar bahsedilmiş asgari ve azami değerleri için oluşturulmuştur.

Tren teşkilatındaki Rgns tipi vagonların hava fren teçhizatı sensörlü tiptedir. Her bir vagonun brüt tonajı için tam frende 3,8 bar fren silindiri basıncı neticesi $F_s = 30,56$ kN olmaktadır [13]. Vagon evsafı gereği azami F_s değerine de tekabül eden bu değer için itibari fren ağırlığı 58 t'dur [19]. Tüm vagonların hava frenleri faal ise trenin fren nisbeti %74 olmaktadır. Orer %41 fren nisbeti için çizildiğinden, güncel mevzuat gereği dizideki konumları gözetilerek azami 6 vagonun hava frenleri iptal edilebilecektir zira bu halde fren nisbeti %42 olacaktır.

Seçilen seyir safhalarının arka planında, 23256 tren (14 vagon, 56 dingil, 1092 t hamule) Balışih'teki tam fren tecrübesi sonrası hava frenleri faal 8 vagonu ile mücavir İzzettin'i geçip Çerikli'ye kadar devam edecek olan dik rampa inişine başlamıştır. Şekil 6.'da gösterilen trenin seyir cetveli gereği; ilk merhalede km 135+200'deki azami 30 km/h hız bölgesine yaklaşılana fren safhasındaki durumlar simüle edilmiştir. Bilahare seyrin devamında Yeniyanan'dan kalkışı müteakip Sekili cihetine cer safhasındaki durumlar simüle edilmiştir.

İSTASYONLAR	Azami Hız	Asgari Müddet	Tabii Müddet
İzzettin	55	12	19
Km.126+800	55		
Km.128+400	50		
Km.129+600	55		
Km.135+200	60		
Yağlı	30	11	12

a)

İSTASYONLAR	Azami Hız	Asgari Müddet	Tabii Müddet
Yeniyanan	55	14	15
Km.161+400	55		
Km.178+600	70		
Sekili	55	16	20

b)

Şekil 6. 23256 trenin seyir cetvelinden ilgili kısımlar: a) İzzettin-Yağlı b) Yeniyanan-Sekili

Fren safhasında; trenin başının km 134+400’de olduğu andan Yağlı batı başmakasa (km 135+354) ulaştığı ana kadarki seyri simüle edilecektir. Bu süreçte takriben km 135+100’de personel Yağlı batı giriş sinyalinin sarı üzeri sarı bildiri verdiğini gördüğünden girilecek yolda limit yapana kadar azami 30 km/h hız ile devam edileceği de kesinleşmektedir. Bu safhadaki durumlar, hava fren sürelerinin ve sabo ile tekerlek arasındaki μ değerinin asgari ve azami değerleri için oluşturulmuştur. Hava fren sürelerinin asgari ve azami değerleri için hızlı ve yavaş “fren davranışı” denilecektir.

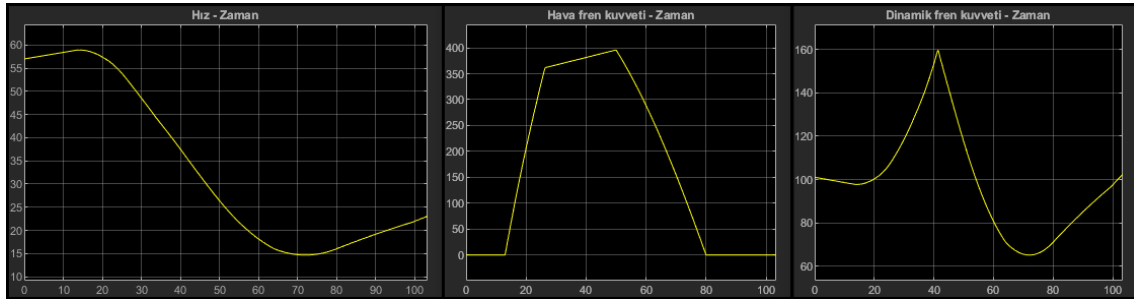
Cer safhasında; tren Yeniyanan’da barınma yolundan kalkışı müteakip sapsmalı geçiş sebebiyle azami 30 km/h hız ile seyretmiş, bilahare bu kısıtın henüz bittiği konum olan trenin başının km 161+600 hektometre işaretine ulaştığı, dizel motor tam devirde azami cer kuvveti tatbikatı yapılan, hızın 28 km/h olduğu andan başlayarak, hızın frene ihtiyaç duyulmadan yalnız gaz kumandası ile kontrol edileceği, km 177+600’e kadarki seyir simüle edilecektir. Gaz devamlı tam kademede açık tutularak, trenin bu dalgalı yol profilindeki hızlanması her durum için görülecek, livre hızına (70 km/h) yaklaşılana kadar gaz kademesi kasten düşürülmeyecektir. Bu safhadaki durumlar, seyir direncinin ve kütle faktörünün asgari ve azami değerleri için oluşturulmuştur.

3. Bulgular

Fren safhasında her durum için zamana [s] bağlı hız [km/h], hava fren kuvveti [kN] ve dinamik fren açık ise ayrıyeten dinamik fren kuvveti [kN] grafikleri verilmiştir.

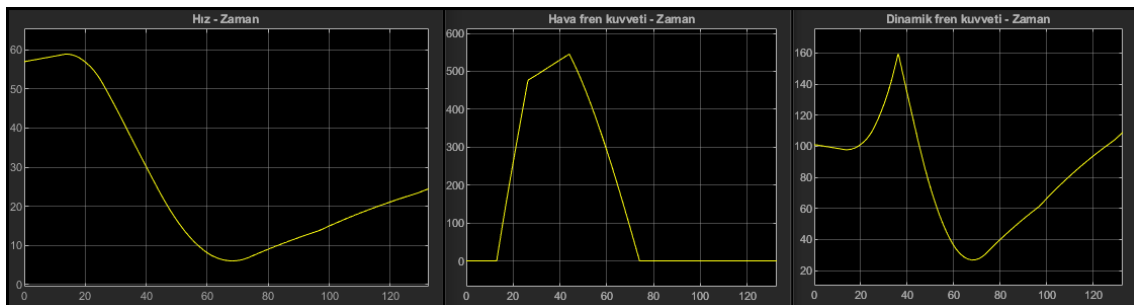
Dinamik fren açık durumlarda dinamik fren devamlı tam kademede açık; 57 km/h ilk hız ile 10 s sonra 1,0 bar fren atılmakta, hız 30 km/h olunca tahliye (fren çözme kumandası) verilmektedir.

Dinamik fren açık, hızlı fren davranışı ve asgari μ durumu için simülasyon sonuçları Şekil 7.’de gösterilmiştir.



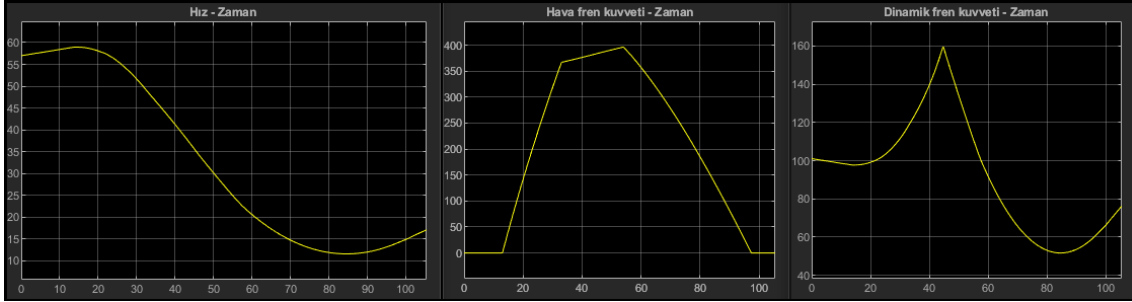
Şekil 7. Dinamik fren açıkken hızlı fren davranışı ve asgari μ durumu için sonuçlar

Dinamik fren açık, hızlı fren davranışı ve azami μ durumu için simülasyon sonuçları Şekil 8.’de gösterilmiştir.



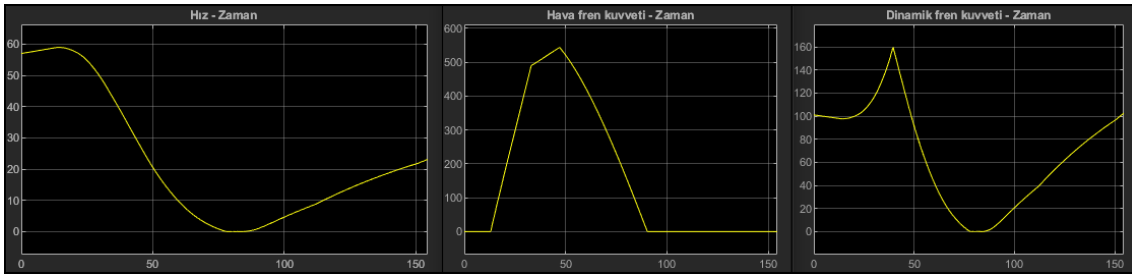
Şekil 8. Dinamik fren açıkken hızlı fren davranışı ve azami μ durumu için sonuçlar

Dinamik fren açık, yavaş fren davranışı ve asgari μ durumu için simülasyon sonuçları Şekil 9.'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Dinamik fren açıkken yavaş fren davranışı ve asgari μ durumu için sonuçlar

Dinamik fren açık, yavaş fren davranışı ve azami μ durumu için simülasyon sonuçları Şekil 10.'da gösterilmiştir.

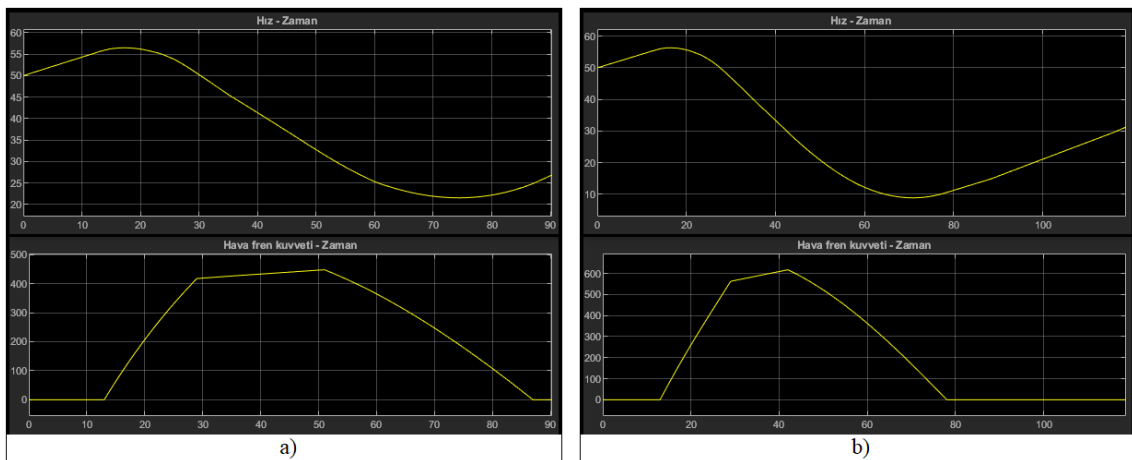


Şekil 10. Dinamik fren açıkken yavaş fren davranışı ve azami μ durumu için sonuçlar

Seyir süreleri 103 s – 155 s aralığında, nihai hız tüm durumlarda uygun değerdedir. Son durumda tren oturmakta yani henüz tahliye etmeyen fren sebebiyle arzulanmayan duruş yaşanmaktadır.

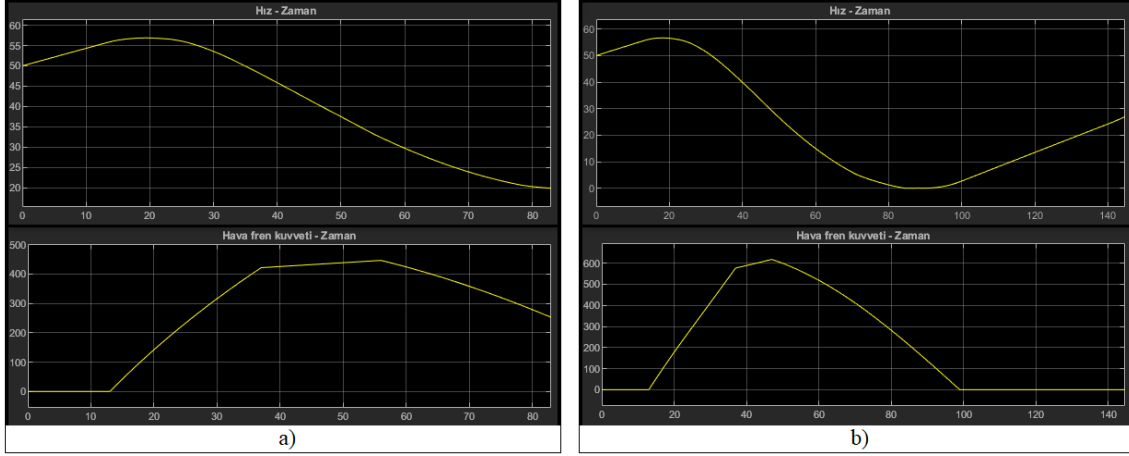
Dinamik fren kapalı durumlarda 50 km/h ilk hız ile 10 s sonra 1,2 bar fren atılıp lokomotifte tamamen pürjör (endirekt fren tahliyesi) yapılmakta, hız 35 km/h olunca tahliye verilmektedir.

Dinamik fren kapalı, hızlı fren davranışı, asgari μ durumu için simülasyon sonuçları ve dinamik fren kapalı, hızlı fren davranışı, azami μ durumu için simülasyon sonuçları Şekil 11.'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Dinamik fren kapalıyken hızlı fren davranışında sonuçlar a) Asgari μ için b) Azami μ için

Dinamik fren kapalı, yavaş fren davranışı, asgari μ durumu için simülasyon sonuçları ve dinamik fren kapalı, yavaş fren davranışı, azami μ durumu için simülasyon sonuçları Şekil 12.'de gösterilmiştir.

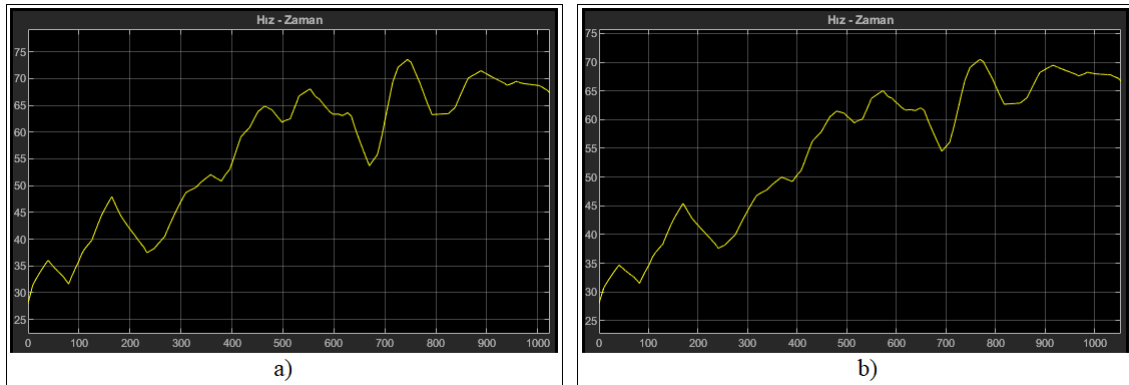


Şekil 12. Dinamik fren kapalıyken yavaş fren davranışında sonuçlar a) Asgari μ için b) Azami μ için

Seyir süreleri 83 s – 145 s aralığında, nihai hız asgari μ durumları için uygun değerde olsa da azami μ durumlarında tahliye sonrası uzun süre geçtiği için 30 km/h hızın aşıldığı yahut aşılmak üzere olduğu yani aslında tekrar fren atılacağına dikkat edilmelidir. Yavaş fren davranışı için asgari μ durumunda henüz tahliyenin devam ettiği fakat oturma riskinden uzak bulunduğu, azami μ durumunda trenin oturduğu görülmektedir.

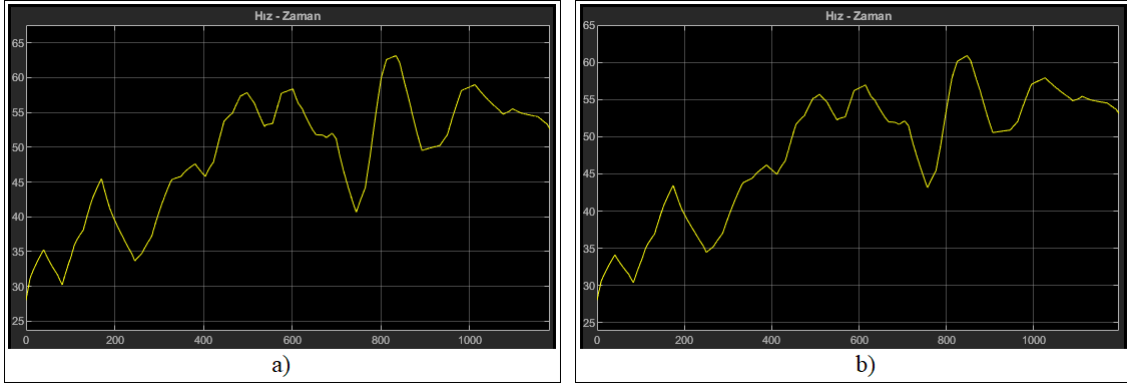
Cer safhasında her durum için zamana [s] bağlı hız [km/h] grafikleri verilmiştir.

Asgari seyir direncinde asgari kütle faktörü (λ) durumu için simülasyon sonucu ve asgari seyir direncinde azami kütle faktörü durumu için simülasyon sonucu Şekil 13.'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Asgari seyir direncinde sonuçlar a) Asgari λ için b) Azami λ için

Azami seyir direncinde asgari kütle faktörü durumu için simülasyon sonucu ve azami seyir direncinde azami kütle faktörü durumu için simülasyon sonucu Şekil 14.'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Azami seyir direncinde sonuçlar a) Aşgari λ için b) Azami λ için

Aşgari seyir direnci durumlarında seyir süresi 17 dk. ve 18 dk., azami seyir direnci durumlarında seyir süresi 20 dk.'dır. İki istasyon arası 20 dk. tabii müddet de (Şekil 6.'da idi) tehirdar hususunda dikkate şayandır. Aşgari seyir direnci durumlarında λ 'ya bağılı olarak iki ve bir defa livre hızı aşılırken azami seyir direnci durumlarında livre hızına yaklaşılamadığı görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, katarla tesir eden parametrelerin farklı değerlerinin ilk defa gerçek bir tren ile ele alınmaları maksadı ile MATLAB Simulink ortamında oluşturulan dinamik sistem modelinde TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından işletilen DE 22000 tipi dizel elektrik lokomotif teminatında 14 adet Rgns vagonundan müteşekkil 23256 numaralı blok yük treninin seyrinden seçilen fren ve cer safhalarında muhtelif durumlar için yapılan açık çevrim simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

Fren safhasında mukayese edilen parametrelerden hem fren tutma ve çözme sürelerinin hem de sabo ile tekerlek arasındaki sürtünme katsayısının trenin seyrine ciddi seviyede tesir ettiği görülmüştür. Hava fren sisteminin yapısı gereği bundan kaçınmak için, atılan fren mümkün mertebe düşük miktarda olmalıdır. Bunun temini için ise trenin fren nisbeti yüksek olmalı ve müsait hallerde dinamik frenin hava freni telafi edici etkisinden istifade edilmelidir.

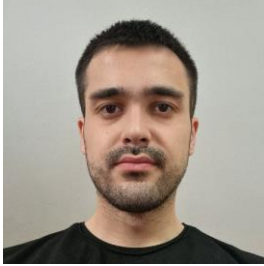
Cer safhasında mukayese edilen parametrelerden kütle faktörünün tesirinin seyir direncinininkine nazaran düşük seviyede olduğu, nihayetinde bu iki parametrenin tam gazdaki hızlanma sürecinde hissedilir tesirleri olduğu görülmüştür. Hızın muhafazası yahut gaz kademesi düşürülerek azaltılması gibi hallerde ise cer sisteminin yapısı gereği anlık kumandaların çok kısa süre içinde uygulanması sayesinde bu parametrelerin farklı değerlerini telafi etmek mümkündür.

Kaynakça

- [1] TCDD Taşımacılık A.Ş., “2021 İstatistikleri” [Online]. Available: <https://adminapi.tcddtasimacilik.gov.tr/files/pdfs/TCDD-Tasimacilik-2021-istatistikleri.pdf> [Accessed June 28, 2023]
- [2] S. Karayanık, “Marmaray sinyalizasyon sistemleri ve anlaşıman sisteminin SCADA ile simülasyonu,” M.S. thesis, Dept. Elect. Eng. Marmara University, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [3] Knorr-Bremse AG, “Self-driving trains: the world’s heaviest robot.,” 2023. [Online]. Available: <https://www.knorr-bremse.com/en/magazine/self-driving-trains-the-worlds-heaviest-robot.json> [Accessed June 28, 2023]
- [4] B. Erkin, *Hâtrât 1876-1958*. Ankara, Türkiye: Türk Tarih Kurumu Yayınları, 2010.
- [5] C. Urlu, *Demiryolu araçlarının ileri dinamiği*. Ankara, Türkiye: TCDD Yayınları, 1999.
- [6] General Motors Electro-Motive Division, “G26CW-2 Locomotive Tractive Effort Curve”.
- [7] Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İşletmesi, “DE 22000 Lokomotif Servis Kataloğu,” 1987.
- [8] G. Westinghouse, “Fluid-pressure automatic brake mechanism,” U.S. Patent 425059, April 8 1890.

- [9] *Brakes - Air brakes for freight trains and passenger trains*, UIC Code 540, 2005.
- [10] *Brakes - Disc brakes and their application - General conditions for the approval of brake pads*, UIC Code 541-3, 2010.
- [11] P. Ivanov, A. Khudonogov, E. Dulskiy, N. Manuilov, A. Khamnaeva, A. Korsun, and S. Treskin, "Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1614, no. 1, pp. 012086, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1614/1/012086
- [12] *Brakes - Brakes with composite brake blocks - General conditions for certification of composite brake blocks*, UIC Code 541-4, 2010.
- [13] Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, "Physical Brake Calculation 4-Axle Rgns CFCB S-Traffic / Tülomsas," 2017.
- [14] *Rules for the consist and braking of international freight trains*, UIC Code 421, 2012.
- [15] W. J. Davis, "The tractive resistance of electric locomotives and cars," *General Electric*, 1926.
- [16] G. Strahl, "Verfahren zur bestimmung der belastungsgrenzen der dampflokomotiven," *Z. Des. Vereins Dtsch. Ing*, vol. 57, pp. 251, 1913.
- [17] Škoda Transportation a.s., "Cer Eğrileri ve Seyir Simülasyonları TCDD Elektrikli Lokomotifler," 2011.
- [18] 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
- [19] TCDD Taşımacılık A.Ş., "Vagon Evsaf Formu," 2017.

Özgeçmiş



Ege GÜNİNDİ

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

E-Posta: gunindiege@gmail.com



Taha EFİL

Makine mühendisliği lisans eğitimini Erciyes Üniversitesinde, Siyaset bilimi ve kamu yönetimi yüksek lisans eğitimini Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesinde tamamlamıştır. TCDD Cer Dairesi (bilahare Araç Bakım Dairesi) Başkanlığı birimlerinde, 2014 yılından itibaren tren işletme biriminde çalışmış, halen TCDD Taşımacılık A.Ş. Yük Dairesi Başkanlığında operasyon birimlerinden sorumlu görevini yürütmektedir. İlgili alanına giren araştırma konuları kriz yönetimi, tren işletmeciliği, stratejik yönetim ve tren planlamasıdır.

E-Posta: tahaefil@yahoo.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: Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, İnceleme, Yazma-rijinal taslak hazırlama, Görselleştirme. Taha EFİL: İnceleme, Metodoloji, Kaynaklar. Hakan ÜLKER: Metodoloji, İnceleme, Yazılım, Kontrol.



Demiryolu İşletmelerinde Emniyet Kültürü: TCDD Taşımacılık A.Ş. Tren Makinistleri Örneğinde Bir Faktör Analizi Çalışması

Kamil ESEN*^{ORCID}, Kadir AKSAY^{ORCID}, Ömür AKBAYIR^{ORCID}

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

*kamilesen26@gmail.com

(Alınış/Received: 20.04.2023, Kabul/Accepted: 24.07.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Geleceğin ulaşım modu olarak görülen demiryolu taşımacılığında çalışanların emniyete dair tutumlarını ölçmek, gerek konuya yönelik iyileştirilmesi gereken alanların belirlenmesi, gerekse de emniyete dair strateji ve politika üretme noktasında önemlidir. Bu kesitsel çalışmada demiryolu taşımacılığında emniyetin sağlanması noktasında önemli aktörler olan tren makinistlerinin, emniyet kültürüne yönelik tutumlarını değerlendirmek amacıyla geçerli ve güvenilir bir kavramsal form geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca binaen literatürdeki ve sektörde otorite konumdaki kurumların kullandıkları araçlar araştırılmış 80 maddelik bir madde havuzu oluşturulmuş, 25 madde emniyet konusunda uzman akademisyen ve uygulayıcıların önerileri doğrultusundan havuzdan çıkarılmıştır. Böylelikle ölçek geliştirme kriterlerine uygun olarak 55 maddeli taslak form elde edilmiştir.

Oluşturulan taslak form TCDD Taşımacılık A.Ş.'de görev yapmakta toplamda 250 tren makinistine uygulanmıştır. Uygulama sonrasında elde edilen veri setinin faktör analizi için uygunluğunu belirlemek amacıyla yapılan KMO test değeri; ,929 olarak belirlenmiştir. Ayrıca ölçme aracının açıkladığı toplam varyans oranı ise %72,579'dur. Ölçme aracının kapsam geçerliliği akademisyen ve sektördeki uzmanlardan oluşan 10 kişinin görüşü alınarak sağlanmaya çalışılmıştır. Açıklayıcı faktör analizi sonucunda ölçüm aracının 32 maddeden oluşan 5 faktör altında toplandığı görülmüştür. Bu faktörler sırasıyla "Raporlamada etkinlik", "İşbirliği ve Gönüllü Katılım", "Bireysel Sorumluluk", "Prosedürel Liderlik" ve "Yöneticilerin Desteği" şeklindedir. Ölçeğin yapı geçerliliğini test etmek amacıyla doğrulayıcı faktör analizi yapılmıştır. Doğrulayıcı faktör analizi için örneklem miktarı 652'dir. Elde edilen değerler ölçeğin geçerli ve güvenilir olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Ölçek geliştirme, Demiryolu, Emniyet kültürü, Tren makinisti, Faktör analizi, Örgütsel davranış

Safety Culture in Railway Operations: TCDD Transport Inc. a Factor Analysis Study on the Example Train Driver

Abstract: Measuring the safety attitudes of the employees in railway transportation, which is seen as the transportation mode of the future, is important both in determining the areas that need improvement and in producing a strategy and policy regarding safety. In this cross-sectional study, it is aimed to develop a valid and reliable conceptual form in order to evaluate the attitudes of train drivers, who are important actors in ensuring safety in railway transportation, towards safety culture. For this purpose, the tools used by the institutions in the literature and the authorities in the sector were researched, an 80-item item pool was created, and 25 items were removed from the pool in line with the recommendations of academicians and practitioners who are experts in the field of safety. Thus, a 55-item draft form was obtained in accordance with the scale development criteria.

The draft form created was applied to a total of 250 train drivers working at TCDD Transport Inc. The KMO test value, which was made to determine the suitability of the data set obtained after the application for factor analysis; It was determined as .929. In addition, the total variance rate explained by the measurement tool is 72.579%. The content validity of the measurement tool was tried to be ensured by taking the opinions of 10 people consisting of academicians and experts in the sector. As a result of the

Atıf için/Cite as: K. Esen, K. Aksay, Ö. Akbayır, "Demiryolu işletmelerinde emniyet kültürü: TCDD Taşımacılık A.Ş. tren makinistleri örneğinde bir faktör analizi çalışması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 184-199, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1286269

exploratory factor analysis, it was seen that the measurement tool was grouped under 5 factors consisting of 32 items. These factors are respectively “Efficiency in reporting”, “Collaboration and Voluntary Participation”, “Individual Responsibility”, “Procedural Leadership” and “Managers Support”. Confirmatory factor analyzes were performed to test the construct validity of the scale. The sample size for confirmatory factor analysis is 652. The obtained values showed that the scale was valid and reliable.

Keywords: Scale development, Railway, Safety culture, Train driver, Factor analysis, Organizational behaviour

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı bünyesinde son derece karmaşık operasyonları barındıran, risk faktörlerinin yüksek olduğu bir endüstridir. Ayrıca oldukça dinamik alt sistem ve süreçlerin bir arada olduğu, mükemmeye ulaşma ihtimalinin düşük olduğu bir sistem mühendisliği olduğu söylenebilir. Dinamik süreç içerisinde alt sistem ve süreçlerde meydana gelebilecek her türlü olumsuz durum sistemin bütününe doğrudan etkileyecek, sosyal ve ekonomik faktörlerin yanında arzu edilmeyen sonuçların oluşmasına neden olabilecektir [1]. Bu nedenle tüm operasyonlar maksimum emniyeti gözeterek şekilde gerçekleştirilmelidir [2]. Konvansiyonel tren işletmeciliğine nazaran daha teknolojik bir işletmecilik türü olan yüksek hızlı tren işletmeciliği, yüksek hızdan kaynaklı riskleri barındırması nedeniyle farklı emniyet parametrelerinin devreye girmesine sebep olmuştur. Yüksek hızlı tren işletmeciliğiyle birlikte karşılaşmış olduğumuz bu ekstra parametrelerin diğer tren işletme türlerinde de uygulanabilir olması topyekûn bir emniyet yönetim sistemini gerektirmiştir. Bu bağlamda demiryolu ağına sahip tüm ülkelerde demiryollarında emniyet sistematik bir şekilde alınmakta ve bu amaçla uluslararası otoritelerin direktifleri çerçevesinde emniyet yönetim sistemi uygulanmaktadır [3], [4]. Emniyet Yönetim Sistemlerinin (EYS) amacı, organizasyonlarda emniyetin sağlanmasına sistematik bir yaklaşım getirmektir. EYS, tehlikelerin belirlenmesi, emniyet verilerinin toplanması, verilerin analizi ile emniyet risklerinin sürekli değerlendirilmesi ile, emniyet performansının sürekli olarak geliştirilmesi için tasarlanmıştır [5].

Yasal otoriteler tarafından hazırlanan mevzuatlarda emniyetin tanımı: “Kabul edilemez risklerin kontrol altında tutulması amacıyla gerekli önlemlerin alınması” olarak yapılmıştır. Avrupa Birliği Komisyonu trenlerin karşılıklı işletilmesine dair yayınladığı direktiflerle yönetsel mevzuatları oluşturmada ve yaygınlaştırılmasını sağlamaktadır. Teknolojik olarak gelinen durumda karşılıklı işletilmesinin en temel öznesi ETCS (Avrupa tren kontrol sistemi) ve ERTMS (Avrupa demiryolu trafik yönetim sistemi) sistemlerinin devreye alınmasıdır. Direktifler ve bu sistemler toplam emniyet kavramının gelişmesine katkı sağlamaktadır [3], [6].

Türkiye’de demiryolu sektörü için 2004 tarih ve L164/44 sayılı Avrupa Birliği Resmî Gazetesinde 2004/49/EC sayılı emniyet direktifi yayınlanmıştır. Demiryollarında emniyet yönetim sistemine ilişkin zorunluluk 2004 yılında yayımlanan söz konusu direktifle ortaya çıkmıştır.

Emniyet yönetim sistemine ilişkin literatürdeki çalışmalar havacılık ve diğer sektörlerde olduğu gibi demiryolu sektöründe yaygın değildir. Bu nedenle demiryolu sektöründe emniyet yönetim sistemiyle ilgili çalışmalar söz konusu direktifin yürürlüğe girmesine paralel olarak son yirmi yılda hız kazanmıştır. Ne var ki emniyete dair konular yüksek risk barındıran tüm alanlarda olduğu gibi demiryolu taşımacılığı sektöründe de araştırma yapmaya muhtaç görünmektedir.

Konunun yasal yönü ulusal ve uluslararası otoriteler tarafından takip edilse de yönetim alanı açısından emniyetin sağlanması sistem dışında pek çok farklı unsurla ilintilidir. Bu unsurlara kurumsal iletişim, örgütsel kültür, liderlik ve bu konulara benzer daha pek çok konu örnek verilebilir. Literatüre bu konular bağlamında bakıldığında, -taşımacılık alanında- özellikle havacılık sektöründe bu farklı unsurlar ve emniyet kültürüne yönelik birçok çalışma yapıldığı

görülmektedir. Ancak havacılık sektörü kadar yüksek riskler barındıran ve yüksek bir emniyet kültürüne sahip olması beklenen demiryolu sektöründe bu doğrultuda fazla çalışma olmadığı bu konu üzerinde araştırma yapmanın önemini gözler önüne sermektedir. Bu çalışmanın literatüre küçük bir katkı sunması ve elde edilen çıktının (kavramsal formun) araştırmacılar ve uygulayıcılar tarafından kullanılabilir bir ölçme aracı olması arzu edilmektedir. Demiryolu sektöründe yaşanan kazaların kök nedenleri analiz edildiğinde büyük bir kısmının insan kaynaklı olduğu görülecektir. Bu noktada kurumlarda var olan örgütsel kültür öğeleri içinde emniyet kültürü öğelerinin varlığı, güvenli faaliyetlerin sağlanmasında önemli bir araçtır. Öyle ki pozitif bir kültürün insan davranışlarını olumlu etkileyen bir unsur olduğunu söylemek mümkündür. Bu nedenle emniyetin sağlanması açısından önemli bir başlığın emniyet kültürü olduğunu söylemek mümkündür.

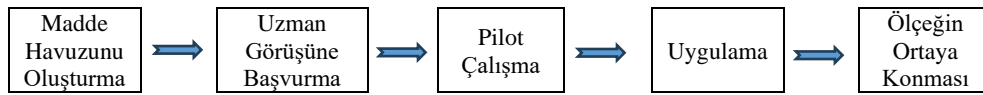
Ölçme biliminin en temel kavramlarından biridir. Herhangi bir organizasyonda mutlaka bir ölçüm faaliyeti gerçekleşmektedir. Yönetimle ilgili olarak süreçlerin ve performansların ölçülmesi son derece önemlidir. Son yıllarda üzerinde fikir birliğine varılmış önemli bir söz “ölçemediğinizi yönetemezsiniz.” der. Diğer taraftan kurumsal kültürün ölçümü işletmelere politika ve strateji üretme, aksiyon alma ve daha pek çok nedenden dolayı önemli bir konudur. Günümüz iş dünyasında yönetici ve liderlerin karar alırken kullandıkları enformasyon büyük oranda ölçüm sonuçları sonrasında üretilen verilerden kaynaklıdır. Bu noktada ölçülebilirlik ilgili konuda standart birimler geliştirmekle sağlanır [7].

Bu bağlamda, çalışmanın bir demiryolu şirketinde görev yapan tren makinistlerinin, emniyet kültürüne yönelik tutumlarını belirleyebilecek bir ölçme aracı geliştirme denemesi olduğu söylenebilir.

2. Metot

Araştırmanın evrenini TCDD Taşımacılık A.Ş.'de görev yapmakta olan tren makinistleri oluşturmaktadır. Katılımcıları araştırmaya dahil etmek için kolayda örnekleme yöntemi kullanılmıştır. TCDD Taşımacılık A.Ş. bünyesinde aktif olarak görev yapmakta olan tren makinistlerine “Taslak Emniyet Kültürü Anketi” yazılı form ve e-formlar ile ulaştırılmıştır ve doldurulan formlar geri toplanmıştır. Açımlayıcı faktör analizi aşamasında 250, doğrulayıcı faktör analizi aşamasında ise 652 tren makinisti olmak üzere çalışmaya toplamda 902 makinist dahil edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ölçek geliştirme sürecini genel anlamda aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür [8];



Şekil 1. Ölçek geliştirme süreci

Bu araştırmada ölçek geliştirmeye yönelik literatürdeki pek çok çalışmada [9], [10] benimsenen aşağıdaki adımlar gerçekleştirilmeye çalışılmıştır;

1. Literatür taraması ile teorik altyapının ortaya konması,
2. Madde havuzunun oluşturulması,
3. Madde havuzunun kapsam geçerliliği bağlamında uzman görüşüne sunulması,
4. Araştırmanın çalışma grubuna taslak ölçme aracının uygulanması,
5. Verilerin faktör analizine uygunluğunun belirlenmesi ve açımlayıcı faktör analizi,
6. Açımlayıcı faktör analizi sonrasında ortaya çıkan yapının farklı örnekleme uygulanması,
7. Elde edilen sonuçlara doğrulayıcı faktör analizi uygulanması.

Araştırmada veri toplama aracı olarak kullanılan anketler havacılık sektöründe farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ölçüm araçlarının demiryollarına uyarlanması ve sektör analizi yapılarak derlenmiştir. Özellikle havacılık sektöründe uygulanmış olan kaynak [11]'deki çalışmadan faydalanılmıştır. Maddeler derlenirken TCDD Taşımacılık A.Ş. yöneticilerinden ve Eskişehir Demiryolu Eğitim ve Sınav Merkezi Müdürlüğündeki makinist eğitimcilerinden görüş alınmıştır.

Oluşturulan madde havuzu sektörde aktif olarak görev yapan beş yönetici ve beş makinist olmak üzere toplam on kişiye gönderilerek teknik açıdan uzman görüşü istenmiştir. Ayrıca dil bilgisi açısından kontrolünün yapılması için dil uzmanı desteği alınmıştır.

Çalışmada elde edilen verilerin analizinde SPSS 15 programı kullanılmıştır. Oluşturulan ölçme aracının boyut sayısının belirlenmesi için Açıklayıcı Faktör Analizi (AFA) yapılmıştır. AFA sonrasında oluşturulan ölçüm aracına AMOS 24 programı kullanılarak Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) uygulanmıştır. Analizler ile ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır.

2.1. Açıklayıcı faktör analizi

Araştırma dahilinde 250 katılımcıya ulaşılmıştır. Bu çalışmadaki veri toplama aracında 55 madde bulunmaktadır. 20 anket, soruların bir kısmına cevap verilmediğinden çalışma dışı bırakılmıştır. 230 katılımcı üzerinden çalışmaya devam edilmiştir. Örneklem miktarı arttıkça açıklayıcı faktör analizini yapmak kolaylaşmaktadır. Örneklem minimum miktarıyla ilgili görüş birliği bulunmamaktadır. Bazı çalışmalarda örneklem büyüklüğü 1000 mükemmel, 500 çok iyi, 300 iyi, 200 orta, 100 zayıf ve 50 çok zayıf olarak sınıflandırılmıştır. Kaynak [12] ve [13]'de yapılan çalışmalarda 100 ve 500; kaynak [14]'de yapılan çalışmada 50; kaynak [15]'de yapılan çalışmada ise 200, 500 ve 1000 alınmıştır. Çalışma kapsamında ulaşılan 230 katılımcı yeterli örneklem büyüklüğüne ulaşıldığını göstermektedir.

Faktör çıkarma, bir veri setindeki değişkenler arasındaki yapısal ilişkileri anlamak ve bu ilişkileri açıklayan daha az sayıda faktörü tanımlamak amacıyla kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. Faktör çıkarmak için yöntem olarak En Çok Olabilirlik (Maximum likelihood-MLE) seçilmiştir. MLE, veri setindeki bir modelin en olası parametre değerlerini tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, modelin parametrelerini tahmin etmek için mevcut veri setinin en iyi uyduğu değerleri arar. Bu nedenle, MLE yöntemi, veri setinin uyumunu artırarak modelin doğruluğunu artırabilir [16].

İlk faktör analizinde döndürme yöntemi kullanılmamıştır. İlk faktör analizinden sonra ilk olarak KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) Testi ve Bartlett Küresellik Testi yapılmıştır. Veri yapısının örneklem büyüklüğü açısından uygunluğu KMO testi ile kontrol edilmektedir. KMO değeri 0 ile 1 arasında olabilir. Değer 1'e yaklaştıkça değişkenler arasındaki ilişkinin net olduğu ve faktör analizinin güvenilir sonuçlar vereceği söylenebilir [17]. Tablo 1.'de görüldüğü gibi; KMO testi sonucunun 0,929 olduğu belirlenmiştir. $KMO > 0,9$ olduğu için veri setinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görülmekte olup, mükemmel sonuç yorumu yapılabilmektedir.

Verilerin çok değişkenli dağılımdan geldiği Bartlett Küresellik Testi ile ortaya konur. Diğer bir deyişle Bartlett Küresellik Testi değişkenlerin birbiri ile korelasyon gösterip göstermediklerini sınar [17]. Tablo 1.'den görüldüğü gibi; Sig. değeri 0,05 altında olduğundan Bartlett Küresellik Testi anlamlıdır.

Tablo 1. KMO ve Bartlett testi sonuçları

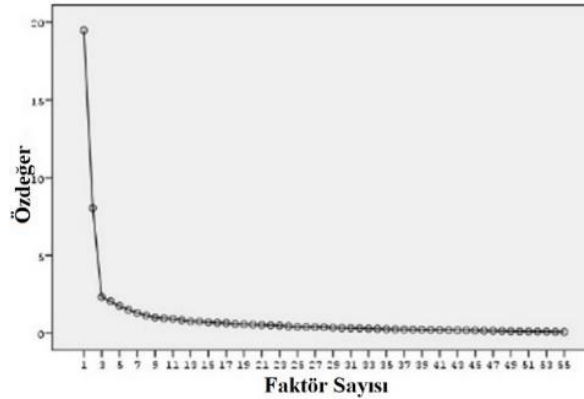
KMO Katsayısı		,929
Bartlett Testi	Chi-Square	9867,429
	Df	1485
	Sig.	,000

Faktör sayısı SPSS 15 kullanılarak özdeğer istatistiği ile belirlenmiştir. Özdeğer istatistiği (eigenvalue), analize 1'den büyük olan faktörlerle devam edilmesi anlayışına dayanmaktadır [18]. Tablo 2.'de açıklanan toplam varyans değerleri görülmektedir. Çevrilmiş kareli ağırlıklar toplamı sütununda görüldüğü üzere 8 faktör önerilmektedir. Özdeğeri 1'in üzerinde bulunan 8 bileşen bulunmaktadır. Bu sekiz değer varyansa yaptığı katkı %68,267'dir. Ancak faktör sayısına karar verilirken değerlendirilmesi gereken önemli bir husus, her bir faktörün toplam varyansa yaptığı katkının önemidir. İlk özdeğerler sütununda varyans yüzdesine bakıldığında, birinci faktörün toplam varyansa %35,424'lük bir katkı yaptığı görülmektedir. İkinci faktörde bu oran %14,622'dir ve bu oranın giderek azaldığı görülmektedir.

Tablo 2. Faktörlerin özdeğerleri ve açıklanan varyans oranları

Faktör	Özdeğer	Açıklanan Varyans %	Kümülatif %
1	19,483	35,424	35,424
2	8,042	14,622	50,046
3	2,316	4,211	54,257
4	2,047	3,721	57,978
5	1,740	3,164	61,142
6	1,497	2,722	63,864
7	1,292	2,349	66,212
8	1,130	2,055	68,267

Faktör sayısına karar vermede ayrıca Şekil 2.'deki yamaç birikinti grafiği (scree plot) incelenmiştir. Grafik, bileşen sayısını x-ekseninde ve açıklanan varyansı y-ekseninde gösterir. Grafik, bileşen sayısına göre düşen bir eğri çizer. Eğrinin düşüşünün yavaşladığı veya "düzlediği" nokta, faktör sayısını belirlemek için kullanılır. Bu noktadan sonra, ek faktörler veya bileşenler açıklanan varyansı çok az artıracaktır [16].

**Şekil 2.** Yamaç-Birikimi grafiği

Ortak varyanslar (Communalites) tablosunun çıkartma (Extraction) sütunundaki her bir değer 0,5 üzerinde olması gerekir [19]. 15, 18, 19, 20, 26, 27, 28, 29, 31, 36 ve 54 numaralı maddelerin değerlerinin 0,5 altı olması nedeniyle analiz dışında tutulmuştur.

İlk faktör analiz sonucu elde edilen faktör bileşen matrisi incelendiğinde; yorumlamanın ve anlamının güç olduğu görülmüştür. İlk faktör en yüksek özdeğere sahip ve en fazla varyansı

açıklamaktadır. İkinci ve diğer faktörlerin, ilk faktöre göre açıkladıkları varyans ve özdeğerleri oldukça düşüktür. Faktör yapısının daha basit hale getirilmesi ve faktörleşmenin daha iyi yorumlanabilmesi için analize döndürme yöntemleri kullanılarak devam edilmiştir. Döndürme işlemi ile faktörler, kendileriyle yüksek ilişki veren maddeleri bulurlar ve daha kolay yorumlanabilirler [20]. Döndürme yöntemi olarak önce dik döndürme teknikleri (Varimax, Equamax ve Quartimax) denenmiştir. Yorumlaması zor sonuçlar verdiği için bu teknikler tercih edilmemiştir. Yatay döndürme tekniklerinden (Direct Oblimin ve Promax) Direct Oblimin'in sonuçları daha anlaşılır ve yorumlanabilir. Faktörler arasındaki yapısal ilişkiler ve her bir maddenin hangi faktörlere daha fazla yüklendiği Direct Oblimin'de belirgin olmuştur. Bu nedenle çalışmaya Direct Oblimin döndürme tekniği ile devam edilmiştir.

İlk döndürmeden sonra maddelerin altı ayrı boyut altında toplandığı görülmektedir. Hangi maddelerin kalacağına karar vermek için ortak varyanslar (Communalities) tablosuna ve döndürülmüş faktör bileşen matrisi tablosuna bakılmıştır. Ortak varyanslar (Communalities) tablosunun çıkartma (Extraction) sütununda 0,50'nin altında değere sahip maddeler çıkarılmıştır. Döndürülmüş faktör bileşen matrisi tablosunda; maddenin iki ya da daha fazla faktörde sahip olduğu yük değerleri arasındaki fark 0,1'den küçük ise binişiklik gerekçesiyle analiz dışı bırakılmıştır [17]. 1., 2. ve 3. döndürme işlemi sonucu analiz dışı bırakılan maddeler aşağıda verilmiştir.

İlk döndürmeden sonra ilk olarak ortak varyanslar (Communalities) tablosu incelenmiştir. 14, 42, 51 numaralı maddelerin 0,5 altı değere sahip olduğu görülmüştür. 35 numaralı madde, 1. faktöre ,444, 6. faktöre ise ,355 oranında yük vermektedir. 30 numaralı maddenin 1. faktöre ,348, 6. faktöre ise ,311 oranında yük verdiği görülmektedir. 51 numaralı maddenin 1. faktöre ,410, 6. faktöre ise ,384 oranında yük verdiği görülmektedir. 8 numaralı maddenin 1. faktöre ,354, 5. faktöre ise ,436 oranında yük verdiği görülmektedir. Ortak varyanslar (Communalities) tablosundaki değerleri 0,5 altında olması ve faktör yükleri arasındaki değerlerin 0,1 altında olması nedeniyle 14, 42, 51, 35, 30 ve 8 numaralı maddeler çıkarılmıştır.

İkinci döndürmeden sonra; ortak varyanslar (Communalities) tablosunda 13 ve 32 numaralı maddelerin değeri 0,5 altında kalmıştır. 9 numaralı madde, 1. faktöre ,378, 5. faktöre ise ,455 oranında yük vermektedir. Bu nedenle; 13, 32 ve 9 numaralı maddeler çıkarılmıştır.

Üçüncü döndürmeden sonra; ortak varyanslar (Communalities) tablosunda 12 numaralı maddenin değeri 0,5 altında kalmıştır. 17 numaralı madde, 1. faktöre ,396, 5. faktöre ise ,338 oranında yük vermektedir. 16 numaralı madde, 1. faktöre ,386, 5. faktöre ise ,317 oranında yük vermektedir. Bu nedenle; 12, 17 ve 16 numaralı maddeler çıkarılmıştır.

Tablo 3.'de son analiz olan dördüncü döndürme işlemi sonrası açıklanan toplam varyans değerleri görülmektedir. Faktörlere uygunluğu düşük çıkan analiz dışına çıkarılacak madde kalmamış olup, açıklayıcı faktör analizi sonlandırılmıştır. Kalan 32 maddenin toplam varyansın %72,579'unu açıkladığı ve beş alt boyutta toplandığı tespit edilmiştir. Açıklanan toplam varyansın yüksekliği, makinistlerin emniyet kültürünün ölçülmesine ilişkin geliştirilen yapının iyi ölçüldüğünü ortaya koymaktadır. Beş faktör ayrı ayrı ele alındığında toplam varyansa:

- Birinci faktörün % 36,410
- İkinci faktörün % 21,157
- Üçüncü faktörün % 6,648
- Dördüncü faktörün % 4,904
- Beşinci faktörün % 3,459 katkı yaptığı görülmüştür.

Tablo 3. Açıklanan toplam varyans tablosu

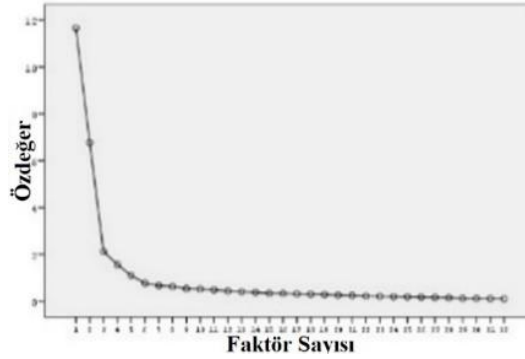
Faktör	Özdeğer	Açıklanan Varyans %	Kümülatif %
1	11,651	36,410	36,410
2	6,770	21,157	57,568
3	2,127	6,648	64,215
4	1,569	4,904	69,120
5	1,107	3,459	72,579

Tablo 4.'de son analiz olan dördüncü döndürme işlemi sonrası KMO ve Bartlett Testi sonuçları görülmektedir. Üç döndürme işlemi sonrasında binişik ve düşük faktör yüklü maddeler çıkarılmış olup, son olarak dördüncü döndürmeyle KMO testi sonucunun 0,924 olduğu belirlenmiştir. $KMO > 0,90$ olduğu için mükemmel bir sonuç elde edildiği yorumu yapılabilmektedir. KMO değerinin yüksek olması, ölçme aracındaki her bir değişkenin diğer değişkenler tarafından mükemmel bir şekilde tahmin edilebileceği anlamına gelmektedir [17].

Tablo 4. KMO ve Bartlett Testi sonuçları

KMO Katsayısı		,924
Bartlett Testi	Chi-Square	5977,989
	df	496
	Sig.	,000

Son analiz olan dördüncü döndürme işlemi sonrası elde edilen Şekil 3.'deki Yamaç-birikinti grafiğine bakıldığında Y eksenindeki bileşenlerin, X eksenine doğru bir iniş yaptığı görülmektedir. Beşinci noktaya dikkat edildiğinde ise eğim bir plato yapmaktadır. Bu noktadan sonraki faktörlerin varyansa yaptıkları katkı hem küçük hem de yaklaşık olarak aynıdır. Bu nedenle faktör sayısının beş olması uygun görülmüştür.

**Şekil 3.** Yamaç-Birikimi grafiği

Tablo 5. Döndürülmüş faktör bileşen matrisi

	Faktör				
	1	2	3	4	5
25. Madde	,822				
34. Madde	,798				
24. Madde	,790				
23. Madde	,717				
22. Madde	,699				
21. Madde	,659				
33. Madde	,546				
46. Madde		,873			
50. Madde		,869			
44. Madde		,861			
48. Madde		,831			
49. Madde		,798			
45. Madde		,779			
53. Madde		,742			
47. Madde		,700			
52. Madde		,675			
43. Madde		,659			
38. Madde			,890		
39. Madde			,871		
40. Madde			,822		
37. Madde			,690		
41. Madde			,615		
55. Madde				-,863	
10. Madde				-,740	
11. Madde				-,739	
6. Madde					,720
5. Madde					,701
2. Madde					,669
1. Madde					,653
4. Madde					,644
3. Madde					,641
7. Madde					,608

Ortaya çıkan faktörlere ait maddeler ve bunların faktöre yükleri Tablo 5.'de verilmiştir. Faktör yükleri ,890-,546 arasında değişmektedir.

55 madde ile başlatılan analiz, dördüncü ve sonuncu döndürme işlemi sonrası yukarıda verilen maddelerin çıkarılması sonrasında 32 maddeye indirilmiş ve veri toplama aracının nihai hali ortaya çıkarılmıştır. Ölçme aracında beş faktöre giren maddeler incelenmiş ve maddelerin içerdiği anlamlara göre faktörler aşağıdaki gibi isimlendirilmiştir.

1. faktör raporlamada etkinlik olarak isimlendirilmiştir. Faktör yük değerleri incelendiğinde en düşük faktör yükünün ,546 ile “Çalıştığım kurum, çalışanlarını emniyet sorunlarını, tehlikeleri veya olayları tanımlama ve raporlamaya teşvik eder” maddesinin oluşturduğu görülmektedir. En yüksek faktör yükü ise ,822 ile “Çalıştığım kurumun, emniyetsiz olayların takip edilmesi sonucunda uygun değişiklikleri öğrenip yapacağına inanıyorum” maddesidir. TCDD Taşımacılık A.Ş.’de tren kullanan makinistlerin emniyet kültürüne yönelik raporlamada etkinlik algısı toplam

varyansı %36,410 oranında açıklamakta ve bu oran beş faktör içinde emniyet kültürünü açıklayan en güçlü faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Tüm maddeler içinde en yüksek madde yükü alan “Çalıştığım kurumun, emniyetsiz olayların takip edilmesi sonucunda uygun değişiklikleri öğrenip yapacağına inanıyorum” ifadesi ya da “Çalıştığım kurum çalışmayan bir emniyet sistemini bildirdiğimde derhal sorun ile ilgili aksiyon alır” ifadeleri makinistlerin emniyetsiz durumlara yönelik yaptıkları raporların dikkate alınma algısını göstermektedir. Bu faktör altında toplanan 7 madde Tablo 6.’da görülmektedir.

Tablo 6. 1. faktör: raporlamada etkinlik

Maddeler	Faktör Yüğü	Ortak Varyans
25. Çalıştığım kurumun, emniyetsiz olayların takip edilmesi sonucunda uygun değişiklikleri öğrenip yapacağına inanıyorum.	,822	,797
34. Çalıştığım kurum çalışmayan bir emniyet sistemini bildirdiğimde derhal sorun ile ilgili aksiyon alır.	,798	,658
24. Eğer bir emniyet sorununu, tehlikeyi veya olayı rapor edersem zamanında işlem yapılacağından eminim.	,790	,754
23. Çalıştığım kurumun emniyet raporlarını değerlendirme yönteminden memnunum.	,717	,723
22. Çalıştığım kurumda, emniyeti arttırmak için öneride bulunursam dikkate alınacağına inanıyorum.	,699	,729
21. Emniyet ile ilgili bir sorunu yönetime bildirdiğimde, yönetimden bildirdiğim sorun ile ilgili geri bildirim alırım	,659	,628
33. Çalıştığım kurum, çalışanlarını emniyet sorunlarını, tehlikeleri veya olayları tanımlama ve raporlamaya teşvik eder.	,546	,531

2. faktör işbirliği ve gönüllü katılım olarak isimlendirilmiştir. Faktör yük değerleri incelendiğinde en düşük faktör yükünün ,659 ile “İş arkadaşlarım, riskli veya emniyetsiz koşullar altında çalıştıkları zaman duruma müdahil olarak onları uyarır, yardım ederim” maddesinin oluşturduğu görülmektedir. En yüksek faktör yükü ise ,873 ile “Ekibin diğer üyelerine, emniyetli çalışma uygulamalarını öğrenmeleri için yardım ederim” maddesidir. Toplam varyansın %21,157’sini açıklayarak varyans açıklamaya ikinci olarak katkıda bulunan işbirliği ve gönüllü katılım boyutuna bakıldığında “Ekibin diğer üyelerine, emniyetli çalışma uygulamalarını öğrenmeleri için yardım ederim” maddesinin en yüksek madde yükünü aldığı görülmektedir. Yine “Emniyet konularına katılım göstermeleri için diğer makinistlerle konuşur ve onları cesaretlendiririm” maddesinin yüksek madde yükü aldığı görülmektedir. Bu durum makinistlerin birbiriyle yardımlaşma dayanışma içinde oldukları, emniyet hususunda birbirlerini motive ettikleri, birbirlerini takip edip uyardıklarını göstermektedir. Faktör Tablo 7.’de görüldüğü üzere 10 maddeden oluşmaktadır.

Tablo 7. 2. faktör: iş birliği ve gönüllü katılım

Maddeler	Faktör Yüğü	Ortak Varyans
46. Ekibin diğer üyelerine, emniyetli çalışma uygulamalarını öğrenmeleri için yardım ederim.	,873	,708
50. Emniyet konularına katılım göstermeleri için diğer makinistlerle konuşur ve onları cesaretlendiririm.	,869	,766
44. Ekibin yeni üyelerine emniyet prosedürlerinin öğretilmesine yardım ederim.	,861	,770
48. İş arkadaşlarıma trenlerin emniyetli seyri ile ilgili tavsiyelerde bulunurum.	,831	,765
49. Başkaları katılmasa bile emniyet konuları ile ilgili görüşlerimi ifade ederim.	,798	,747
45. Ekibimin daha emniyetli çalışmasına yardım etmek için emniyetle ilgili faaliyetlere katılırım.	,779	,708

53. Ekibin yeni üyelerini, emniyetli çalıştıklarından emin olmak için gözlemlerim.	,742	,540
47. Kurum tarafından yapılan seminer, brifing ve eğitimlerde emniyet ile ilgili endişelerimi dile getiririm.	,700	,549
52. Beraber çalıştığım makinist arkadaşlarıma emniyetli çalışma prosedürlerini takip etmelerini söylerim.	,675	,535
43. İş arkadaşlarım, riskli veya emniyetsiz koşullar altında çalıştıkları zaman duruma müdahil olarak onları uyarır, yardım ederim.	,659	,512

4. faktör bireysel sorumluluk olarak isimlendirilmiştir. En düşük faktör yük değerinin ,615 ile “Trenlerin seyir emniyetinin artırılması için ilave çaba gösteririm” maddesinin olduğu görülmektedir. En yüksek faktör yük değerinin ise ,890 ile “İşimi yaparken kullanılan emniyetle ilgili tüm ekipmanların (ATS, ERTMS, totman) çalışır durumda olmasını sağlarım” maddesi oluşturmaktadır. Bireysel sorumluluk toplam varyansın %6,648’sini açıklamaktadır. Tüm maddeler içinde en yüksek madde yükünü alan faktörlerden olan “İşimi yaparken kullanılan emniyetle ilgili tüm ekipmanların (ATS, ERTMS, totman) çalışır durumda olmasını sağlarım” ve “İşimi en yüksek emniyet düzeyini sağlayarak yaparım” maddeleri makinistlerin emniyet hususunda bireysel sorumluluklarının farkındalığını göstermektedir. Bu faktör Tablo 8.’deki gibi 5 maddeden oluşmaktadır.

Tablo 8. 3. faktör: bireysel sorumluluk

Maddeler	Faktör Yüğü	Ortak Varyans
38. İşimi yaparken kullanılan emniyetle ilgili tüm ekipmanların (ATS, ERTMS, totman) çalışır durumda olmasını sağlarım.	,890	,726
39. İşimi en yüksek emniyet düzeyini sağlayarak yaparım.	,871	,797
40. İşimi yaparken doğru emniyet prosedürlerini uygulayım.	,822	,740
37. İşimi emniyetli bir şekilde yaparım.	,690	,609
41. Trenlerin seyir emniyetinin artırılması için ilave çaba gösteririm.	,615	,571

4. faktör prosedürel liderlik olarak isimlendirilmiştir. Faktör yük değerlerine bakıldığında en düşük faktör yükünün ,739 ile “Çalıştığım kurumdaki yöneticiler, çalışanlara emniyet hedeflerini kesin olarak gerçekleştirmeleri talimatı verir” maddesi oluştururken; en yüksek faktör yükünün ,863 ile “Çalıştığım kurumdaki yöneticiler, çalışanlarından emniyet yönetimi düzenlemelerine uymalarını talep eder” maddesi oluşturmaktadır. Prosedürel liderlik algısı toplam varyansın %4,904’ünü açıklamaktadır. Tüm maddeler içinde en yüksek madde yükünü alan “Çalıştığım kurumdaki yöneticiler, çalışanlarından emniyet yönetimi düzenlemelerine uymalarını talep eder” ya da “Çalıştığım kurumdaki yöneticiler, çalışanlara emniyet hedeflerini kesin olarak gerçekleştirmeleri talimatı verir” maddeleri yöneticilerin arzusunun, isteğini, talebini ve beklentisini göstermektedir. Faktör Tablo 9.’dan da görüldüğü üzere 3 maddeden oluşmaktadır.

Tablo 9. 4. faktör: prosedürel liderlik

Maddeler	Faktör Yüğü	Ortak Varyans
55. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler, çalışanlarından emniyet yönetimi düzenlemelerine uymalarını talep eder.	-,863	,734
10. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler, çalışanlara emniyet hedeflerini kesin olarak gerçekleştirmeleri talimatı verir.	-,740	,720
11. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler, çalışanlardan emniyet kusurlarını sürekli iyileştirmelerini talep eder.	-,739	,654

Son olarak 5. faktör yöneticilerin desteği olarak isimlendirilmiştir. Faktör yük değerleri incelendiğinde en düşük faktör yükünün ,608 ile “Çalıştığım kurumdaki yöneticiler emniyetin artırılması için çalışanlardan gelen önerileri kabul eder.” maddesinin oluşturduğu görülmektedir. En yüksek faktör yükü ise ,720 ile “Çalıştığım kurumdaki yöneticiler uyumlu bir grup ortamı

oluşturur.” maddesidir. Yöneticilerin desteği algısı toplam varyansın %3,459’ unu açıklamaktadır. Söz konusu boyuta bakıldığında “Çalıştığım kurumdaki yöneticiler uyumlu bir grup ortamı oluşturur.” maddesinin en yüksek madde yükünü aldığı görülmektedir. Yine “Çalıştığım kurumdaki yöneticiler emniyet ile ilgili kararların alınması süreçlerine çalışanları da dahil eder.” maddesinin yüksek madde yükü aldığı görülmektedir. Bu durum makinistlerin yöneticileriyle dayanışma içinde olduklarını göstermektedir. Faktör Tablo 10.’da görüldüğü üzere 7 maddeden oluşmaktadır.

Tablo 10. 5. faktör: yöneticilerin desteği

Maddeler	Faktör Yüğü	Ortak Varyans
6. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler uyumlu bir grup ortamı oluşturur.	,720	,666
5. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler emniyet ile ilgili kararların alınması süreçlerine çalışanları da dahil eder.	,701	,611
2. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler emniyet kurallarına kendileri de uyarlar.	,669	,681
1. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler emniyet konularını öncelikli olarak ele alır.	,653	,656
4. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler emniyet kavramını net bir şekilde açıklar.	,644	,660
3. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler emniyetin önemini anlamaları için çalışanlara yardım eder.	,641	,764
7. Çalıştığım kurumdaki yöneticiler emniyetin artırılması için çalışanlardan gelen önerileri kabul eder.	,608	,684

Faktör yük değerleri büyüklük açısından incelendiğinde en düşük değer ,546 ve en yüksek değer ,890 olduğu göz önüne alındığında, faktörlerin yük değerlerini iyiden mükemmel doğru nitelendirmek mümkündür.

2.2. Doğrulayıcı faktör analizi

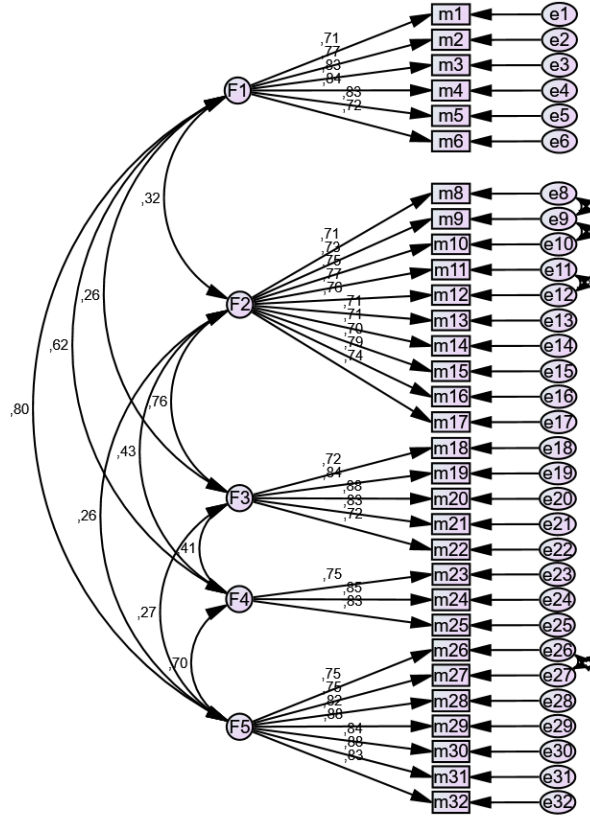
Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA), gizli değişken ve gözlenen değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemeye yarayan Yapısal Eşitlik Modellemesi (YEM) türüdür. Açıklayıcı Faktör Analizi sonucunda elde edilen ölçme aracının yapısı ve faktörler arasındaki ilişkilerin doğruluğunu test etmek için Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) yapılmıştır. AMOS (Analysis of Moment Structures) programında Maksimum Olabilirlik (Maximum Likelihood - ML) Tahmin Yöntemi ile Doğrulayıcı Faktör Analizi uygulanmıştır. Elde edilen uyum iyiliği indekslerine göre model kabul edilecek ya da reddedilecektir.

Andrew vd. [21], her madde için örneklem sayısının 20 olması gerektiğini, ancak her madde için 10 örneklemin yeterli olduğunu belirtmiştir. Kline’a göre [22], örneklem miktarı madde sayısının 10 katı olmalı, bu miktar 200’den az olmamalıdır. Doğrulayıcı Faktör Analizi için örneklem miktarı 652’dir. Açıklayıcı faktör analizi için kullanılan 250 örneklem Doğrulayıcı Faktör Analizinde kullanılmamıştır.

Model kurulup test edildikten sonra AMOS 24.0 programı tarafından bazı düzeltmeler önerilmiştir. Kurulan modeli iyileştirmek amacıyla bu düzeltmelerin bazıları yapılmıştır. Teoriye uygun olmayan 7. madde silinmiştir. e26-e27, e9-e10, e11-e12 ve e8-e9’un hata varyansları birleştirilmiş, kovaryans çizilmiştir. Düzeltme sonrası beş faktörlü yapı tekrar test edilmiştir. Elde edilen uyum indeksleri sonucu kabul edilen ölçüm modeli Şekil 4.’de görülmektedir.

Doğrulayıcı faktör analizinde modelin uygunluğunu değerlendirmek için çeşitli uyum iyiliği indeksleri kullanılmaktadır. Yapısal eşitlik modeli araştırmalarında kullanılan uyum indekslerine ilişkin mükemmel ve kabul edilebilir uyum ölçütleri Tablo 11.’de görüldüğü gibidir [23], [24], [25]. Tablo 11.’de karşılaştırmak için doğrulayıcı faktör analizi sonucu elde edilen uyum iyiliği değerleri de verilmiştir.

χ^2 (Ki-kare) değerinin sd (Serbestlik Derecesi) değerine bölünmesiyle elde edilen χ^2/sd değeri, üç ve daha az ise kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. χ^2/sd değerinin 2,73 olduğu görülmektedir. Bu değer kabul edilebilir uyuma işaret etmektedir. RMSEA (Yaklaşık Hataların Ortalama Karekökü) için 0,05 ve altında bir değer iyi uyum iyiliği göstergesi olarak görülmektedir. RMSEA değerine bakıldığında 0,05 değerindedir. Çalışmamızda CFI (Karşılaştırmalı Uyum İndeksi), NFI (Normlaştırılmış Uyum İndeksi) ve AGFI (Düzeltilmiş Uyum İyiliği İndeksi) değerleri sırasıyla 0,95, 0,92 ve 0,88 bulunmuştur. Bu değerler sırasıyla iyi uyum, kabul edilebilir uyum ve kabul edilebilir uyuma karşılık gelmektedir. GFI (Uyum İyiliği İndeksi) için kabul edilebilir değer ise $>0,90$ 'dır. Bizim çalışmamızda bu değer 0,90'dır.



CMIN/df:2,725; AGFI:0,875; GFI:0,895; NFI:0,923; CFI:0,950; IFI:0,950; TLI:0,944; RMSEA:0,051

Şekil 4. Tren makinistlerinde emniyet kültürü algısı ölçüm modeli (F1: Raporlamada Etkinlik, F2: İş birliği ve Gönüllü Katılım, F3: Bireysel Sorumluluk, F4: Prosedürel Liderlik, F5: Yöneticilerin Desteği)

Böylelikle tren makinistlerinde emniyet kültürü algısını ölçmek için geliştirilen beş faktörlü ölçüm modelinin yapı geçerliliğinin doğrulandığını söylemek mümkündür.

Tablo 11. DFA sonucunda ulaşılan uyum iyiliği değerleri ve referans aralıkları

Uyum İndeksleri	İyi Uyum	Kabul Edilebilir Uyum	Ulaşılan Değerler
χ^2/sd	$0 \leq \chi^2/sd \leq 2$	$2 < \chi^2/sd \leq 3$	2,73
RMSEA	$0 \leq RMSEA \leq 0,05$	$0,05 < RMSEA < 0,08$	0,05
CFI	$0,95 \leq CFI \leq 1,00$	$0,90 \leq CFI < 0,95$	0,95
NFI	$0,95 \leq NFI \leq 1,00$	$0,90 \leq NFI < 0,95$	0,92
AGFI	$0,90 \leq AGFI \leq 1,00$	$0,85 \leq AGFI < 0,90$	0,88
GFI	$0,95 \leq GFI \leq 1,00$	$0,90 \leq GFI < 0,95$	0,90

3. Sonuç

Bu çalışma, demiryolu endüstrisinde çalışan makinistlerin emniyete dair tutumlarını inceleyerek ölçülebilmesini sağlayacak pratik bir araç ortaya çıkarmak amacıyla yapılmıştır. Ayrıca emniyet kültürünü etkileyen alt boyutlar belirlenmiştir. Çalışmada geliştirilen ölçme aracının tüm geliştirilme aşamaları etraflıca tanıtılmıştır. Çalışmanın amacına yönelik olarak; literatür taraması, uzman görüşleri ve ön çalışmalar yoluyla maddeler belirlenmiş ve ölçme aracı maddeleri oluşturulmuştur. Ardından, ölçme aracının psikometrik özelliklerini değerlendirmek için bir pilot çalışma yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir.

Çalışmada demiryolu taşımacılığında emniyetin belki de en önemli bileşenlerinden biri olan tren makinistlerinin emniyet kültürüne yönelik algılarını ölçmek amacıyla 5 alt boyutlu ve 31 maddelik bir ölçme aracı geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda ölçme aracının bu türde çalışmalarda kullanılmak üzere yeterli psikometrik özellikleri taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Emniyet kültürü terimi 1987 yılında Çernobil felaketiyle ilgili OECD Nükleer Ajansının raporunda sıkça yer etmesiyle literatürde yer almaya başlayarak kısa zamanda birçok endüstride emniyet kültürünün ölçülmesine dair çalışmalar yapılmıştır. Yapılan literatür taramasında; demiryolu endüstrisinde emniyet kültürünün ölçülmesine dair Türkiye’de henüz hiçbir çalışma yapılmadığı, dünya çapında ise çok kısıtlı çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bunun yanında, çalışma biçimi ve sektör yapısı açısından demiryolu sektörü ile benzerlikler gösteren havacılık sektöründe emniyet kültürünün ölçülmesine dair birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan AFA sonucunda kalan 32 maddenin toplam varyansın %72,579’unu açıkladığı ve beş alt boyutta toplandığı tespit edilmiştir. AFA sonucunda ortaya çıkan 5 faktör raporlamada etkinlik, iş birliği ve gönüllü katılım, bireysel sorumluluk ve prosedürel liderlik olarak isimlendirilmiştir. Ortaya çıkan sonuçların havacılık endüstrisinde kabul görmüş ölççeklerle uyumlu olduğu görülmektedir. Aktaş’ın [11] havacılık endüstrisinde hava aracı bakım işlerinde çalışan teknisyenler üzerinde gerçekleştirdiği bir çalışmada; emniyet liderliği ölçeğinin 2 alt boyutu ve toplam varyansının %64,142, emniyet iklimi ölçeğinin 4 alt boyutu ve toplam varyansının %67,75, emniyet vatandaşlığı ölçeğinin 3 alt boyutu ve toplam varyansının %64,481 olarak bulunmuştur. Söz konusu çalışmada ortaya konan sonuçların havacılık endüstrisinde ortaya konulmuş birçok ölçek çalışması ile tutarlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın sonuçları, demiryollarında çalışan makinistlerin emniyet algısını ölçmek için geliştirilen ölçme aracının güvenilir ve geçerli olduğunu göstermektedir. Ölçme aracının faktör yapısı doğrulayıcı faktör analiziyle test edilmiş ve uyumun yüksek olduğu görülmüştür. Bu bulgular, ölçme aracının güvenilirliğini ve geçerliğini desteklemekte ve demiryolu şirketlerinin makinistlerin emniyet algısını değerlendirmek için bu ölçme aracını kullanabileceklerini göstermektedir. Bu ölçme aracının demiryollarında çalışan makinistlerin emniyet algısını ölçmek için birçok uygulama potansiyeli bulunmaktadır. Örneğin, demiryolu şirketlerinin, makinistlerin eğitim ihtiyaçlarını belirlemek, emniyet kültürünü geliştirmek ve risk yönetimi stratejilerini planlamak için bu ölçme aracını kullanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, demiryolu endüstrisindeki emniyet performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için bu ölçme aracını kullanmak, iyileştirme süreçlerini destekleyebilecektir. Bununla birlikte, bu çalışma bazı sınırlamalarla karşılaşmıştır. Ölçme aracının geliştirilmesi ve test edilmesi için sınırlı bir örneklem kullanılmıştır ve bu nedenle sonuçların genelleştirilebilir olmasının sınırlı kalabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, ölçme aracının geçerliğini artırmak için gelecekte daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Örneğin, ölçme aracının kriter geçerliği daha fazla kanıtlanabilir ve farklı demiryolu şirketlerindeki makinistlerle yapılan çalışmalarla ölçme aracının uygunluğu doğrulanabilir.

Demiryollarında çalışan makinistlerin emniyet algısını ölçmek için geliştirilen bu ölçme aracı, güvenilir ve geçerli bir araç olarak kullanılabilir. Bu ölçme aracı, demiryolu şirketlerinin makinistlerin emniyet algısını değerlendirmek ve emniyet performansını iyileştirmesi için önemli bir araç olabilir. Gelecekte, bu ölçme aracının daha geniş örneklem gruplarıyla test edilmesi ve geçerliğinin daha fazla kanıtlanması önerilmektedir. Bugün dünyada birçok otorite tarafından demiryolu taşımacılığı geleceğin ulaşım modu olarak görülmektedir. Özellikle hızlı trenlerin hayatımıza girmesiyle birlikte demiryolu yatırımları artarak devam etmektedir. Bu nedenle demiryolu kazalarının önlenmesi, emniyetli bir demiryolu taşımacılığının sağlanması için otoriteler birçok çalışma yürütmektedir. Özellikle Avrupa Birliği tarafından trenlerin tüm Avrupa demiryolu ağına serbest dolaşımını sağlayacak düzenlemeler yapılmaktadır. Serbest dolaşımın sağlanabilmesi için ortak emniyet metotları geliştirilmekte, demiryolu şirketlerinin emniyetli taşımacılığı sağlamasına yönelik düzenlemeler yapılmaktadır. Bu doğrultuda tüm demiryolu altyapı ve taşımacılık şirketleri tarafından bir emniyet yönetim sistemi oluşturma zorunluluğu getirilmiştir.

Emniyet yönetim sistemi; emniyetin sağlanmasına yönelik sistemsal bir yaklaşım sunmakta, gerekli prosedür ve talimatların oluşturulmasını sağlamaktadır. Ancak organizasyonlar tarafından kabul gören davranış kalıpları ve tutumlar olarak ifade edilen örgüt kültürü kazaların önlenmesi için emniyetli bir demiryolu taşımacılığında en önemli faktörlerdendir. Bu nedenle organizasyonlarda pozitif emniyet kültürünün oluşturulması arzu edilen bir demiryolu taşımacılığı için gerek şarttır. Pozitif bir emniyet kültürünün oluşturulabilmesinin emniyet kültürü oluşturma metodolojisinin özellikle yöneticiler tarafından sahiplenerek, taviz vermeden sürdürülmesi ile sağlanabileceği bir gerçektir. Bu nedenle çalışanların emniyete dair algılarının nicel olarak ifade edilebilmesi ile organizasyonların doğru aksiyonlar geliştirebileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 22LÖT200 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] T. Farrington-Darby, L. Pickup, and John. R. Wilson, "Safety culture in railway maintenance," *Saf Sci*, vol. 43, no. 1, pp. 39–60, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.ssci.2004.09.003.
- [2] P. J. Sherman and R. L. Helmreich, "Attitudes toward automation-the effect of national culture," in *International Symposium on Aviation Psychology, 8 th*, Columbus, 1995, pp. 682–687.
- [3] E. Union Agency For Railways, "Report on Railway Safety and Interoperability in the EU - 2020", doi: 10.2821/469518.
- [4] C. Uzuner, "AB ve Türkiye’de emniyet yönetim sisteminin ortaya çıkması, gelişme süreci ve geleceği," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 1, pp. 91–99, Dec. 2014.
- [5] N. H. Yılmaz, "Havacılıkta emniyet yönetim sistemi ve emniyet kültürü, havacılık çalışanlarında emniyet kültürü ölçümü," 2019.
- [6] M. Kaewsai, "Significant Accidents 2021 Public Report Special focus on the COVID 19 pandemic," 2022.
- [7] N. Karasar, *Araştırmalarda Rapor Hazırlama*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 2009.
- [8] G. Sart, "Bireysel girişimcilik eğilimi ölçeğinin geliştirilmesi: geçerlik ve güvenilirlik çalışması," *International Journal of Applied Economic and Finance Studies*, vol. 5, no. 1, 2020.
- [9] İ. Ünder, "Havacılıkta örgütsel sessizlik: Havaaracı bakım personelinin raporlamada bulunmamalarının nedenleri üzerine bir araştırma," 2016.
- [10] A. Güler and Y. Günel, "Kamu kurumlarında sanal kayıtlara yönelik bir ölçek geliştirme çalışması," *İşletme Bilimi Dergisi*, vol. 10, no. 2, pp. 247–274, Aug. 2022, doi: 10.22139/jobs.1147063.
- [11] E. Aktaş, "Hava aracı bakım teknisyenlerinin emniyetli davranışlarını etkileyen unsurların incelenmesi: Türkiye sivil havacılık sektöründe bir uygulama," Doktora tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 2019.
- [12] R. Alpar, *Uygulamalı çok değişkenli istatistiksel yöntemler*. Ankara: Detay Yayıncılık, 2017.

- [13] A. V. Crawford *et al.*, “Evaluation of parallel analysis methods for determining the number of factors,” vol. 70, no. 6, pp. 885–901, Sep. 2010, doi: 10.1177/0013164410379332.
- [14] J. C. F. De Winter and D. Dodou, “Common factor analysis versus principal component analysis: a comparison of loadings by means of Ssimulations,” *Commun Stat Simul Comput*, vol. 45, no. 1, pp. 299–321, Jan. 2016, doi: 10.1080/03610918.2013.862274.
- [15] L. E. Garrido, F. J. Abad, and V. Ponsoda, “Performance of velicer’s minimum average partial factor retention method with categorical variables,” *Educ Psychol Meas*, vol. 71, no. 3, pp. 551–570, 2011, doi: 10.1177/0013164410389489.
- [16] K. Özdamar, *Eğitim, sağlık ve davranış bilimlerinde ölçek ve test geliştirme yapısal eşitlik modelleri; IBM SPSS, IBM SPSS AMOS ve MINTAB uygulamalı*. Nisan Kitabevi, 2017.
- [17] Ö. Çokluk, G. Şekercioğlu, and Ş. Büyüköztürk, *Sosyal bilimler için çok değişkenli istatistik: SPSS ve LISREL uygulamaları*. Ankara: Pegem Akademi, 2014.
- [18] H. F. Kaiser, “A second generation little jiffy,” *Psychometrika*, vol. 35, no. 4, pp. 401–415, Dec. 1970, doi: 10.1007/BF02291817.
- [19] M. M. Yaşoğlu, “Sosyal bilimlerde faktör analizi ve geçerlilik: keşfedici ve doğrulayıcı faktör analizlerinin kullanılması,” *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, vol. 46, pp. 74–85, Nov. 2017.
- [20] B. G. Tabachnick and L. S. Fidell, *Using multivariate statistics*. Pearson, 2013.
- [21] D. P. S. Andrew, P. M. Pedersen, and C. D. McEvoy, *Research methods and design in sport management*. Human Kinetics, 2011. doi: 10.5040/9781492596417.
- [22] R. B. Kline, *Principles and practice of structural equation modeling*. New York: Guilford Press, 2005.
- [23] Ö. F. Şimşek, *Yapısal eşitlik modellemesine giriş - temel ilkeler ve LISREL uygulamaları*. Ankara: Ekinoks, 2007.
- [24] D. Hooper, J. Coughlan, and M. R. Mullen, “Structural equation modelling: guidelines for determining model fit,” *Electronic Journal of Business Research Methods*, 2008.
- [25] K. Schermelleh-Engel, H. Moosbrugger, and H. Müller, “Evaluating the fit of structural equation models: tests of significance and descriptive goodness-of-fit measures,” *Methods of Psychological Research*, vol. 8, no. 2, pp. 23–74, 2003.

Özgeçmiş



Kamil ESEN

1998 yılında TCDD Meslek Lisesi Cer bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Cumhuriyet Üniv Makine Bölümünden, 2009 yılında Anadolu Üniversitesi İktisat Bölümünden, 2017 yılında İstanbul Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi Raylı sistemler Mühendisliği Yüksek Lisans Bölümünde eğitimini sürdürmektedir. 1998 yılında iş hayatına Sivas Divriği’de makinist yardımcısı olarak başladı, 2011 yılında TCDD Eskişehir Eğitim Merkezine Öğretmen olarak atandı, 2021 yılın da aynı işyerinde Mühendis unvanına geçti. C sınıfı iş güvenliği uzmanı belgesine sahip olup, halen Eskişehir Demiryolu Eğitim ve Sınav Merkezinde kalite yöneticisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: kamilesen26@gmail.com



Kadir AKSAY

Lisans Eğitimini Gazi Üniversitesi İşletme Bölümü’nde, yüksek lisans eğitimini Anadolu Üniversitesi İşletme Anabilim Dalı Yönetim ve Organizasyon Bilim Dalı’nda ve doktora eğitimini Selçuk Üniversitesi İşletme Anabilim Dalı’nda tamamlamıştır. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi Ulaştırma Bilimleri Enstitüsü ve Ulaştırma Meslek Yüksekokulu Yönetim ve Organizasyon Bölümü’nde öğretim üyesi olarak çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: kadiraksay@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

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Kamil ESEN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Kadir AKSAY: Görselleştirme, İnceleme. Ömür AKBAYIR: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama.