



Yeni Yeşil-Travers Modelinin B70 Tipi Öngerilmeli Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN*¹, Bekir AKTAŞ²

¹ TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

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

*ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 22.04.2022, Kabul/Accepted: 13.08.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Günümüzün yüksek hız ve tonajlı, yoğun işletim şartları altında demiryolu yapı elemanları sıklıkla rezonans hasarlarına uğramakta ve fiili servis ömürleri kısalmaktadır. Ayrıca dünyada mevcut çelik donatılı, öngerilmeli veya öngerilmemiş beton travers modelleri, öngerilme işlemi veya etriye kullanım zorunluluğu getirmektedir. Bunun dışında öngerilmeli tipler, üretimin hemen ertesi gün gerdirme kuvvetine maruz kalacağından, yüksek erken dayanımlı beton ve çevresel zararı yüksek çimento kullanım zorunluluğu da getirmektedir. Tüm bu sebeplerle önemli düzeyde mali ve çevresel zararlar doğmaktadır. Bu çalışmada, demiryolu traverslerinin sönümlenme oranında ve karbon emisyonunda iyileştirme sağlanması için, ileri fonksiyonel bir malzeme olan yerli lamine karbon-fiber takviyeli poliüretan plakalar ve düşük dozajlı CEM II sınıfı çimento kullanılarak yeşil travers olarak adlandırılan yeni bir travers modeli araştırılmıştır. Çalışma sonunda yeni tip traverslerde kullanılan beton hammaddenin karbon emisyonunun yaklaşık %50 daha düşük olduğu, standartlarda istenilen ray mesnedinde statik yüklemeli pozitif moment tayini test şartlarını sağladığı ve 1., 2. ve 3. dikey rezonans frekanslarına ait transfer fonksiyonu zirve değerlerinde sırasıyla %87, %37 ve %36 oranında düşüş elde edildiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu traversi, Rezonans frekansı, Sönümlenme oranı, Karbon fiber takviyeli polimer

Comparative Investigation of New Green Sleeper Model with B70 Type Prestressed Sleepers

Abstract: Under today's high-speed, high tonnage, and intensive operating conditions, railway structural elements are frequently subject to resonance damage, and their actual service life is shortened. In addition, steel-reinforced, prestressed or non-prestressed concrete sleeper models available in the world require a prestressing process or the use of stirrup reinforcements. Apart from this, since prestressed types will be exposed to prestressing force shortly after the production, it also requires the use of high early strength concrete and cement with high environmental damage. All these reasons cause significant financial and environmental damage. In this study, a new sleeper model called green sleeper was investigated by using domestic laminated carbon-fiber-reinforced polyurethane plates, which is an advanced functional material, and low dosage CEM II class cement, to improve the damping ratio and carbon emission of railway sleepers. At the end of the study, it was determined that the carbon emission of the concrete raw material used in the new type of sleepers was approximately 50% lower and that the rail seat static positive moment determination test results were above the specification limits, and provide 87%, 37% and 36% reduction in peak values of transfer functions at 1st, 2nd, and 3rd resonance frequencies, respectively.

Keywords: Railway sleeper, Resonance frequency, Damping ratio, Carbon fiber reinforced polymer

1. Giriş

Bilindiği üzere, herhangi bir sisteme, periyodik bir etki uygulandığında, bu sistemde çeşitli salınımlar (titreşimler) meydana gelmektedir. Meydana gelen bu titreşimler esnasında, sistem elemanlarının normal durumuna göre yaptığı yer değiştirmelerin en yüksek değerine, genlik denilmektedir. Eğer sistemde meydana gelen bu titreşimlerin sıklığı (frekansı) artarak, sistemin

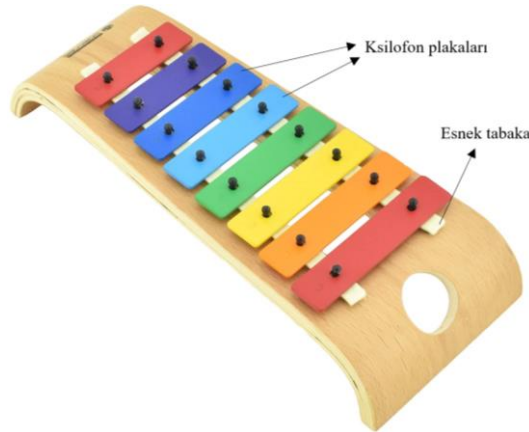
Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, "Yeni yeşil-travers modelinin B70 tipi öngerilmeli traverslerle karşılaştırmalı incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 1-13, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1107683

doğal frekansına eşit olursa, sistemin genliği, sonsuza dek artma eğilimi gösterir ki; bu olaya rezonans denilmektedir [1]. Burada belirtilen, “genliğin sonsuza gitmesi eğilimi” sistemlerin veya komponentlerin erken yorulmasıyla zaman içerisinde deforme olmalarına neden olabileceği gibi, rezonans etkisinin uzun süre devam etmesi halinde, yıkıcı sonuçlara da neden olabilmektedir. Bu konuda oldukça yaygın bilinen bir örnek; 1940 yılında ABD'nin Washington eyaletinde yapılmış olan Tacoma Asma Köprüsü'nün ulaşımına açıldıktan kısa bir süre sonra Şekil 1'de [2] görüldüğü üzere, rüzgârın etkisiyle yıkılmasıdır.



Şekil 1. Tacoma Asma Köprüsü'nün rezonans etkisiyle yıkılması [2]

Rezonans olayı, müzik, akustik, mekanik, elektromanyetik, nükleer manyetik, elektron spin ve kuantum dalga fonksiyonu rezonansları gibi bütün titreşim tipleri ya da dalgalarında görülmektedir [1]. Görüldüğü üzere rezonans olayı, titreşimlere maruz kalan hiçbir mühendislik yapısının dizayn sürecinde ihmal edilmemesi gereken bir unsurdur. Bu çalışma kapsamında ele alınan demiryolu ulaşım sistemi ise, yüksek tonaj ve hıza sahip taşıtların metal tekerlerinin metal raylar üzerinde hareket etmesi itibarıyla yoğun bir titreşim kaynağıdır. Dolayısıyla demiryolu bileşenlerinin (raylar, traversler vb.) dizayn sürecinde, rezonans etkisinin modal test ve analiz yöntemleriyle incelenmesi mutlak bir gerekliliktir. Bu bağlamda, Şekil 2'de görülen ksilofon enstrümanı, gerek rezonans direncinin ölçüldüğü modal testlerin, gerekse demiryollarında meydana gelen rezonans olaylarının kolayca izah edilmesini sağladığı düşünülmüşdür.



Şekil 2. Tipik bir ksilofon enstrümanının bileşenleri

Ksilofonlar genel olarak, çeşitli boylardaki plakaların boyutlarına göre sıralanarak, serbest (free-free modda) salınım yapabilecekleri esnek bir tabaka üzerine konumlandırılmasıyla elde edilmektedir. Bu plakalara, küre uçlu tokmaklarla, tek-tok darbeler uygulanırsa, her defasında aynı frekansların ağırlıklı olarak işitildiği görülecektir. Bu frekanslar ise, darbe uygulanan plakanın doğal frekanslarına denk gelmektedir. Görüldüğü üzere, bu durum, modal testlerde, analiz yapılacak yapı veya yapı bileşenlerinin öncelikle serbest modda salınım yapmasının temin edilmesine benzemektedir ve modal çekiçle darbe uygulanması gibi tek ve tok darbeler uygulanmasına çalışılmaktadır. Bu durumun kolayca gözlemlenebilmesi mümkündür. Şöyle ki, cep telefonlarına da yüklenebilecek basit bir ses analizörü uygulaması ile söz konusu plakalara

tek ve tok darbeler uygulanması akabinde ortaya çıkan ses dalgalarının spektrum analizi yapılabilir. Bu şekilde, aynı plakaya farklı şiddetlerde darbeler uygulandığında, her defasında aynı frekansların zirve değerlere ulaştığı görülebilir. Spektrum eğrilerindeki pik değerleri, söz konusu plakanın rezonans frekanslarını göstermektedir. Dolayısıyla farklı boydaki plakalara darbe uygulandığında, farklı farklı rezonans frekansları tahrik edilerek, farklı notalar elde edilmektedir. Ksilofon üzerindeki kısa plakalara darbe uygulanması halinde daha tiz ve yüksek frekansta sesler elde edilirken, uzun plakalarda daha kalın ve düşük frekansta sesler elde edilmektedir.

Şekil 2’de verilen ksilofon enstrümanının bileşenleri incelendiğinde, raylı sistem bileşenleriyle genel anlamda benzerliğe sahip olduğu görülecektir. Demiryollarında traversler, balast yatağı üzerinde serbest salınım yapabilmektedir. Bu durum, ksilofon plakalarının altındaki elastik tabaka nedeniyle serbest modda salınım yapabilmesine benzemektedir. Sonuç olarak traversler, üzerlerine etkiyen dinamik tren yükleri nedeniyle, tıpkı ksilofon plakaları gibi rezonansa uğramaktadır. Bu durumun günlük hayatımızda sürekli karşılaştığımız basit bir örneği, Şekil 3’teki gibi kapalı metro istasyonlarında beklerken, tren yaklaştığı zaman duyduğumuz seslerdir. Raylı ulaşım taşıtlarının metal tekerleri, metal raylar üzerinde hareket ederken, titreşimler meydana getirmektedir. Ancak bu iki örnek arasındaki fark, ksilofon plakası titreştirildiğinde tek bir plaka rezonansa uğrarken, demiryollarında bu titreşimler raylar üzerinden metrelerce uzaklığa taşınabilmektedir. Bu yüzden, metro istasyonunda bekleyen yolcular trenin gelişini çok önceden duyabilmektedir. Bu yayılım, raylar üzerindeki titreşimlerin esnek bağlantı malzemeleri (selet vb), traversler ve balast tarafından sönmüldüğü aşamaya kadar devam etmektedir. Balastsız demiryolu hatlarında ise kullanılan döşeme tipi beton plakaların (slab-track) ve daha yumuşak bağlantı aksamının etkisiyle, raylar titreşimleri çok daha büyük uzaklıklara taşımaktadır [3, 4].



Şekil 3. Tipik bir raylı ulaşım sisteminde traverslerin balast tabakası üzerindeki konumu [5]

Demiryolu traversleri, raylardan aldığı yük ve titreşimleri, altyapıya sönmüleyerek aktarmakta ve yol geometrisini korumakta büyük öneme sahiptir [6]. Ancak günümüzde demiryolu traverslerinin tasarımında halen, inşaat mühendisliğinde artık kullanımı oldukça azalan, “izin verilebilir gerilme metodu” kullanılmaktadır. Bu metotta, traverslerin yorulma ve darbe dizayn yükleri belirlenirken, statik hesaplamalarla bulunan teker yükü, gerçek saha ölçümlerine ve titreşim-akustik odaklı analizlere dayanmadan, çeşitli güvenlik katsayılarıyla artırılmaktadır. İyi bir demiryolunda, ray üzerinde pürüzsüz bir yüzey ve taşıt tekerlerinin tam dairesel olması istenmektedir. Bu tarz hatlarda düşük hızlı demiryolu taşıtları genellikle düşük frekanslı titreşimler oluşturmaktadır [7]. Ancak zamanla kaçınılmaz şekilde tekerlerde ve raylarda anormallikler oluşmakta ve daha yüksek frekanslar meydana gelmektedir [8]. Ayrıca günümüzdeki yüksek aks yükleri ve çok yüksek işletme hızları, travers tasarımında dinamik tren yüklerinin yüksek etkili şiddet ve frekans bileşenlerinin ve traverslerin rezonans frekanslarının da göz önünde bulundurulmasını zorunlu hâle getirmiştir [9]. Ray ile tekerlek arasındaki dinamik ilişkiden dolayı ortaya çıkan titreşim frekansları, demiryolu sisteminin öz frekanslarına yaklaştıkça dinamik yükler ve deformasyonlar artmaktadır. Taşıtın tahrik frekanslarından biri veya birkaçı demiryolu sisteminin doğal frekanslarına eşit olduğu zaman rezonans olmakta ve bu

durumda hem taşıtı hem de yolu ciddi ölçüde deforme eden dinamik yükler oluşmaktadır [10]. Traverslerin doğal frekansları ve sönümlenme oranlarının dinamik tren yükleri altındaki davranışlarını oldukça etkilediği konusu geçmişte bilinse de yeterli dikkat gösterilmemiştir [11]. Günümüzde yaygın tespit ve kabule göre; demiryolu traversleri, rezonans frekansına ulaşan yük tahriki ile sıkça deforme olmaktadır [12]. Hatta bazı kaynaklarda, traverslerde hasar oluşmasının en büyük nedeninin traversin rezonans frekansına erişmesinden kaynaklandığının kesin olarak bilindiği ifade edilir hale gelmiştir [13]. Bu durumu destekleyen birçok çalışmadan birinde belirtildiği üzere; travers öz frekansında iki mesnet arasındaki ray eğilme momenti 8-9 kata varan oranlarda artmaktadır ve trenin tahrik frekansı yolun travers öz frekansına ile çakışırsa, rezonans olayı ile birlikte ray eğilme momenti hiç tahmin edilemeyecek kadar büyük düzeylere çıkmaktadır [14]. Ancak günümüzde ar-ge yapılan travers modellerinin çoğunda öngerilmeli üretim felsefesi sabit kalmaktadır. Bu durum travers üretiminde korozif çelik donatılar kullanılması ve meydana gelecek çatlakların öngerilme etkisiyle kapatılarak, bu donatıların korozyondan korunması adına devam ettirilmektedir. Oysaki dikkate alınmayan husus, tıpkı gergin durumdaki bir gitar telinin sönümlenme düzeyinin düşük kalması gibi, öngerilmeli traverslerin de gergin yapıları itibarıyla, dinamik titreşim yükleri altında daha fazla deforme olmasıdır. Nitekim öngerilmeli beton traverslerin özellikle 20-300 Hz frekans aralığındaki dinamik etkilere karşı zayıf kaldığı yaygın bilinen bir gerçektir [9, 16]. Buna rağmen dünyada mevcut standartlarda, kılavuzlarda ve rehberlerde verilen yöntemler, statik tren yüklerinin çeşitli güvenlik katsayılarıyla artırılarak travers mukavemetinin artırılmasına dayanmaktadır. Dolayısıyla bu şekilde geliştirilen traversler, raylı sistemlerde yaşanan rezonans sorunlarını istenildiği düzeyde çözmektedir. Demiryollarında traverslere etkiyen yüklerin tamamına yakını dinamik yüklerdir ve dinamik tren yüklerinin impuls ve frekans bileşenlerine dayalı bir dizayn biçimi, dünyada mevcut standartlarda henüz yer edinmediği için, teknikte uzman kişiler tarafından bu soruna dayalı çözümler de tekniğin bilinen durumundan kolayca açığa çıkarılamamaktadır. Dolayısıyla raylı sistem elemanlarının doğal frekanslarının bir veya birkaçını içeren dinamik tren yükleri etkisiyle; raylar, bağlantı malzemeleri, traversler, balast ve altyapı elemanları sıklıkla rezonansa uğramakta ve rezonans önleme kabiliyeti yetersiz mevcut traversler nedeniyle, tüm raylı sistem bileşenlerinin fiili servis ömürleri kısalmaktadır.

Ayrıca dünyada mevcut öngerilmeli veya öngerilmemiş beton travers modelleri, öngerilme işlemi veya etriye kullanım zorunluluğu getirmektedir. Bunun dışında öngerilmeli tipler, üretimin hemen ertesi gün gerdirmeye maruz kalacağından, yüksek erken dayanımlı beton kullanım zorunluluğu da getirmektedir [17]. Sonuç olarak her iki tipteki travers üretiminde de, birçok hammadde, işçilik, enerji ve süre kaybı söz konusu olmaktadır. Bu durum ise çeşitli mali külfetlerinin haricinde, önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Nitekim ülkemizde yürürlükte olan 11. Kalkınma Planınının 489.2. maddesinde de, karbon salınımının azaltılmasına dair önlemler üzerinde önemle durulmaktadır [18]. Travers üretiminin başlı başına bu emisyonuna neden olmasının haricinde, uygun şekilde dizayn edilmemiş traverslerin servis ömrünün kısa kalması nedeniyle de dünya genelinde yüksek miktarda travers üretimleri söz konusudur. Her yeni travers üretiminin de ekstra çimento, agrega, çelik, yakıt tüketimi nedeniyle çevreye önemli derecede zararı söz konusudur. Sonuç olarak, kullanım ömürleri yüksek traverslerin üretilmesi, çevreye verilen zararlı etkilerin düşürülmesi konusunda önemli rol oynamaktadır [19]. Hazır beton üretiminde başlıca girdiler çimento, agrega, su, kimyasal katkı ve bazı durumlarda mineral katkılardır. Bu girdiler içinde en fazla emisyonuna neden olan bileşen çimentodur. Çimento kaynaklı emisyonun dünyada sanayi kaynaklı toplam emisyonun %5'ine denk geldiği belirtilmektedir [20]. Çimento üretiminde neredeyse bire bir oranda CO₂ emisyonu oluştuğu ifade edilmektedir. Yani 1 ton çimento üretimi için yaklaşık bu miktarda CO₂ emisyonu oluşmaktadır. Mineral katkılar ise çimentoyu belirli bir oranda ikame eden ikincil bağlayıcılar ve bir prosesin yan ürünü oldukları için emisyonuna neden olmadığı belirtilmektedir [20]. Dolayısıyla travers üretiminde kullanılan çimento dozajının düşürülmesi mali ve çevresel fayda sağlayacağı gibi; CEM I sınıfı Portland çimentosu yerine, çeşitli oranlarda mineral katkı içeren CEM II-V sınıfı çimento tipleri kullanımı da önemli düzeyde mali ve çevresel fayda sağlayacaktır.

2. Metot

Bu çalışma kapsamında dinamik tren yüklerini daha iyi sönmüleyecek, rezonans direnci daha yüksek ve aynı zamanda daha çevreci bir travers tipi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ileri fonksiyonel bir malzeme olan yerli lamine karbon-fiber takviyeli poliüretan plakalar (L-CFRPU) ele alınmış, bu malzemelerin, beton hammadde içerisinde, mevcut öngerilmeli veya öngerilmemiş çelik donatılar yerine, betonarme donatısı olarak kullanılabilmesi düşünülmüştür. Bu doğrultuda, yerli karbon-fiber takviyeli poliüretan plakalar (L-CFRPU) yenilikçi bir yöntemle beton donatısı olarak kullanılmıştır. Söz konusu plakaların dünyada üretimini yapan fabrikalar, günümüze kadar beton iç donatısı olarak kullanılmadıkları için, mevcut kullanım alanlarına uygun olarak geniş ebatlarla üretmektedir. Bu çalışma kapsamında, yerli üretici fabrikadan standart olarak 120 mm eninde üretilen plakalar temin edilerek, bu geniş ebatlı plakalar, beton donatısı olarak kullanılabilir şekilde (bu çalışma için 15 mm eninde) kesilip, Şekil 4'te görüldüğü üzere beton hammadde içerisinde öngerilmemiş ve etriyesiz vaziyette kullanılmıştır. L-CFRPU plakaların ve yeni tip traverslerin üretim tekniğinin diğer detayları ve bu yeni tip traverslerle ilgili bugüne kadar yürütülmüş testlerin sonuçları literatürde mevcuttur [6, 9, 20-27]. Bu çalışmada, ayrıca, referansları verilen önceki çalışmalardan farklı olarak, sönmüleme oranında ve karbon emisyonunda iyileştirme sağlanması için, geçmiş uygulamalarda kullanılan yüksek dozajlı CEM I çimento kullanımı yerine, düşük dozajlı CEM II sınıfı çimento kullanımının sağlayabileceği faydalar araştırılmıştır. Bu suretle öngerilmeli beton traverslerde (üretim ertesini günü hemen gerdirme işlemi yapılması gerektiğinden) proses gereği mecbur kalınan CEM I sınıfı çevreye zararlı etkisi fazla çimento kullanımı ekarte edilmiştir. Yeni tip traverslerde, mevcut beton traverslerde kullanılan 420-550 kg/m³ düzeyindeki çok yüksek dozajda CEM I 42,5 R tipi çimento kullanımı yerine, 300-350 kg/m³ dozajda CEM II 32,5 B-LL tipi çimento kullanılmıştır. Her iki durumdaki beton bileşenleri, karışım oranları ve literatür doğrultusunda [20] hesaplanan tahmini karbon emisyon düzeyleri Tablo 1'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere her iki durumda da beton üretimi kaynaklı emisyon değerinin tamamına yakını çimento bileşeni kaynaklıdır ve yeni tip yeşil travers modelinin çevreye yaydığı toplam CO₂ değeri, standart öngerilmeli B70 tipi traverslerin yaklaşık yarısı kadardır (%50 daha düşük).

Tablo 1. Standart öngerilmeli B70 tipi traversin (solda) ve yeni yeşil travers modelinin (sağda) beton bileşenleri dozajları ve tahmini CO₂ emisyon değerleri

| Bileşen | B70-TİPİ | B70-TİPİ | B70-TİPİ | YENİ TİP | YENİ TİP | YENİ TİP |
|---------|---------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|
| | Ağırlık (kg/m ³) | CO ₂ ,eşdeğer (kg/m ³) | CO ₂ ,eşdeğer (%) | Ağırlık (kg/m ³) | CO ₂ ,eşdeğer (kg/m ³) | CO ₂ ,eşdeğer (%) |
| Çimento | 508 | 469,3 | 97,37 | 350 | 235,9 | 94,79 |
| Su | 83 | 0,1 | 0,02 | 58 | 0,1 | 0,02 |
| Agrega | 1942 | 10,4 | 2,16 | 2128 | 11,4 | 4,58 |
| Katkı | 9,9 | 2,2 | 0,45 | 6,8 | 1,5 | 0,6 |
| TOPLAM | 2542,9 | 482,0 | 100,00 | 2542,8 | 248,9 | 100,00 |

Sonuç olarak, çalışma kapsamında, söz konusu yeni yeşil-travers modelinin özellikle modal karakteristiklerinin, klasik öngerilmeli traverslerle karşılaştırılması için, eş-boyutlu travers numuneleri üretilmiştir. Bu kapsamda da, B70 tipi öngerilmeli beton travers modeli kullanılmıştır. B70 tipi traverslerin en-kesit boyutları ile kullanılan çelik ve L-CFRPU malzemelerin karakteristik özellikleri, günümüze kadar uygulanan test ve analiz sonuçları literatürde mevcuttur [6, 9, 20-27]. Çalışma kapsamında ayrıca, belirtilen travers numunelerinin üretimi esnasında, kullanılan betondan 15x15x15 cm ebadında küp numuneler alınmış ve 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımları ölçülmüştür. Bunun akabinde, üretilen yeni tip traverslerin mekanik dayanımının standartlara uygunluğunun belirlenmesi için TS EN 13230-3 doğrultusunda travers ray mesnedine uygulanan, artırımlı yükleme-kaldırma-tekrar yükleme (YKY) testleri yürütülmüştür. Söz konusu testin uygulama biçimi literatürde de mevcuttur [9, 21, 26, 27]. Bu testlerden sonra ise, çalışmanın esasını teşkil eden modal test ve analizlere geçilmiştir. Bu esnada

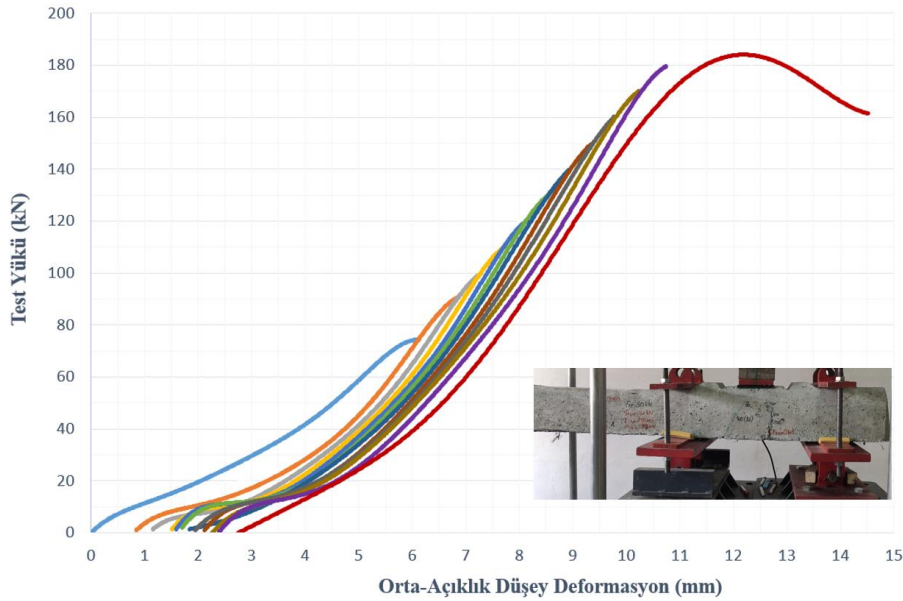
her numune için dikey doğrultuda en az 3'er çekiç darbesi uygulanarak ve ölçülen ivme dataları nCode yazılımında analiz edilerek; frekans bazında spektrum grafikleri (FRF) elde edilmiştir.



Şekil 4. Yeni geliştirilen 15x4,9 mm ebatlı L-CFRPU donatılı yeşil traversin üretimi

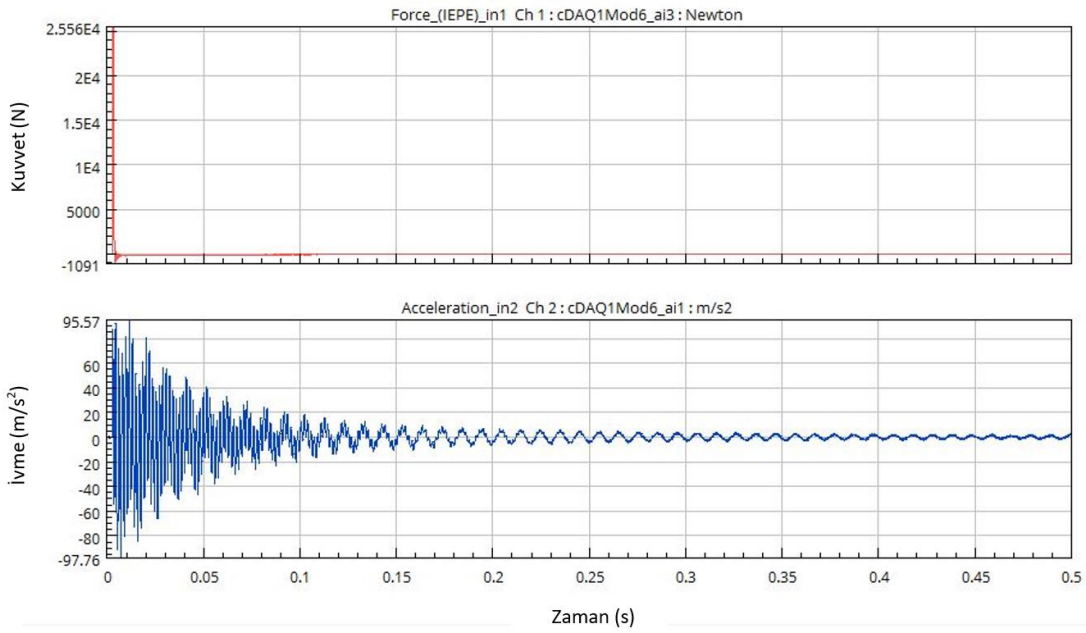
3. Bulgular

Yeni tip traverslerin üretimi esnasında kullanılan betondan alınan numuneler üzerinde 28 günlük kür süresi sonunda yapılan test sonuçlarına göre beton dayanım sınıfı C40/50 olarak belirlenmiştir. Bu sınıf, B70 tipi standart beton traversler için ise C55/67 olarak belirlenmiştir. Küp numuneler üzerinde uygulanan bu testler ardından testlere, traversler üzerinde yapılan mekanik testlerle devam edilmiştir. Bu aşamada, yeni bir travers tasarımı aşamasında TS EN 13230-2/3'te istenen YKY (yükleme-kaldırma-tekrar yüklenme) testleri uygulanmıştır. Şekil 5'te örnek grafiği sunulan test sonucunda 50 mikron genişliğindeki ilk kalıcı çatlak başlangıç yükü ($Fr_{0,05}$) 160 kN ve kırılma yükü (Fr_B) 190 kN olarak belirlenmiştir. Bu değerler EN 13230-3 standardı ve Dünya Demiryolu Birliği (UIC) rehberleri doğrultusunda demiryolu kuruluşlarınca istenilen Teknik Şartname değerlerini ($Fr_{0,05} > 125$ kN ve $Fr_B > 175$ kN) sağlamaktadır [6, 9, 21, 24].

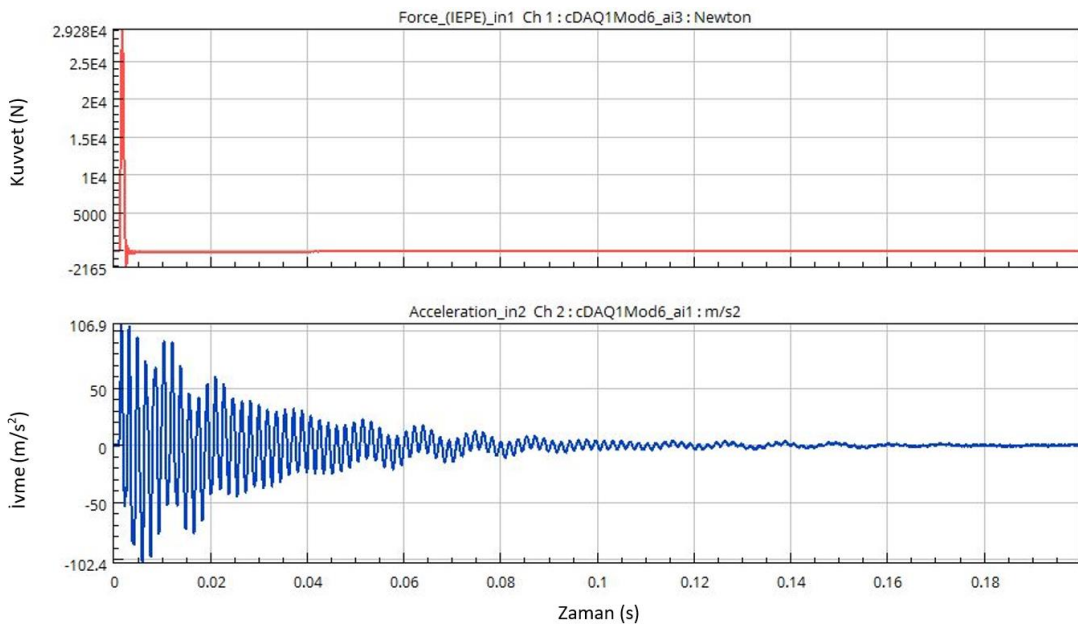


Şekil 5. Yeni tip traverslere uygulana YKY testlerine ait örnek test yükü (kN)-deformasyon (mm) eğrisi

Çalışmanın devamında, traverslerin doğal frekans değerlerinin ve modal sönümlenme oranlarının tespiti yapılmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan deneysel çalışma düzeneği literatürdeki önceki çalışmalarla [23] benzer tutulmuş olup, traversler 400 mm kalınlığında yumuşak poliüretan blok üzerine konarak serbest (free-free modda) salınım yapmasına imkân tanınmıştır. Ayrıca traverslerin üst yüzeylerinde iki uç kısma ve orta noktaya ivmeölçerler sabitlenmiştir. Kuvvet sensörü içeren ivmeölçerler ile aynı veri toplama sistemine (data logger) bağlı modal çekiç ile de travers alt-orta kısmından tek ve tok darbeler vurularak traversin serbest salınım yapması sağlanmış ve yaklaşık 10'ar saniye aralıklarla minimum 3 adet çekiç darbesi uygulanmıştır. Darbe uygulanması esnasında modal çekiç üzerinden ölçülen kuvvet ölçümleri ve ivme ölçümleri alınmıştır. Her iki tip travers numuneleri için de tek bir çekiç darbesi esnasında alınan kuvvet ve ivme datası örnekleri Şekil 6 ve 7'de sunulmuştur.

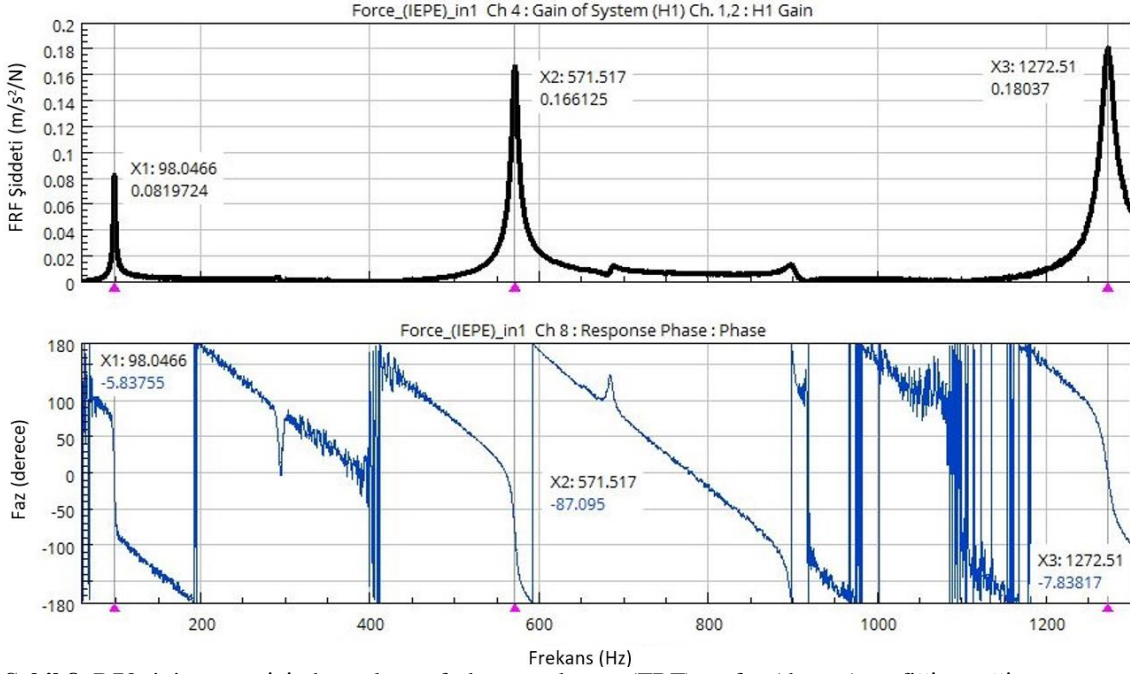


Şekil 6. B70 tipi travers numunesinden çekiç darbesiyle alınan kuvvet (N) ve ivme (m/s²) dataları örneği

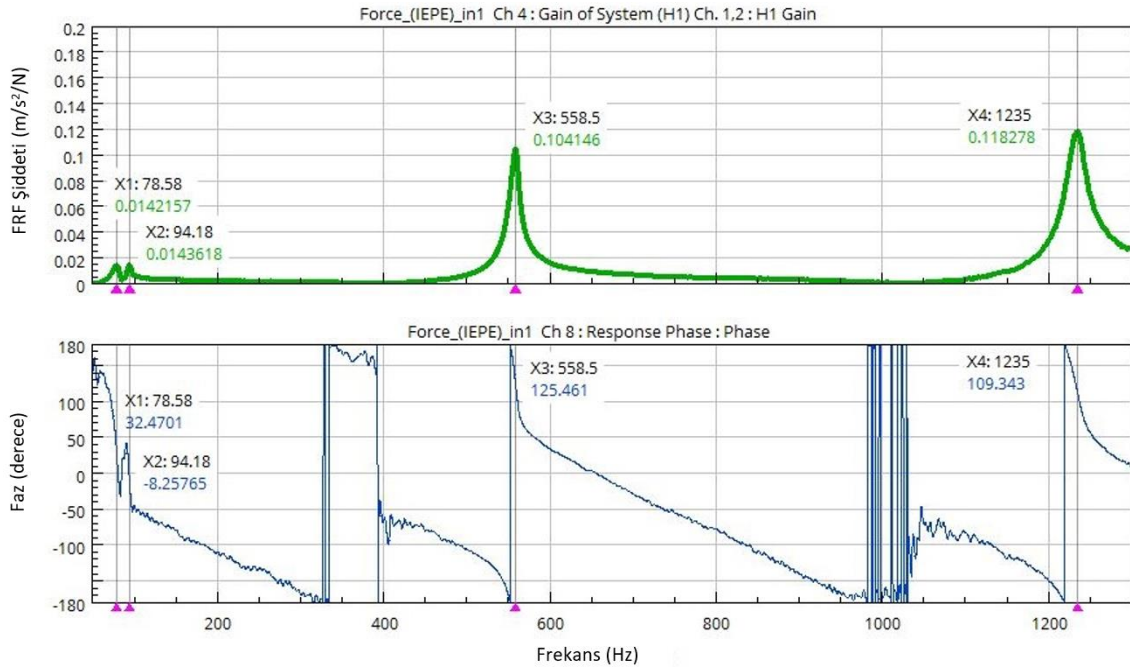


Şekil 7. Yeni tip travers numunesinden çekiç darbesiyle alınan kuvvet (N) ve ivme (m/s²) dataları örneği

Bu şekilde her bir darbe ayrı ayrı nCode analiz ağacı ile analiz edilmiş ve Şekil 8 ve 9’da örnekleri sunulan Frekans Tepki Fonksiyon (Frequency Response Function, FRF) grafikleri elde edilmiştir. FRF grafikleri ile çeşitli frekanslarda yapının tepkisi analiz edilebilmektedir. Bu grafikte, pik değerleri rezonans olayını göstermektedir [27].

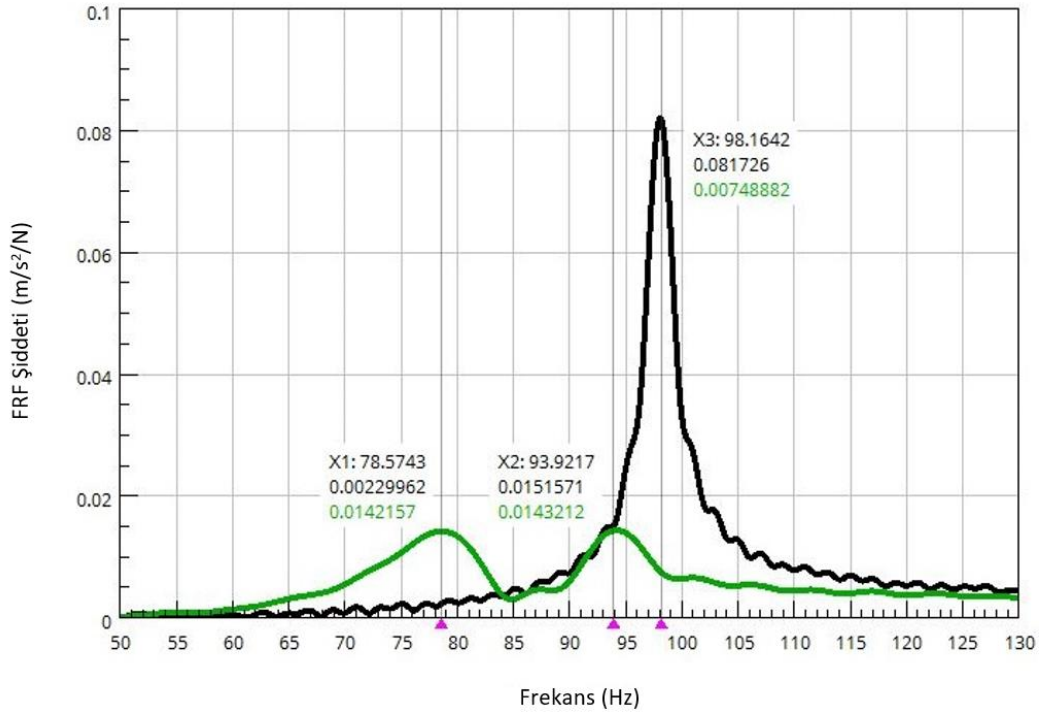


Şekil 8. B70 tipi travers için hesaplanan frekans spektrum (FRF) ve faz (derece) grafiği örneği

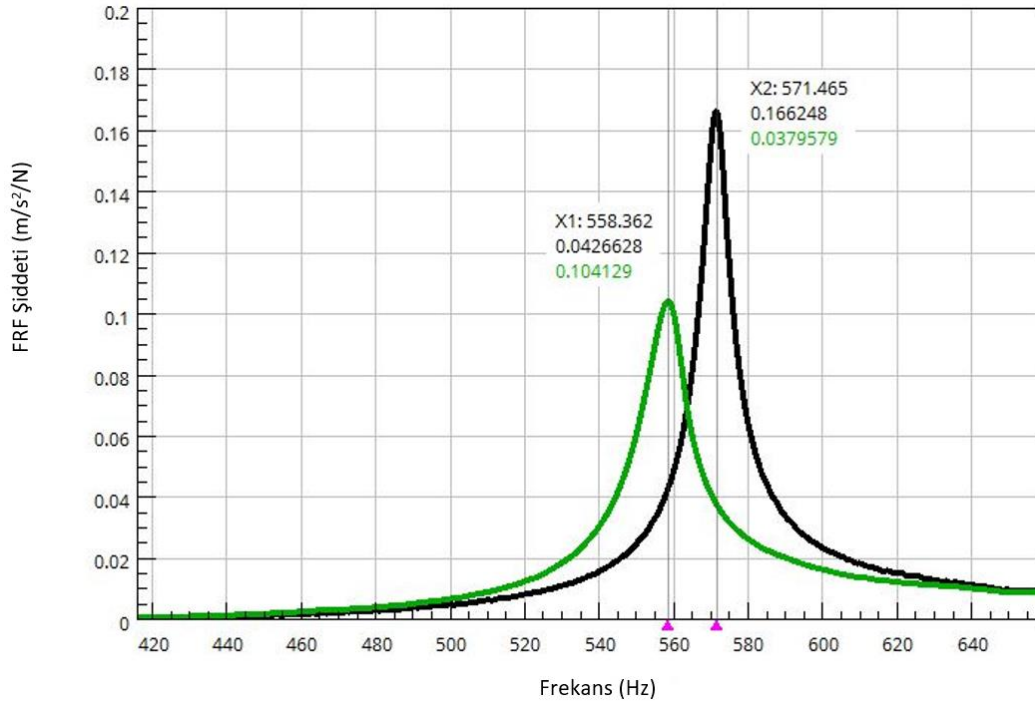


Şekil 9. Yeni tip travers için hesaplanan frekans spektrum (FRF) ve faz (derece) grafiği örneği

Şekil 8 ve 9’da sunulan FRF grafiklerinde görülen rezonans frekans bantları 1., 2. ve 3. rezonans frekansları için yaklaşıtırlarak karşılaştırılması için Şekil 10, 11 ve 12 oluşturulmuştur.



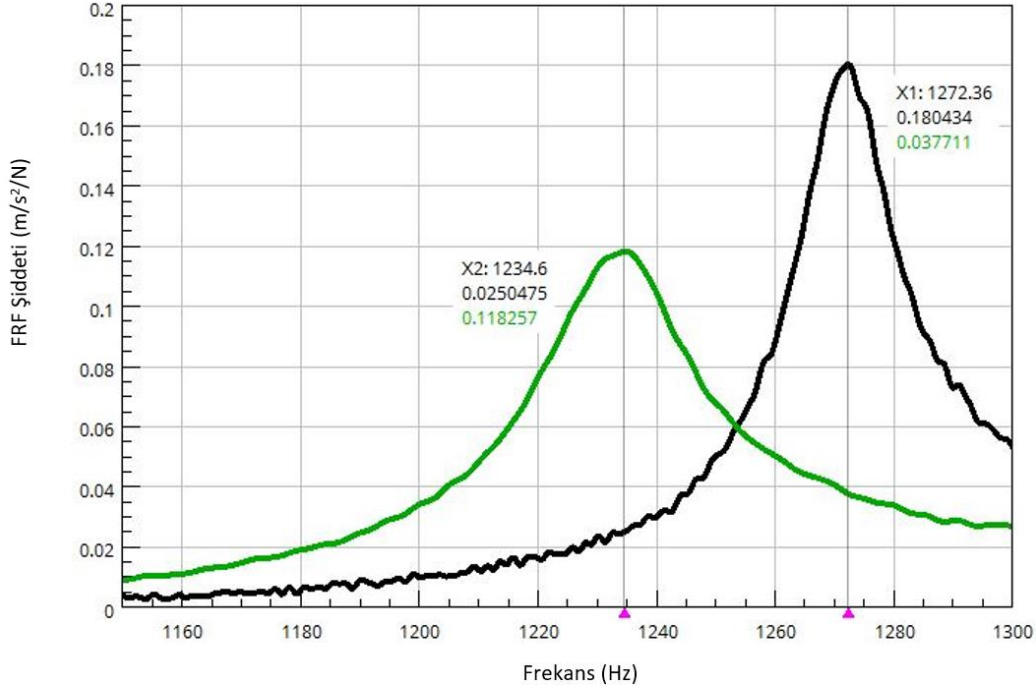
Şekil 10. B70 tipi (siyah eğri) ve yeni tip (yeşil eğri) traversin 1. Rezonans frekanslarına ait FRF grafiklerinin karşılaştırması



Şekil 11. B70 tipi (siyah eğri) ve yeni tip (yeşil eğri) traversin 2. Rezonans frekanslarına ait FRF grafiklerinin karşılaştırması

Çalışma süresince, nCode yazılımı ile yapılan analizler esnasında “baştanbaşa analiz (overall)” metodu kullanılmış, çıktı tipi olarak “güç (power)” tercih edilmiştir. Dolayısıyla elde edilen FRF grafiği tipi, PSD (spektral güç yoğunluğu (power spectral density))’dir. Buffer pencere tipi “rectangular” ve boyutu “524288” parametreleriyle daha düzgün eğriler elde edilmesi sağlanmış, bu ayarlamalar tüm analizlerde sabit tutulmuştur. FRF grafikleri üzerinde nCode yazılımının

Deneysel Modal Analiz (Experimental Modal Analysis) modülü kullanılarak sönümlenme oranı (damping ratio) hesaplamaları yapılmıştır. Eğri uydurma metodu olarak en küçük kareler (least-squares) metodu seçilmiş, analiz frekans aralığı ilgi alanını kapsayan 30-1350 Hz olarak belirlenmiştir. Eğri oturtma esnasında frekans analiz aralığı 0.1 ve frekans-amplitude gate değerleri %5 olarak kullanılmıştır. Bu hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 2 ve 3'te özet halinde sunulmuştur.



Şekil 12. B70 tipi (siyah) ve yeni tip (yeşil) traversin 3. Rezonans frekanslarına ait FRF grafiklerinin karşılaştırması

Tablo 2. Üretilen traverslerin rezonans frekansı ve sönümlenme oranı analiz sonuçları

| Numune Tanımı | 1. Dikey Rezonans Frekansı (Hz) | 1. Dikey Sönümlenme Oranı (%) | 2. Dikey Rezonans Frekansı (Hz) | 2. Dikey Sönümlenme Oranı (%) | 3. Dikey Rezonans Frekansı (Hz) | 3. Dikey Sönümlenme Oranı (%) |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| B70 tipi travers | 98,1 | 1,05 | 571,4 | 0,59 | 1272 | 0,50 |
| Yeni yeşil travers | 79,2 | 4,4 | 559,0 | 0,91 | 1235 | 0,83 |

Tablo 3. Üretilen traverslerin FRF şiddet (magnitüde) değeri analiz sonuçları

| Numune Tanımı | 1. Dikey Mod Şeklinde FRF Pik Değeri (m/s ² /N) | 2. Dikey Mod Şeklinde FRF Pik Değeri (m/s ² /N) | 3. Dikey Mod Şeklinde FRF Pik Değeri (m/s ² /N) |
|--------------------|--|--|--|
| B70 tipi travers | 0,08 | 0,16 | 0,17 |
| Yeni yeşil travers | 0,01 | 0,10 | 0,11 |

4. Sonuç

Çalışma kapsamında yürütülen literatür taraması ve deneyler akabinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- i. Yeni yeşil demiryolu traverslerinde kullanılan düşük dozajlı CEM II sınıfı çimento sayesinde, travers beton hammaddesinin karbon emisyonunun %50'ye kadar azaltılabileceği hesaplanmıştır.
- ii. Yeni tip traverslerin beton basınç dayanımı, standart öngerilmeli beton traverslerden önemli düzeyde (yaklaşık %25) daha düşük olmasına rağmen, yeni L-CFRPU donatılı üretim prosesi sayesinde, günümüzde öngerilmemiş traversler için standartlarda (EN 13230-3 vb.) istenilen ray-mesnedinde pozitif yüklemeli moment tayini testi şartlarını sağlamaya devam ettiği tespit edilmiştir.
- iii. Yeni tip traverslerin üretim prosesindeki değişimin karşılaştırılması için yürütülen bu çalışmada travers en kesit boyutları B70 tipi öngerilmeli beton traverslerle eşdeğer uygulanmıştır. Dolayısıyla modal testler esnasında belirlenen rezonans frekansı değerlerinde, kısmi bir düşüş haricinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Bu düşüşün ana nedeninin, yeni katkılı ve düşük dozajlı çimento kullanımı kaynaklı kütle düşüşünden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Her iki travers tipinde görülen rezonans frekanslarındaki değişimler, demiryollarında görülen dinamik yüklerin 2000 Hz'leri aşması nedeniyle, traverslerin servis yüklerinin frekans aralığından çıkmasını sağlamayacağı nedeniyle, önemsizdir.
- iv. Yeni tip traverslerin modal sönümlenme oranları, B70 tipi öngerilmeli beton traverslerle karşılaştırıldığında, 1., 2. ve 3. dikey rezonans frekanslarında sırasıyla %319, %54 ve %66 artış sağladığı görülmüştür. Dolayısıyla, klasik mekanik deneyler ile ortaya çıkarılamayacak önemli bir dinamik yük sönümlenme avantajı belirlenmiştir.
- v. Yeni tip traverslerin modal sönümlenme oranlarındaki büyük artış sayesinde, B70 tipi öngerilmeli beton traverslerle karşılaştırıldığında, Frekans Tepki Fonksiyonu grafiklerinde, 1., 2. ve 3. dikey rezonans frekanslarına ait pik değerleri ($m/s^2/N$) sırasıyla %87, %37 ve %36 düşüş sağlanmıştır. Dolayısıyla yeni tip traversler, yüksek frekans bileşenleri içeren demiryolu yükleri altında, bu denli daha az genlikte titreşim gösterecek, ortaya bu denli daha düşük gerilmeler çıkacak ve traverslerin servis ömrü bu doğrultuda önemli düzeyde artacaktır. Bunun gibi, çevreye yayılan titreşim ve yükler de daha fazla sönümleneceği için, diğer demiryolu bileşenlerinin de servis ömürleri artacaktır. Sonuç olarak hem üretim esnasında hem de kullanım esnasında zararlı çevresel etkiler önemli düzeyde bertaraf edilecek, ayrıca önemli bir mali avantaj da sağlayabilecektir.

Sonuç olarak yeni tip traverslerin, hem traverslerin hem de diğer demiryolu yapı elemanlarının servis ömürlerinin artırılmasında ve çevresel zararlı etkilerin azaltılmasında önemli faydalar sağlayabileceği tahmin edilmektedir. Ancak bu durumun yorulma testleri ve saha uygulamalarıyla teyit edilmesine ihtiyaç vardır.

Kaynakça

- [1] "Rezonans," [Online]. Available: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Rezonans_\(fizik\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Rezonans_(fizik)) (21.04.2022)
- [2] "Tacoma narrows bridge," [Online]. Available: <https://adsimutec.com/en/fem-cfd-simulation-pinboard/application-examples/multiphysics-coupling-interaction/tacoma-narrows-bridge> (21.04.2022)
- [3] "Track behaviour," [Online]. Available: <https://the-contact-patch.com/book/rail/r1412-track-behaviour> (21.04.2022)
- [4] D. Thompson, C. Jones, S. Iwnicki, "Handbook of railway vehicle Dynamics" Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [5] "Dosya: İstanbul", [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:Istanbul_Feb_2020_11_46_10_411000.jpeg

- [6] F. Çeçen, B. Aktaş, “Yeni nesil demiryolu traversleri ve yerli frp donatı kullanımının deneysel araştırması,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 13, Sayfa: 53-64. Ocak 2021, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>
- [7] R. You, D. Li, C. Ngamkhanong, S. Kaewunruen, “Fatigue life assessment method for prestressed concrete sleepers,” *Frontiers in Built Environment*, 2017, Volume 3, Article 68. Erişilebilir (27.08.2021): <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2017.00068/full>
- [8] W. Ferdous, A. Manalo, G. V. Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. M. Remennikov, “Composite railway sleepers – recent developments, challenges and future prospects,” *Composite Structures*, 2015, vol. 134, pp. 158–168, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.058>
- [9] F. Çeçen, “Karbon – fiber donatıyla öngerilmemiş monoblok demiryolu beton traversi geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ulaştırma ABD, Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Tokat, 2019
- [10] Z. Öztürk, T. Öztürk, V. Arlı, “Yüksek hızlı demiryolu köprülerinde rezonans olayı,” 2018. Erişilebilir (27.08.2021): www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1448.pdf
- [11] H. P. J. Taylor, “The railway sleeper: 50 years of pretensioned, prestressed concrete,” 1993. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/288948138_The_prestressed_concrete_railway_sleepers_-_50_years_of_pretensioned_prestressed_concrete [09.03.2022]
- [12] L. M. Domingo, C. Z. Martín, C. P. Avilés, J. I. R. Herráiz, “Analysis of the influence of cracked sleepers under static loading on ballasted railway tracks,” *Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal*, 2014, Volume 2014, Article ID 363547. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/363547>
- [13] A. Remennikov, S. Kaewunruen, “Investigation of vibration characteristics of prestressed concrete sleepers in free-free and in-situ conditions,” 2005. Erişilebilir (27.08.2021): <http://ro.uow.edu.au/engpapers/284>
- [14] V. Arlı, Z. Öztürk, “Balastlı hatta ray-tekerlek titreşimlerinin demiryolu dinamiğine etkisinin belirlenmesi,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2014, Cilt 20, Sayı 3, Sayfalar 100-110. Erişilebilir (27.08.2021): <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20487/218165?publisher=pamukkale%3Fpublisher%3Dpa+mukkale>
- [15] C. Esveld, *Modern railway track*. ISBN 978-1-326-05172-3, 2014
- [16] A. N. Hanna, “State-of-the-Art Report on Prestressed Concrete Ties for North American Railroads,” *PCI Journal*. 1979, Available at (23.02.2022): https://www.pci.org/PCI/Publications/PCI_Journal/Issues/1979/September-October/Prestressed_Concrete_Ties_for_North_American_Railroads.aspx
- [17] “Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe başkanlığı On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)”, [Online]. Available: <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/OnbirinciKalkinmaPlanı.pdf> (21.04.2022)
- [18] M. S. Çelik, Z. Öztürk, “Demiryolu traverslerinin çok yönlü incelenmesi ve örnek hat üzerinde kullanılan farklı tipteki traverslerin irdelenmesi,” Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Ulaştırma Mühendisliği Programı, İstanbul, 2015
- [19] Y. Engin, “Hazır Beton ve Sera Etkisi (Excel ile Hesaplama),” [Online]. Available: <https://www.betonvecimento.com/beton-2/hazir-beton-ve-sera-etkisi> (21.04.2022)
- [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, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105471>
- [21] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. Ş. Öztürk, M. B. Navdar, “Comparison of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers with LUR tests,” *Construction and Building Materials*, Vol: 321, ID: 126414, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126414>
- [22] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. M. B. Navdar, Ş. Öztürk, “Behaviour of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers under repeated impact loads,” *Construction and Building Materials*, Vol: 319, ID: 126151, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126151>
- [23] 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, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105821>
- [24] F. Çeçen, B. Aktaş, “Incremental LUR tests of new LCR concrete railway sleepers,” *Engineering Failure Analysis*, Vol: 130, ID: 105793, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105793>

- [25] F. Çeçen, B. Aktaş, “Lamine CFRP Donatılı Traverslerin Deneysel ve Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 14, Sayfa: 26-38, Temmuz 2021, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.869946>
- [26] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, “Karbon-Fiber Plaka Donatılı Traverslerin, B70-Tipi Öngerilmeli Beton Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 15, Sayfa: 97-110, Ocak 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1028740>
- [27] F. Çeçen, B. Aktaş, “B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının Deneysel İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 15, Sayfa: 158-169, Ocak 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.990316>

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası'nda Üretim Grup Müdürlüğü görevini yürütmekte olan yazar, Erciyes Üniversitesi'nde Ulaştırma alanında doktora eğitimine devam etmektedir. Yerli ileri fonksiyonel malzemelerle milli demiryolu traversleri geliştirilmesi amaçlı ar-ge ve patent çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr



Bekir AKTAŞ

Doktora Eğitimini Süleyman Demirel Üniversitesinde tamamlayan yazar, Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Ulaştırma alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi ve patentleri bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

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



Kaya Sınıflarına Göre Destek Sistemleri Belirlenmesi-Tlemcen-Akkid Abbas (Cezayir) Yüksek Hızlı Demiryolu Projesi

Ebu Bekir AYGAR^{ID}

Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti. Ankara, Türkiye

eaygar@gmail.com

(Alınış/Received: 24.08.2022, Kabul/Accepted: 17.09.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Tüneller için yapılan kaya kütle sınıflamalarında karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi, tünel kesitinde farklı birimler geçilmesi durumunda hangi desteklerin uygulanacağıdır. Tünel kesitinde üst yarıda zayıf birim ile karşılaşılırken alt yarı ve invert kesimi ise sağlam birimde yer alabilmektedir. Bu durumlarda ise kaya kütlesi en kötü koşullara göre belirlenirken, destek sisteminde ise farklılıklar olabilmektedir. Üst yarıda ağır destek sistemi gerekirken invert kesiminin sağlam birimde kalması durumunda invert kazısı yapılmayabilir. Ayrıca zayıf zeminlerde açılan tünellerde karşılaşılan sorunlar genelde sıkışma mekanizmasına bağlı olarak tünel destek sistemlerinde yenilmeler ile tünel aynasında karşılaşılan stabilite sorunları olarak karşımıza çıkmaktadır. Zayıf zeminlerde genelde destek sistemlerinin tamamlanmasından sonra uzun dönemde yenilmeler meydana gelmektedir. Sığ tünellerde ise, tünel çevresinde kemerlenme sağlanamaması sebebi ile destek sistemlerinin tasarımı daha kritiktir. Zira deformasyonlara müsaade edilmesi tünel çevresinde yüzeye kadar etkileyecek deformasyonları tetikleyebilecektir. Ayrıca tünel aynasında kazı esnasında oluşabilecek bir yenilmenin etkisi yüzeye kadar obruk şeklinde yansıması olacak ve tüm tünel destek sistemlerini etkileyecektir. Bu sebeple sığ örtü altında zayıf zeminlerde açılan tünellerde deformasyonlara müsaade edilmeden destek sistemleri tamamlanmalıdır. Ayrıca tünel aynasında herhangi bir göçüğün oluşmaması için ayna destek sistemlerinin yapılması zorunludur. Bu çalışma kapsamında Tlemcen Akkid Abbas Yüksek Hızlı Demiryolu Projesinde açılan T10 tüneli destek sistemleri ve tünel tasarımı incelenmektedir. Yapılan çalışma sonucunda zayıf zeminlerde tünel destek sistemlerinin belirlenmesinde ayna ve tavan stabilitesinin son derece önemli olduğu görülmüştür. Ayrıca uzun dönemde sıkışma sorunlarının önüne geçmek için tünel destek sistemi basıncı belirlenirken, kritik destek sistemi basıncından en az 2-3 kat yüksek olması gerektiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Sıkışma, Zayıf zemin, Sığ örtü, Tünel

Determination of Support Systems According to Rock Classes-Tlemcen-Akkid Abbas High Speed Railway Project-Algeria

Abstract: One of the biggest problems encountered in rock mass classifications for tunnels is which supports will be applied in case of passing with different units in the tunnel section. While a weak unit is encountered in the top heading of the tunnel section, bench and invert section can be found in the rock. In these cases, while the rock mass is determined according to the worst conditions, there may be differences in the support system. While heavy support system is required in the top heading invert excavation may not be performed if the invert section remains in the high quality rock mass. In addition, the problems encountered in tunnels excavated in weak units are generally encountered as failures in the tunnel support systems due to the squeezing mechanism and stability problems encountered in the tunnel face. In weak units, long-term failures usually occur after the completion of the support systems. In shallow tunnels, the design of the support systems is more critical since arching cannot be achieved around the tunnel. Because allowing deformations may trigger deformations around the tunnel that affects up to the surface. In addition, the effect of a failure that may occur during excavation in the tunnel face may be reflected up to the surface and may affect all tunnel support systems. For this reason, support systems should be completed without allowing deformations in tunnels excavated on weak soils under shallow overburden. In addition, it is obligatory to make face support systems in order to prevent any collapse in the tunnel face. Within the scope of this study, T10 tunnel support systems and tunnel design excavated in Tlemcen Akkid Abbas High Speed Railway Project is examined. As a result of the study, the stability of the tunnel face and ceiling is

Atıf için/Cite as: E.B. Aygar, "Kaya sınıflarına göre destek sistemleri belirlenmesi-Tlemcen-Akkid Abbas (Cezayir) yüksek hızlı demiryolu projesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 14-25, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1166236

extremely important in the determination of tunnel support systems in weak units. In addition, the tunnel support system pressure should be at least 2-3 times higher than the critical support system pressure in order to prevent squeezing problems in the long term.

Keywords: Squeezing, Weak unit, Shallow overburden, Tunnel

1. Giriş

Dünyada hızlı bir şekilde gelişen demiryolu taşımacılığına bağlı olarak yüksek hızlı demiryollarının da yapımında büyük artış gözlenmektedir. Cezayir Tlemcen-Akid Abbas demiryolu projesi de bu amaçla oluşturulmakta ve ülkenin kuzeyinde doğudan batıya doğru ulaşımı sağlamak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu hat kapsamında açılan tünellerde yapılan projelendirme çalışmalarında kaya kütle puanlama sistemi (RMR) [1], [2], [3], Q sistemi [4], [5], [6] ve Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi [7], [8], [9], [10], [11] prensipleri kullanılmaktadır.

Yüksek hızlı demiryolu projesi kapsamında projelendirilen T10 tüneli hem zayıf zemin olması hem de sığ örtü altında açılması sebebi ile önem arz etmektedir. Zayıf zeminlerde açılan tünellerde yaşanan en büyük sorun uzun dönemde oluşacak olan deformasyonlardır [12-14]. Tünel ilk etapta stabil olsa dahi uzun dönemde sıkışmaya bağlı olarak destek sistemlerinde yenilmeler meydana gelmektedir [15-17]. Bu sebeple destek sistemleri belirlenirken rijit bir tahkimat sisteminin veya deformasyonlara müsaade eden esnek bir destek sisteminin seçilmesi son dönemlerde tartışılır olmuştur [18-20].

Sığ yeraltı tünellerinde ise tünel ayna ve tavan stabilitesinin önemi tartışılmaz bir gerçektir [21-22]. Çünkü tünel aynasında oluşacak olan bir deformasyonun ve kaymanın yüzeye kadar yansması ve ciddi göçükler ile sonuçlanması muhtemeldir. Yapılacak olan ayna ve tavan destekleri tünel aynasında deformasyonları en az düzeye indireyecek şekilde tasarlanmalıdır.

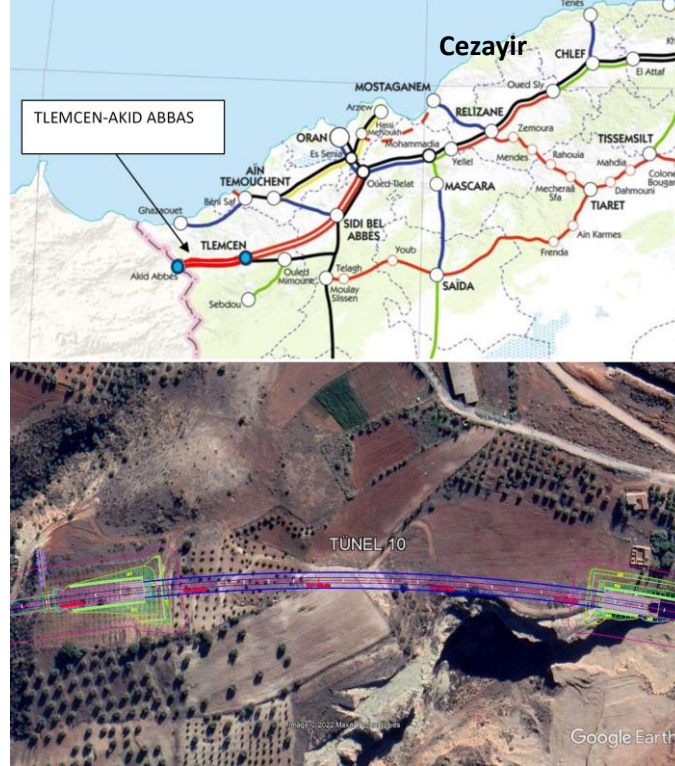
Tünelde genelde kaya sınıfı belirlenirken en kötü koşullar dikkate alınır. Ancak tünel kesitinin büyük olduğu durumlarda ise tünel üst yarı, alt yarı ve invert kesimlerinin farklı birimlerde olması muhtemeldir. Bu durumlarda ise Aygar [23] tarafından belirtildiği gibi, aynı kaya sınıfı içerisinde farklı destek sınıfları olması doğaldır. Örneğin RMR kaya sınıfına göre üst yarı kesimi çok zayıf kaya sınıfında yer alırken invert kesimi de sağlam kayada yer alabilir. Bu durumlarda kaya sınıfı çok zayıf olarak belirtilmesine rağmen invert kazısı yapılmayacaktır.

Araştırma konusu olan T10 tüneli de hem sığ örtü altında geçmesi, hem RMR kaya kütle sınıflama sistemine göre zayıf ve çok zayıf kaya sınıfı içerisinde yer alması sebebi ile değerlendirilmesi gereken bir tünel olarak karşımıza çıkmaktadır. Tünel kesitinde üst yarı zayıf kaya kütle içerisinde yer alırken taban kesimi ise sağlam birimde yer almaktadır. Bu kesitlerde tünel kaya sınıfı RMR sistemine göre Tip IV olarak belirtilmesine rağmen, destek sistemi ise Tip IV-A invertsiz ve Tip IV-B invertli olarak bölümlendirilmiştir.

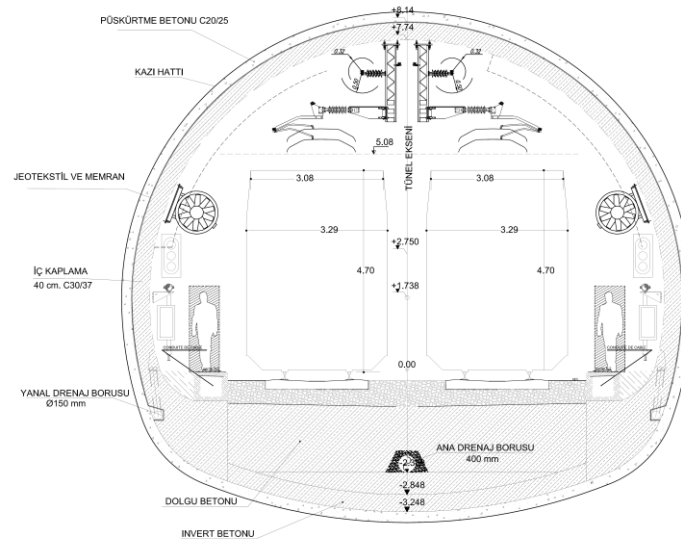
Bu çalışma kapsamında Cezayir Tlemcen-Akid Abbas Yüksek Hızlı Demiryolu projesi kapsamında açılacak olan T10 tüneline sıkışma mekanizması değerlendirilecek, analitik çözümler ile zemin ve destek sistemi reaksiyon eğrileri de dikkate alınmaktadır. Yapılan analizlerde desteksiz durumda tünel aynasında meydana gelen yerdeğiştirmelerin tünel aynasında 22 cm düzeyinde olduğu belirlenmiş ve toplam yerdeğiştirmelerin ise 1.4 m'ye kadar çıktığı görülmüştür. Sıkışma durumu değerlendirildiğinde ise tünelde aşırı sıkışmanın olacağı ve özel destek sistemi gerekli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tünel çevresindeki plastik zonun da tüm örtü yüksekliğini kapsayacak şekilde ilerlediği anlaşılmaktadır.

2. T10 Tünelinin Genel Özellikleri

T10 tüneli, Çift Hatlı Elektrikli Oued Tlelat/Akkid Abbas, Bölüm 2 Tlemcen/Akkid Abbas Yüksek Hızlı Demiryolu projesinde yer almaktadır. T10 tüneli km:156+970.70 ile km:157+327 arasında yer almakta olup Şekil 1’de konumu gösterilmektedir. Tünel örtü yüksekliği ray üst kotundan maksimum 32 m olup yer yer 20 m ye kadar düşmektedir. Tünelin tamamlanmış halinde genişliği 12 m yüksekliği ise 7.74 m dir (Şekil 2).



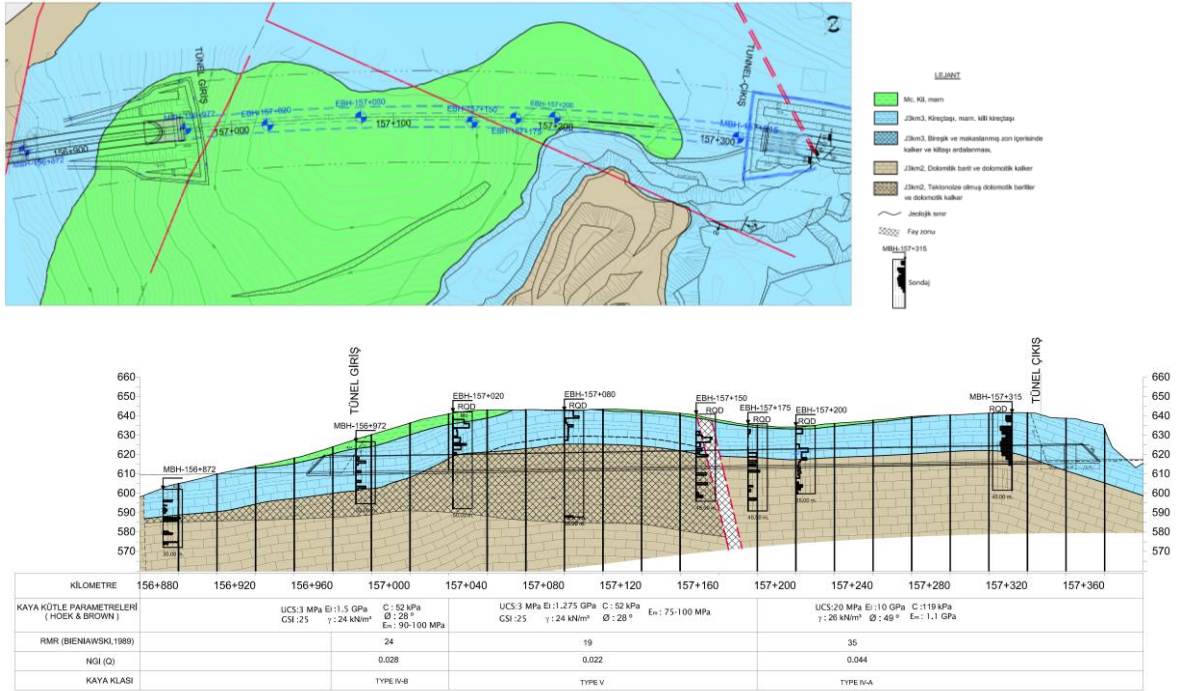
Şekil 1. T10 tüneli lokasyonu



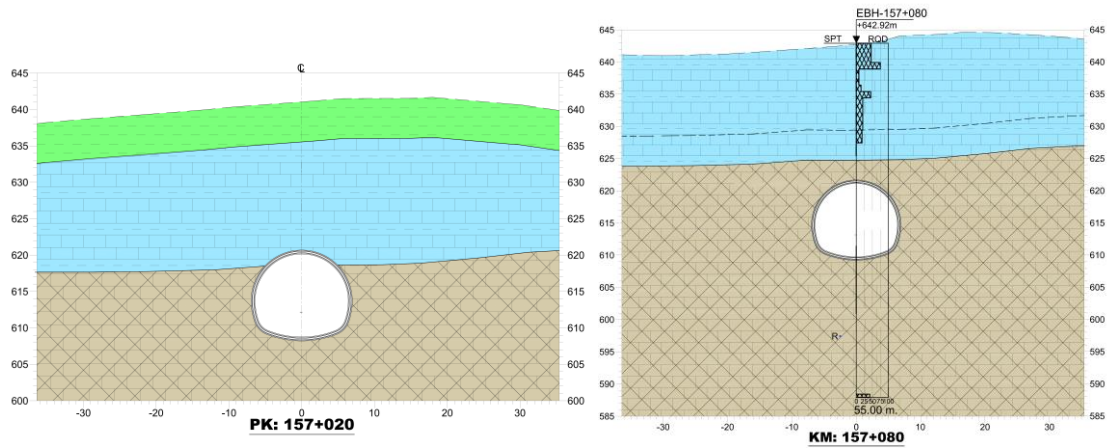
Şekil 2. T10 Tüneli tip kesiti

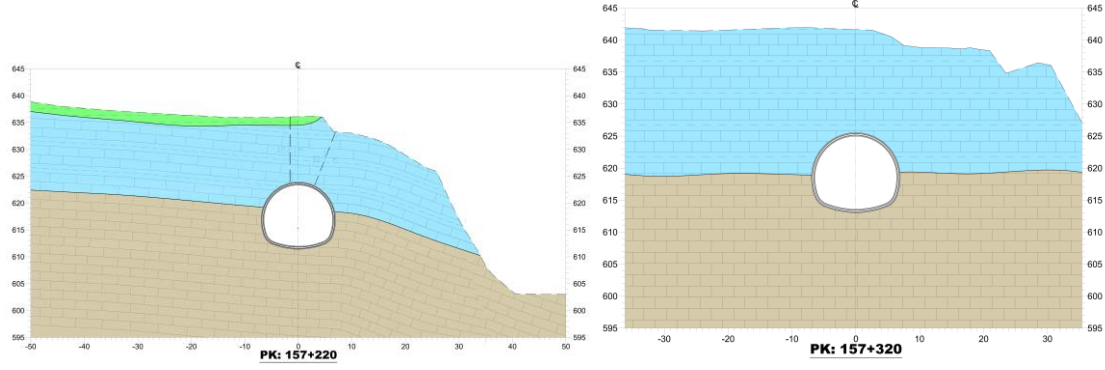
3. Tünel Güzergahının Jeolojik-Jeoteknik Durumu, Kritik Kesimler ve Kaya Sınıfları

Tünel 10 güzergahı boyunca derinlikleri 32 m ile 55 m arasında değişen toplam 10 adet araştırma sondajı yapılmıştır. Sondajlardan elden edilen numunelerden kaya ve zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Sondajlardan elde edilen numuneler incelendiğinde kaya kalite indeksi (RQD) genelde 25'den küçük olarak tespit edilmiştir. Tünel Miyosen yaşlı kil/marn birimleri ile açık yeşil, açık yeşilimsi gri ve yeşilimsi kahverengi, Jura yaşlı karbonat (J3km3) birimleri içinden geçmektedir. Alt kesimlerde kumlu kireçtaşı birimleri (J3km2) vardır. Tünel B10 geçidinin güzergahının plan görünümü Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 4'de ise km:157+020, 157+080 ve 157+220 den alınan jeolojik kesitler verilmiştir. Jeolojik kesitlerden de görüleceği gibi tünel iki ana birimden geçmektedir. Bu sebeple belirlenen destek sınıfları da farklı olmaktadır.



Şekil 3. T10 tüneli jeolojik plan ve profili





Şekil 4. Km:157+020, 157+080, 157+220 ve 257+320 için alınan jeolojik kesitler

Tünel güzergahında yapılan jeolojik ve jeoteknik değerlendirmeler sonucunda, tünel kaya sınıfları ile kaya kütle parametreleri belirlenmiştir. (Tablo 1). Yapılan araştırma sondajlarından elde edilen örneklerden tek eksenli basınç deneyi, doğal su içeriği testi, birim hacim ağırlık deneyi, üç eksenli basınç deneyi, drenajlı makaslama testi deneyleri ile kimyasal tesler yapılmıştır. Arazide yapılan jeolojik haritalamalar, yapılan süreksizlik ölçümleri, sondajlar ve deney sonuçlarının incelenmesi ile RMR [3] ve Q [6] kaya kütle sınıflama sistemleri kullanılarak kaya sınıfları belirlenmiştir.. RMR [3] kaya kütle sınıflamasına göre tünel zayıf kaya ve çok zayıf kaya koşullarında açılacaktır.

Tablo 1. T10 tüneli kaya sınıfları ve kaya kütle parametreleri

| Kilometre | Kaya sınıfı | RMR (1989) | Q (NGI) | Birim hacim ağırlık (kN/m ³) | Kohezyon (kPa) | İçsel sürtüme açısı (°) | Deformasyon modülü (MPa) |
|-----------------------|----------------|------------|---------|--|----------------|-------------------------|--------------------------|
| Giriş Portalı-157+020 | Zayıf Kaya | 24 | 0.028 | 24 | 52 | 28 | 100 |
| 157+020-157+180 | Çok zayıf kaya | 19 | 0.022 | 24 | 52 | 28 | 75 |
| 157+180-157+290 | Zayıf kaya | 35 | 0.044 | 26 | 119 | 49 | 1100 |
| 157+290-Çıkış Portalı | Zayıf kaya | 38 | 0.041 | 26 | 110 | 44 | 850 |

4. Tünel Sıkışma Mekanizmasının Değerlendirilmesi

Tünelde sıkışma mekanizmasının değerlendirmek amacıyla Jethwa vd. [24] ve Hoek ve Marinos [25] yaklaşımları kullanılacaktır. Bu yaklaşımlarda kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ile arazi gerilmesi dikkate alınarak sınıflandırma yapılmıştır.

Jethwa sıkışma mekanizmasını N_c katsayısına göre tanımlamış ve N_c katsayısı için denklem 1'i önermiştir.

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{P_o} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot h} \quad (1)$$

Burada σ_{cm} kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, P_o arazi gerilmesi, γ birim hacim ağırlık ve h ise örtü yüksekliğidir. Jethwa vd. [24] N_c değerine bağlı olarak sıkışmayı Tablo 2'de verdiği şekilde tanımlamıştır.

Tablo2. Jethwa vd.'ne göre N_c değerine göre sıkışma derecesi [24]

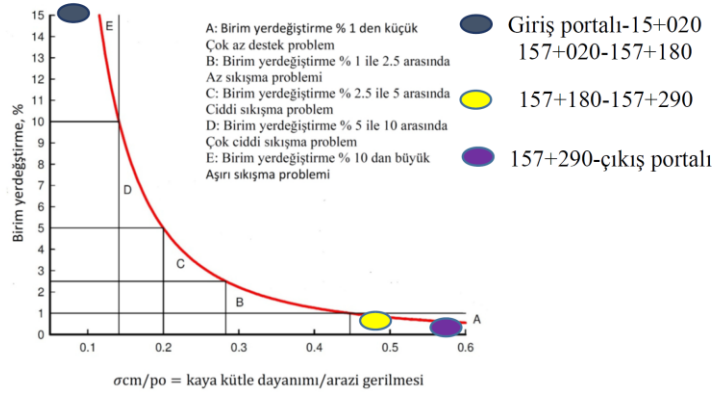
| Sıkışma derecesi | N_c değeri aralığı |
|------------------|----------------------|
| Yüksek | <0.4 |
| Orta | 0.4-0.8 |
| Hafif | 0.8-2 |
| Sıkışma yok | >2 |

Hoek ve Marinos [25] ise sıkışmayı birim yerdeğiştirme değerine karşılık kaya kütlelerinin arazi gerilme oranına bağlı olarak tanımlamıştır. Birim yerdeğiştirme değeri ise denklem 2 ile belirlenmiştir.

$$\varepsilon = 0.2 * (\sigma_{cm} / p_0)^{-2} \quad (2)$$

Desteksiz durumda sıkışma durumu ve destek sistemi önerileri ise Şekil 5’de verilmiştir.

Tablo 3’de Jethwa vd. [24] ve Hoek ve Marinos [25] a göre hesaplanan değerler sunulmuştur. Tünelin tamamında Jethwa vd. göre orta derecede sıkışma öngörülmektedir. Hoek ve Marinos [25]’a göre, giriş portalı ile km:157+180 arasında çok büyük sıkışma problemi olacağı belirtilmiştir. Bu kesimlerde tünel tavanı ve tünel aynasında şemsiye tipi süren ile ayna bulonlarının olması gerektiği vurgulanmıştır. Km:157+180 ile çıkış portalı arasında ise çok az stabilite problemleri ile karşılaşılabilirliği belirtilmiştir.



Şekil 5. Desteksiz durumda sıkışma durumu [25]

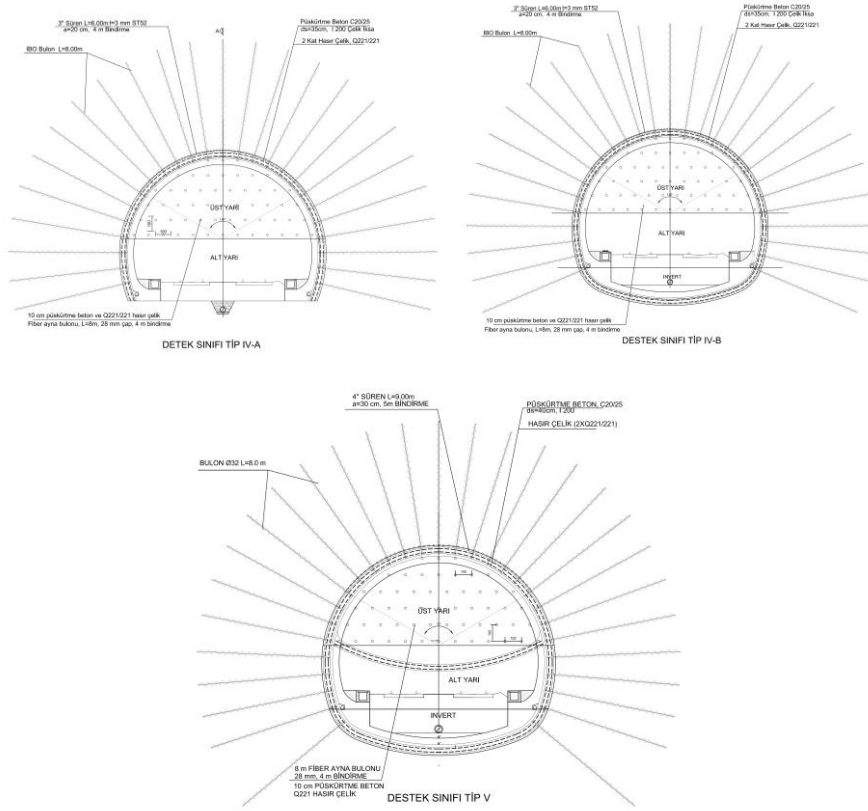
Tablo 3. Tünel sıkışma parametreleri

| Kilometre | Örtü yüksekliği (m) | σ_{cm} (MPa) | P_o (MPa) | Nc (Jethwa vd. (1984)) | ε (%) (Hoek and Marinos, 2000) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|-------------|------------------------|--|
| Giriş Portalı-157+020 | 30 | 0.036 | 0.72 | 0.05 | 80 |
| 157+020-157+180 | 30 | 0.036 | 0.72 | 0.05 | 80 |
| 157+180-157+290 | 24 | 0.482 | 0.624 | 0.772 | 0.33 |
| 157+290-Çıkış Portalı | 24 | 0.361 | 0.624 | 0.578 | 0.59 |

4. Destek Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Tünel destek sistemleri Şekil 6’da verilmiştir. Burada 3 ayrı destek sistemi uygulanmıştır. Tünel giriş portalı ile km:157+020 arasında taban koşullarının sağlam olması sebebi invertsiz tip olarak Tip IV-A destek sistemi, km:157+020 ile km:157+180 arasında ise tünelin tektonik zondan geçiyor olması sebebi ile Tip V destek sistemi, km:157+180 ile çıkış portal kesiminde ise tünel tabanının zayıf zonda kalması sebebi ile invertli Tip IV-B destek sistemi uygulanmıştır. Tip IV destek sisteminde RMR değerleri 24 ile 38 arasında değişmektedir. RMR değerinin 24 olduğu kesimde Tip IV-B invertli destek sistemi uygulanırken, RMR değerinin 35 ve 38 olduğu kesimde ise Tip IV-A invertsiz destek sistemi uygulanmıştır. Bu durum Aygar [23] tarafından belirtilen aynı kaya sınıfı içerisinde farklı destek sistemi uygulanabilir yorumuna uygun düşmektedir.

Tünel destek sistemlerinin incelenmesinde en kritik kesim olan km:157+040 ile 157+200 arası değerlendirilmiştir. Bu kesim çok zayıf kaya koşullarında açılmaktadır. Örtü yüksekliği ray üst kotundan itibaren 30 m'dir. Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı 0.36 MPa olarak hesaplanmıştır. Tünelin bu kesiminde uygulanacak olan destek sistemi detayları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Destek sistemi detayları-Tip IV-A, IV-B ve V

4.1. Destek sistemlerinin analitik yöntemler ile değerlendirilmesi

Tünel destek sistemlerinin belirlenmesi için Hoek ve Brown [26] tarafından verilen denklemler kullanılacaktır. Bu denklemler Tablo 4'de özetlenmiştir. Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, toplam yerdeğiştirme, plastik zon yarıçapı, birim yerdeğiştirme eşitlikleri ile hesaplanacaktır.

Km:157+040 ile km:157+180 arasında örtü yüksekliği 30 m olup, arazi gerilmesi $P_0=0.024 \cdot 30=0.72$ MPa olarak hesaplanmıştır. Bu kesimde kaya kütle dayanımı 0.036 MPa olup σ_{cm}/P_0 oranı ise 0.05 dir. Tünelin bu kesimi için kritik tünel basıncı P_{cr} ise 0.37 MPa'dır. Desteksiz durumda plastik zon yarıçapı ise tüm örtü yüksekliğini kapsamaktadır (Şekil 7). Bununla beraber tünel aynasında meydana gelen yerdeğiştirme ise 23 cm olarak bulunmuştur (Şekil 8). Tünel tasarımı için en önemli olan desteksiz durumda tünelde boyuna yönde meydana gelecek olan deformasyonların belirlenmesi gerekmektedir. Vlachopoulos ve Diedrichs [28] tarafından belirlenen denklemler yardımı ile boyuna deformasyon grafiği çizdirilmiştir (Şekil 8). Vlachopoulos ve Diedrichs [28]'e göre belirlenen hesaplamalar denklem 12 de gösterilmiştir. Burada tünel ayna önünde ve gerisinde desteksiz durumda meydana gelen yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda tünel aynasında 22.8 cm yerdeğiştirme, 1 m gerisinde 28 cm, 10 m gerisinde 68 cm, 30 m gerisinde ise 117 cm yerdeğiştirme meydana gelmiştir (Şekil 8).

Tablo 4. Kapalı sistem denklemleri [26] [27]

| | Denklem |
|-----------------------|---|
| σ_{cm} (3) | $\sigma_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$ |
| k (4) | $k = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$ |
| p_{cr} (5) | $P_{cr} = (2P_0 - \sigma_{cm}) / (1 + k)$ |
| u_{ie} (6) | $u_{ie} = r_0(1 + \nu)(p_0 - p_i) / E_m$ |
| r_p ($p_i=0$) (7) | $r_p = r_0 \left[\frac{2(p_0(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{k-1}}$ |
| u_{ip} (8) | $u_{ip} = \left(\frac{r_0(1 + \nu)}{E_m} \right) [2(1 - \nu)(p_0 - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1 - 2\nu)(p_0 - p_i)]$ |
| ε (9) | $\varepsilon \% = \left(\frac{u_i}{r_0} \right) \times 100 = [0.2 - 0.25 \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{2.4} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{-2}]$ |
| r_p (p_i) (10) | $\left(\frac{r_p}{r_0} \right) = (1.25 - 0.625 \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{0.57} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{-0.57})$ |

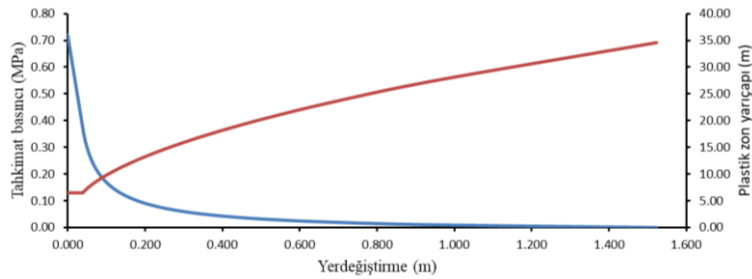
| | |
|-------------------------------------|---|
| r_p = Plastik zon yarıçapı | σ_1 = yenilme anındaki efektif eksenel gerilme |
| u_i = Yerdeğiştirme | σ_3 = Efektif Yanal gerilme |
| r_0 = Tünel yarıçapı | c' = kohezyon |
| p_i = Tahkimat basıncı | ϕ' = içsel sürtünme açısı |
| p_0 = arazi gerilmesi | ν = Poisson oranı |
| σ_{cm} = Kaya kütle dayanımı | |
| E_m = Deformasyon modülü | |

$$u_0^* = \frac{u_0}{u_{max}} = \frac{1}{3} e^{-0.15R^*}$$

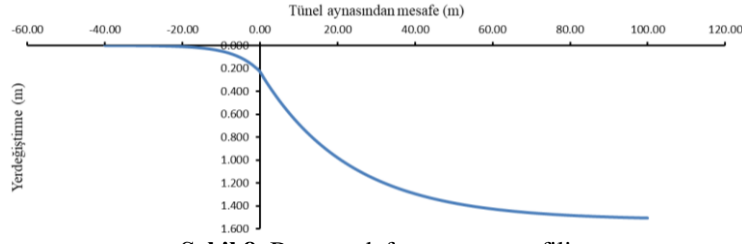
$$u^* = \frac{u}{u_{max}} = u_0^* e^{X^*} \quad \text{for } X^* \leq 0 \text{ (kaya kütleinde)} \quad (12)$$

$$u^* = 1 - (1 - u_0^*) e^{-\frac{3X^*}{2R^*}} \quad \text{for } X^* \geq 0 \text{ (tünelde)}$$

$$R^* = R_p / R_T$$



Şekil 7. Zemin reaksiyon eğrisi ve plastik zon yarıçapı



Şekil 8. Boyuna deformasyon profili

Tablo 5. Analitik çözüm sonuçları

| Kilometre | Örtü yüksekliği h (m) | Kaya kütle tek eksenli basınç dayanımı (MPa) | Arazi gerilmesi (MPa) P_0 | σ_{cm}/P_0 | Plastik zon yarıçapı r_p (m) | Tünel ayna deformasyonu u u_{if} (cm) | Kritik tahimat basıncı P_{cr} (MPa) |
|-------------------|-----------------------|--|-----------------------------|-------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|
| 157+040 - 157+200 | 30 | 0.036 | 0.72 | 0.05 | 35 | 22 | 0.37 |

Tünel destek sistemlerinin kapasitelerini belirleme için Hoek [27] tarafından verilen denklemler kullanılmıştır (Tablo 6). Hesaplanan değerler ise Tablo 7’de verilmiştir.

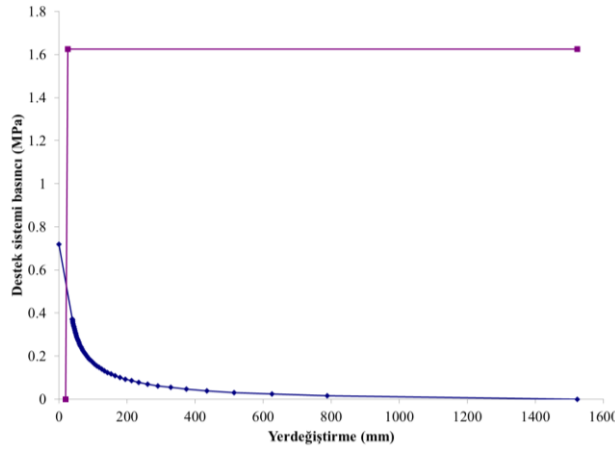
Tablo 6. Tahkimat kapasitesi denklemleri [26]

| Destek sistemi özellikleri | Denklem |
|--|---|
| <p>Çelik iksa</p> <p>σ_{ys}: Çeliğin akma dayanımı (MPa)</p> <p>E_s: Çeliğin elastisite modülü (MPa)</p> <p>A_s: Kesit alanı (m²)</p> <p>s_1: Tünel eksenli boyunca mesafe (m)</p> <p>r_0: Tünel yarıçapı (m)</p> <p>P_{ssmaks}: Maksimum destek basıncı</p> <p>K_{ss}: Rijitlik</p> | $P_{ssmaks} = (A_s \sigma_{ys}) / (s_1 r_0^2)$ $K_{ss} = (E_s A_s) / (s_1 r_0^2)$ |
| <p>Kaya bulonu</p> <p>d_b: Bulon çapı (m)</p> <p>l: Bulon veya ankrajın serbest uzunluğu (m)</p> <p>E_s: Bulon Elastisite modülü (MPa)</p> <p>s_c: Çevresel yönde bulon aralığı (m)</p> <p>s_1: Boyuna yönde bulon aralığı (m)</p> <p>T_{bf}: Bulon nihai yük</p> <p>P_{sbmaks}: Maksimum destek basıncı</p> <p>K_{ss}: Rijitlik</p> | $P_{sbmaks} = (T_{bf}) / (s_1 s_c)$ $K_{sb} = (E_s \pi d_b^2) / (4 s_1 s_c)$ |
| <p>Püskürtme beton</p> <p>σ_{cc}: Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)</p> <p>E_c: Elastisite modülü (MPa)</p> <p>ν: Poisson oranı</p> <p>t_c: Kaplama kalınlığı (m)</p> <p>R_0: Tünel yarıçapı (m)</p> <p>P_{scmaks}: Maksimum destek basıncı</p> <p>K_{ss}: Rijitlik</p> | $P_{scmaks} = \sigma_{cc} / 2 (1 - (r_0 - t_c) / r_0^2)$ $K_{sc} = (E_c (r_0^2 - (r_0 - t_c)^2) / (2(1 - \nu^2) / (r_0 t_c) r_0^2)$ |

Tablo 7. Dış destek tahkimat basınçlar ve rijitlik değerleri

| Tahkimat tipi | p_{smaks} (MPa) | K_s (MPa/m) |
|--------------------------------|-------------------|---------------|
| Püskürtme beton ($d_s=40$ cm) | 1.19 | 285 |
| Çelik iksa (I 200) | 0.188 | 16.36 |
| Bulon (8 m, IBO) | 0.25 | 20.810 |

Çelik iksa, püskürtme beton ve bulonlardan oluşan destek sisteminin toplam basıncı $P_t = 1.19+0.188+0.25=1.625$ MPa, rijitlik değeri ise $K_s=285+16.36+20.81=322.2$ MPa/m, deplasman kapasitesi $u=P/k=1.625/322=5.05 \times 10^{-3}$ m, deformasyon oranı (%) $\delta: u_{rmaks} / r_o = 5.05 \times 10^{-3} \text{ m} / 6.5 \text{ m} = \%0.76$ (u_{rmaks} : maksimum yer değiştirme; r_o : tünel yarıçapı) olarak hesaplanmıştır. Zemin ve destek sistemi reaksiyon eğrisi Şekil 9'da çizdirilmiştir. Plastik bölgenin yarıçapı 6.5 m olup, tünelde oluşan maksimum deformasyon toplam 22.1 mm olarak hesaplanmıştır. Güvenlik faktörü 3.1 olarak hesaplanmıştır.

**Şekil 9.** Zemin ve destek reaksiyon eğrisi

5. Sonuçlar

Yapılan çalışma kapsamında desteksiz durumda tünelde ciddi sıkışma probleminin olduğu ve plastik zonun tüm örtü yüksekliğini kapsadığı belirlenmiştir. Tünel tavanında yapılan uzun şemsiye tipi sürenler ile tünel aynasında yapılacak olan uzun fiber bulonlar ile tünel stabilitesi ana destekler yapılanaya kadar stabiliteyi sağlamalıdır.

Zayıf zeminlerde tünel kazısına başlamadan önce süren ve ayna bulonları hemen yapılmalıdır. Tünelde herhangi bir yenilmeye imkan verilmemelidir.

Destekli durumda plastik zon yarıçapı 6.5 m ye kadar düşmektedir. Ayrıca tünelde meydana gelen deformasyonlar ise 22 mm düzeyinde kalmıştır. Bu durum zayıf zeminlerde rijit bir tahkimatın gerekli olduğunu da göstermektedir. Aksi takdirde deformasyon trendi çok hızlı gelişecek ve tünelde plastik zonun artmasına da sebebiyet verecektir.

Destek ve zemin reaksiyon eğrisinden de (Şekil 9) görüleceği gibi, tünelde destek sistemleri öncesinde deformasyonlar en az düzeyde tutulmalıdır. Destekler hemen kazıdan sonra yapılarak tünel ringi minimum sürede kapatılmalıdır. Destek sistemlerinin gecikmesi durumunda destek-zemin reaksiyon eğrisinden de görüleceği gibi deformasyonlar çok hızlı gelişmektedir. Bu durumda tünelde göçüğe neden olabilecektir.

T10 tüneli zayıf zeminlerde açılmış sığ bir tüneldir. Tünel kritik tahkimat basıncı 0.37 MPa dır. Tünelde uygulanacak olan destek basıncı 1.6 MPa olup, kritik basıncın 5 katına yakındır. Zira tünel üzerinde kemerlenecek olan bir örtü de yoktur. Bu sebeple tahkimat basıncının yüksek

olması gerekmektedir. Jethwa vd. [24] öngörülerin sıkışan zeminlerde tahkimat basıncı kritik basınçtan en az 2-3 kat fazla olmalıdır görüşüne uymaktadır.

Aynı kaya sınıfı içinde farklı destek sistemleri kullanılmıştır. Giriş portalı ile km:157+020 arası ve km:157+180 ile çıkış portalı arası Tip IV kaya sınıfı olarak belirlenmiş olmasına rağmen Tip IV-A ve Tip IV-B tipi destek sınıfları belirlenmiştir.

Zayıf ve çok zayıf kayalarda belirlenen destek sistemlerinde tünel aynasına 1.0x1.0 m kare alanında fiber bulonlar önerilerek tünel aynası desteklenmiştir.

Tünel tavanı ise 3" ve 4" çaplarında şemsiye tipi süren uygulamaları ile tavanda oluşabilecek olan dökülmeler ve kaymalar önlenmiştir. Zira tavanda meydana gelebilecek bir göçmenin örtü yüksekliğinin az olması sebebi ile yüzeye kadar yansıma olasılığı vardır.

Belirlenen destek sistemleri Hoek ve Marinos [25] tarafından önerilen destek elemanları ile uyumludur.

Zayıf zeminlerde ve sıkı örtü altında açılan tünellerde ring kapama işlemi hemen yapılmalı ve tünelde deformasyonların sönümlenmesi beklenilmeden iç kaplama betonu yapılarak tünel stabilitesi sağlanmalıdır. Aksi takdirde uzun dönemde sıkışmaya bağlı olarak oluşabilecek deformasyonlar geçici tahkimatlarda ciddi sıkıntılara sebebiyet verecektir.

Tünel destek sistemleri belirlenirken zemin davranışının çok iyi belirlenmesi gerekir. Belirlenecek destek sistemleri ile destek reaksiyon eğrisi ile optimum destek basıncı belirlenmelidir.

Zayıf zeminlerdeki en önemli handikap tünel kazısından sonra tünel aynasında destek elemanları yapıldıkça kadar geçen sürede oluşan deformasyonlardır. Bu durumun önüne geçilmesi için ayna bulonları ve şemsiye tipi sürenler ile ayna stabilitesini kısa dönemde sağlamalıdır.

Kaynakça

- [1] Z.T. Bieniawski, "Engineering classification of jointed rock masses," *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, 335-344. 1973.
- [2] Z.T. Bieniawski, "Rock mass classification in rock engineering," *In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski)* 1, 97-106. Cape Town: Balkema. 1976.
- [3] Z.T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley. 1989.
- [4] N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support," *Rock Mech.* 6(4), 189-239. 1974.
- [5] N. R. Barton, F. Løset, R. Lien, J. Lunde, "Application of the q-system in design decisions," *In Subsurface space, (ed. M. Bergman)* 2, 553-561. New York: Pergamon.1981.
- [6] N.Barton, "Application of q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses," *In Workshop on Norwegian Method of Tunnelling*, pp. pp 66-84, New Delhi, India,1993.
- [7] L.v Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part One," *Water Power*, pp 453-457, 1964.
- [8] L.v. Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part Two," *Water Power*, pp 511-515, 1964.
- [9] L.v. Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part Three," *Water Power*, pp 19-24, 1965.
- [10] L.v. Rabcewicz, J. Golser, "Principles of dimensioning the supporting system for the "new austrian tunnelling method," *Water Power*, Marc, 88-93. 1973.
- [11] L. Müller, "Removing misconceptions on the new austrian tunnelling method," *Tunnels & Tunnelling International*,10(8):29-32. 1978.
- [12] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, "Ankara-istanbul yüksek hızlı tren projesi, t13 tüneli fay zonunda karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri ankara-istanbul high speed railway project, the problems encountered at t13 tunnel fault zone and solution suggestions," *IMCET 2019 / Antalya / Turkey / April 16. 19, Proceedings 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, 2019.

- [13] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, "Problems encountered during a railway tunnel excavation in squeezing and swelling materials and possible engineering measures: a case study from turkey," *Sustainability*, 12, 1166, <https://doi.org/10.3390/su12031166>, 2020.
- [14] E.B. Aygar, "Evaluation of new austrian tunnelling method applied to bolu tunnel's weak rocks," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 541-546, 2020.
- [15] E.B. Aygar, C. Gokceoglu, "Effects of portal failure on tunnel support systems in a highway tunnel." *Geotech Geol Eng*, 39, 5707-5726. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01859-z>. 2021
- [16] C.O. Aksoy, K. Ogul, I. Topal, S.C.Ozer, V. Ozacar, E. Posluk, "Numerical modelling of non-deformable support in swelling and squeezing rock," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 52, 61-70, doi:10.1016/j.ijrmm.2012.
- [17] E.B. Aygar, S.Karahan, S. Gullu, C. Gokceoglu, "Analytical and numerical analyses of the support system for a large-span tunnel in challenging and seismically active ground conditions," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00251-5>.2022.
- [18] G. Barla, "Full face excavation of large tunnels in difficult conditions," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, <http://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.003>.2015.
- [19] E. Hoek, "Tunnel support in weak rock," *In: Symposium of Sedimentary Rock Engineering*, 631, 1-13. 1998.
- [20] G. Barla, "Tunnelling under squeezing rock conditions," *Tunnelling Mechanics-Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling*, 2011.
- [21] P. Linardi, "Design and construction tunnels-ADECO-RS approach," *Tunnels and Tunnelling Internations, Special Supplement May*, 2000.
- [22] P.Lunardi, R. Bindhi, "The evaluation of reinforcement of the advance core using fiber glass elements for short and long term stability of tunnels under difficult stress-strain conditions: design, technologies and operating methods," *Progress in Tunnelling after 2000, AITES-ITA 2011 World Tunnel Congress*, 2, 309-322. 2001.
- [23] E.B. Aygar, "Tünel projelendirilmesinde kullanılan yöntemler (ampirik, analitik ve nümerik yöntemler), kısıtlamaları, karşılaştırılması ve öneriler," *Demiryolu Mühendisliği*, doi:10.47072/demiryolu.1030404.2022
- [24] J.L. Jethwa, A.K. Dube, B.Singh, B.Sing, "Squeezing problems in Indian tunnels," *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 1984.
- [25] E. Hoek, P. Marinis, "Predicting tunnel squeezing," *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2 – December, 2000.
- [26] E. Hoek, E.T. Brown, "Underground excavations in rock," *London:Instn Min. Metall*, 1980.
- [27] E.Hoek. "Rock support interaction analysis for tunnels in weak rock masses," <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/rocnews/winter2012/Rock-Support-Interaction-Analysis-for-Tunnels-Hoek.pdf>. 2012.
- [28] N. Vlachopoulos, M.S. Diedrichs, "Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels," *Rock.Mech.&Rock Eng*.42:2,131-136. 2009.

Özgeçmiş



Ebu Bekir AYGAR

Ebu Bekir Aygar, 1973 Ankara doğumlu olup, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde 1996 Lisans, 2000 Yüksek Lisans ve 2007 de Doktora eğitimini tamamlamıştır. Fugro Sial Müş. ve Müh. Ltd. şirketinde 2009 yılından itibaren Tünel Tasarım Bölüm Müdürü olarak görev yapmaktadır. Uzmanlık alanı olarak Tünelcilik, NATM, Kaya Mekaniği, Nümerik Analizler olarak sıralanabilir. Yazarın ulusal ve uluslararası olmak üzere yayınları mevcuttur. Yazar Türkiye’de ve yurtdışında farklı yüksek hızlı demiryolu ve karayolu tünel projelerinde proje müdürü olarak çalışmıştır.
E-Posta: eaygar@gmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Çevresel Koşulların Katener Sistemi Üzerindeki Etkisi

Cengiz Görkem ELA^{*ID}, Abdurrahman KARAMANCIOĞLU^{ID}

Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği, Eskişehir, Türkiye

**c.gorkemela@gmail.com*

(Alınış/Received: 19.09.2022, Kabul/Accepted: 27.10.2022, Yayınlanma/Published: 31.01.2023)

Öz: Katener sistemi hesaplamalarında girdileri oluşturan coğrafi ve iklimsel değişkenlerin kontrolü elimizde değildir. Ancak doğru hesaplamalar sonucu elde edilecek bulgular ile sistemin daha güvenli ve konforlu çalışmasını mümkün kılmak elimizdedir. Çevresel koşulların katener sistemi üzerindeki etkisi iyi bir şekilde incelenmesi takdirde sistemin olası arızalarını önleme, daha doğru maliyet analizi yapabilme ve güvenli bir tasarım yapabilme imkanlarını sağlar. Bu amaç doğrultusunda, bu makalede çevresel koşulların katener sistem tasarımına etkileri ele alınmıştır. Çevresel koşullar olarak adlandırdığımız rakım, sıcaklık, rüzgar ve buz değişkenlerinin katener sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Rüzgar hızına bağlı olarak direk açıklıklarının ve dezeksman değerlerinin doğru seçilmemesi sonucu seyir teli ile pantograf temasının kesilebileceği sonucu vurgulanmıştır. Üç ilden toplanan iklimsel veriler bir arada girdi olarak kullanılıp özet sonuç çizelgeleri oluşturulmuştur. Özet çizelgeler maliyet açısından karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Katener, Elektrifikasyon, Elektrikli Demiryolu Tasarımı, Çevresel Koşullar, Raylı Sistemler Mühendisliği

Analysis of External Factors on Catenary System

Abstract: It is not possible to control the geographical and environmental conditions which are inputs of catenary system design. However, it is possible to enable operate the system more safely and comfortably with the results of correct calculations a proper design. If the effect of environmental conditions on the catenary system is well examined, it provides the opportunity to prevent possible failures of the system, to make a more accurate cost analysis and to make a safe design. For this purpose, the effects of environmental conditions, namely, the effects of altitude, temperature, wind and ice variables, on the catenary system are discussed in detail in this article. It has been emphasized that the contact of the contact wire and the pantograph may be cut off as a result of incorrect selection of the span and stagger values depending on the wind speed. Climatic data collected from three cities were used as input together and summary result tables were created. Summary charts are interpreted by comparing them in terms of cost.

Keywords: Catenary, Electrification, Electrified Railway Design, Environmental Conditions, Railway Systems Engineering

1. Giriş

Küreselleşmeye giden dünya düzeninin bir sonucu olarak giderek artan yük taşımacılığı ve artan nüfus sonucu oluşan yolcu taşımacılığı talepleri ulaşım sektöründeki gelişmeleri kaçınılmaz kılmaktadır. Konforlu, hızlı ve güvenli olmasından dolayı dünyada ve ülkemizde son dönemlerde demiryolu sektörüne ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Çağımızın teknolojisi kullanılarak yapılan bu yatırımların büyük bir çoğunluğu elektrikli demiryolu yapım işleri veya mevcut hatların elektrikleştirilmesi işleridir. Ekonomik olan elektrikli demiryolu sistemleri sayesinde daha az enerji harcayarak daha hızlı ve daha hacimli taşımacılık yapılabilmektedir. Bu özellik, elektrikli demiryolu sistemine doğa dostu olma özelliğini de beraberinde getirmektedir. Avrupa demiryolları için yolcu-km ve ton-km ile ilgili çevresel hedefler, toplam CO² emisyonlarını 2050 yılına kadar % 50 oranında azaltmak üzerine belirlenmiştir. Bir dizel trenin her 1,2 lt yakıt tüketmesi sonucunda yaklaşık olarak 26,5 g CO² ürettiği tahmin edilmektedir [1]. Dizel trenlere

kıyasla daha çevre dostu olan elektrikli trenler, CO² emisyonlarının azaltılması hedefine ulaşmada baş role sahip olacaklardır.

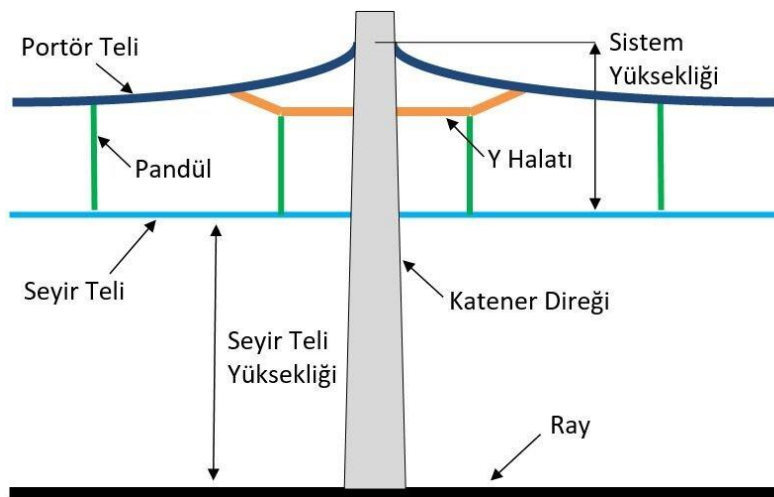
J. Octavio, C. Rebollo, A. Carnicero; hazırlamış oldukları makalede 1x25kV ve 2x25kV A.C. beslemeli katener sistemini ve bu sistemler için gerekli olan alt yapı elemanlarını incelemiştir. Seyir teli, portör teli, açıklık vb. gibi katener terimlerini açıklamıştır. Katener sisteminde oluşan dinamik hareketleri, temas kuvvetini ve seyir teli yükselmesi durumlarını detaylandırarak çeşitli hızlara göre dinamik simülasyon sonuçlarına yer vermiştir [2].

M. Tutucu ve N. Güzel, hazırlamış oldukları makalede binlerce ampere ulaşabilecek akımın, geri dönüş devresi içerisinde akması sonucunda işletme esnasında raylarda ve araçların iletken kısımlarında gerilime sebep olabileceğinden bahsetmiştir. Çalışmalarında bir yüksek hızlı tren elektrifikasyon sistemi için topraklama ve geri dönüş devresi tasarlamış, temas gerilimi değerleri hem arıza hem de işletme koşulları için bilgisayar simülasyonu ile hesaplamışlardır. Geri dönüş devresinin farklı bağlantıları için elde edilen simülasyon sonuçlarını çalışma içerisinde göstermişlerdir [3].

Katener sistemi inşa edilecek bölgenin çevresel koşulları yeterince iyi analiz edilmediği takdirde istenmeyen durumlar oluşabilir. Örneğin, seyir teli ile demiryolu aracı arasındaki temas kesilebilir, bu durum hem elektriksel hem de mekanik açıdan arızalara neden olabilir. Rüzgar ve buz yükü hesapları doğru yapılmadığı takdirde direk ve temel tipleri hatalı seçilebilir ve tasarım ve maliyet açısından mağduriyet oluşabilir.

2. Metot

Seyir teli pantografin temas etmesi ile enerjiyi demiryolu aracına aktaran iletkenidir. Portör teli hem seyir telini mekanik açıdan taşır hem de elektriksel açıdan hattaki akım taşınırken seyir teline yardımcı olur. Seyir teli ve portör teli birbirine belirli aralıklarla pandül adı verilen iletkenlerle bağlanır. Pandüller, seyir teli ve portör teli arasındaki mekanik bağlantıyı sağlarken aynı zamanda seyir ve portör telleri arasındaki akım geçişinin yapılmasını sağlar. Seyir teli ve portör teli arasındaki mesafeye sistem yüksekliği denir. Y halatı olarak adlandırılan iletken ise iki direk arasındaki orta açıklık ve destek alanı arasındaki gerginlik farkını dengelemek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 1’de sistem yüksekliği ve katenerin diğer ana bileşenleri görülmektedir.



Şekil 1. Katener ana bileşenleri

Pantograf üzerindeki karbon şeritlerin düzgün bir şekilde aşınmasını sağlamak için seyir telinin hat ekseninden içeri ve dışarı çektirilmesi suretiyle dezeksman değerleri oluşturulmaktadır. Seyir

telinin hat ekseninden direğe doğru çektilmesi (-) negatif dezeksman, seyir telinin hat ekseninden direğe ters yönde itilmesi (+) pozitif dezeksman olarak adlandırılır.

2.1. Rakımın katener sistemi üzerindeki etkisi

Katener sistemi hesaplamalarında hava yoğunluğu, dinamik rüzgar basıncını doğrudan etkilediğinden dolayı önemli bir detaydır. Hava yoğunluğu, atmosferdeki birim hacimdeki hava kütlesi olarak tanımlanmaktadır. Havanın yoğunluğu, sıcaklığa ve hava basıncına bağlıdır. Hava basıncı, rakım ile ters hava yoğunluğu ile ise doğru orantılı değişkenlik göstermektedir. Sıcaklığın sabit olduğu düşünülürse, yükseklik arttıkça basınç düştüğü için hava yoğunluğu da düşmektedir. Hava yoğunluğu, EN 50119 uyarınca Denklem 1. ile hesaplanmaktadır [4]:

$$\rho = 1,225 \frac{288}{T} e^{-1,2 \cdot 10^{-4} \cdot H} \quad (1)$$

Burada; ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3), T sıcaklığı (K) ve H rakımı (m) göstermektedir.

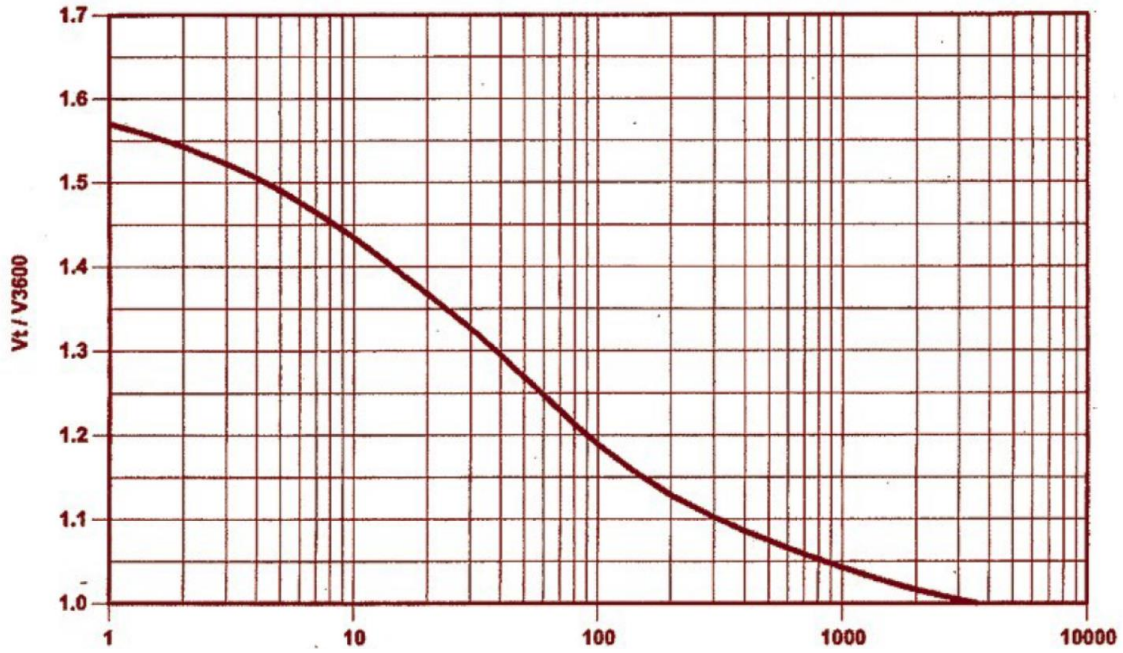
Rakımı yüksek bir yere katener sistemi kurulmak istenmesi durumunda hava yoğunluğu daha az olacağı için rüzgar basıncı ve dolayısıyla sisteme etki eden rüzgar kuvveti rakımı düşük olan yere kıyasla daha az olacaktır.

2.2. Sıcaklığın katener sistemi üzerindeki etkisi

Katener sistemi hesaplamalarında önemli bir yere sahip olan hava yoğunluğunun diğer değişkeni sıcaklıktır. Hava yoğunluğu sıcaklık ile ters orantılıdır. Bir numaralı formülde görüleceği üzere hava basıncının yani rakımın sabit olduğu düşünülürse; sıcaklık arttıkça hava yoğunluğu azalmaktadır, sıcaklık azaldıkça hava yoğunluğu artmaktadır.

2.3. Rüzgarın katener sistemi üzerindeki etkisi

Rüzgar yükü, dinamik rüzgar basıncının sistem elemanları üzerindeki etkisidir. Rüzgar herhangi bir yönden herhangi bir açı ile esebilir fakat hesaplamalar sırasında incelenen elemana göre en kritik senaryo düşünülmelidir. Katener sisteminde iletkenler, direkler ve çelik konstrüksiyonlar (portal, yarım portal vb.) üzerindeki rüzgar yükü dikkate alınmalıdır. Dinamik rüzgar basıncı hesaplamalarında rüzgarın en etkin $+5^\circ\text{C}$ 'de meydana geldiği göz önünde bulundurularak hava yoğunluğu hesaplanmaktadır [4]. Dinamik rüzgar basıncı hesabının diğer bir girdisi ise rüzgar hızıdır. Rüzgar hızı olarak hesaplama yapılacak bölgede son 50 yılda gerçekleşen 10 metre yükseklikteki 10 dakikalık periyoda sahip ortalama rüzgar hızı (m/sn) verilerinden en yüksek olanı alınmaktadır [5]. On dakikalık periyotta olmayan verilerin dönüştürülmesi gerekmektedir. Periyot dönüştürme işlemi Şekil 2'de verilen "Durst Eğrisi" yardımıyla yapılabilir [6].



Şekil 2. Durst eğrisi [5]

Örnek olarak, üç saniyelik periyot ile ölçülmüş en fazla rüzgar hızı $V_3:33$ m/sn ise, Durst Eğrisinden $V_3/V_{3600}=1,53$ oranı elde edilir, Böylece $V_{3600}=21,6$ m/sn değeri bulunur, 10 dk'lık periyot ($10.60=600$ sn) için Durst Eğrisinden $V_{600}/V_{3600}=1,09$ oranı bulunur. Böylece $V_{600}=23,55$ m/sn değeri hesaplanır.

Bir akışkan olan havanın rüzgar etkisiyle teller ve diğer yapı elemanları üzerinde oluşturduğu hava basıncına “Dinamik Rüzgar Basıncı” denir. Dinamik rüzgar basıncı Denklem 2. ile hesaplanmaktadır [7]:

$$q_p(z) = (1 + 7 I_V(z)) \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_m^2(z) \quad (2)$$

Burada; $I_V(z)$ türbülans yoğunluğunu, ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3) ve $V_m(z)$ ortalama rüzgar hızını (m/sn) göstermektedir.

Yuvarlak kesitli d çaplı bir iletken üzerindeki birim rüzgar kuvveti Denklem 3. ile hesaplanmaktadır [4]:

$$q_{WC} = q_p \cdot G_C \cdot d \cdot C_C \cdot \cos^2 \phi \quad (3)$$

Burada; q_{WC} iletkene etkiyen birim rüzgar kuvvetini (N/m), q_p dinamik rüzgar basıncını (N/m^2), G_C yapısal tepki faktörünü (0,75), d iletken çapını (m), C_C Çekme faktörünü (1), Φ geliş açısını (0° -Rüzgar kuvveti en fazla hatta dik durumda oluşmaktadır) göstermektedir.

Yapılara etkiyen rüzgar kuvveti Denklem 4. ile hesaplanmaktadır [4]:

$$Q_{Wstr} = q_p \cdot G_{str} \cdot A_{str} \cdot C_{str} \quad (4)$$

Burada; Q_{Wstr} yapıya etkiyen rüzgar yükünü (N), q_p dinamik rüzgar basıncını (N/m^2), G_{str} yapısal rezonans faktörünü (1), A_{str} rüzgar etki alanını (m^2), C_{str} çekme faktörünü (Katener direkleri için 1,4) göstermektedir.

Direk açıklıkları, kurp yarıçapına, tellere uygulanan gerdirme kuvvetine, rüzgar hızına ve dezeksman değerlerine bağlıdır. En yüksek direk açıklığı aliyman (kurpsuz) kısımlarda kullanılmaktadır. Aliyman hesaplamalarda “999999” olarak sayısallaştırılmaktadır. Kurplar, farklı doğrultudaki doğru yolları birleştiren, yolun eğri kısımlarıdır. Aliyman olan yol ikinci bir aliyman ile kesiştiğinde demiryolu araçları köşeli olan bu kısımdan geçemeyeceği için ancak adına kurp (eğri/viraj) denilen yollar ile geçebilir. Kurp değeri küçüldükçe iki destek noktasındaki açıklık değeri de küçültülmektedir. Uygun şartlarda işletmenin sağlanabilmesi için katener sistemi tasarımında kullanılan direk açıklığı Denklem 5. ile hesaplanmaktadır [8]:

$$c = \sqrt{8R \cdot Z_f \cdot (U_N + U_{\max}) / [(q_w \cdot e \cdot A \cdot R) + Z_f]} \quad (5)$$

Burada; R kurp değerini (999999 m, 2500 m vb.), Z_f seyir ve portör teli germe kuvvetleri toplamını (N), U_N destek noktasındaki seyir telindeki sapmasını (m), U_{\max} açıklıktaki en fazla seyir teli sapma değerini (m), q_w dinamik rüzgar basıncını (N/mm²), e çekme faktörünü (1,25), A seyir ve portör teli çapları toplamını (m) göstermektedir.

Katener hattı tellerine rüzgar sebebiyle kuvvet uygulandığında telleri yatay olarak saptırır ve bir şişme meydana getirir. Oluşan yatay sapma rüzgar yüküyle doğru orantılı teldeki gerilmeyle ters orantılıdır. Seyir telindeki kabul edilebilir sapma, pantograf çalışma aralığıyla sınırlanmıştır. Katener hattı, yatay sapmayı izin verilen sınırlar içinde tutmayı ve yukarıda belirtilen faktörler değerlendirilerek pantografin telden çıkmamasını sağlamak üzere tasarlanır [9].

Sıfır çizgisi ile pantograf eksenindeki fark (c_r) Denklem 6. ile hesaplanır:

$$c_r = (x \cdot (x - l)) / (2 \cdot R) \quad (6)$$

Burada; c_r sıfır çizgisi ile pantograf eksenindeki farkı (m), x istenen konumu (m, en fazla sapmayı bulmak için 1/2 olarak hesaba dahil edilir.), l açıklığı (m), R kurp değerini (m) göstermektedir.

Pantograf çalışma uzunluğu (N), pantograf yanal salınımlarından (r) kaynaklı olarak azalan pantograf üzerindeki kullanılabilir alandır. İlk önce Denklem 7. ile pantografin hat merkezinden ne kadar saptığı hesaplanır. Daha sonra Denklem 8. ile pantograf yanal sapması elde edilir. Son olarak Denklem 9. ile pantograf çalışma uzunluğu bulunur [9]:

$$L = 0,74 + (0,04 \cdot H) + (0,15 \cdot H \cdot C) - (0,075 \cdot C) + (2,5/R) \quad (7)$$

$$r = L - D \quad (8)$$

$$N = T - r \quad (9)$$

Burada; L pantografin hat merkezinden sapmasını (m), H en yüksek seyir teli konumunu (m, nominal seyir teli yüksekliği + uplift), C deveri (m), R kurp değerini (m), r pantografin yanal hareketini (m), D yarı pantograf uzunluğunu (m), N pantografin çalışma uzunluğunu (m), T yarı iletken şerit uzunluğunu (m) göstermektedir.

Rüzgar yükü olmadığı durumda, “x” m uzaklıktaki sıfır çizgisi ile seyir teli arasındaki mesafe “ c_s ” olarak tanımlanmıştır ve Denklem 10. ile hesaplanmaktadır [9]:

$$c_s = S_b + ((S_a - S_b) \cdot x) / l \quad (10)$$

Burada; c_s sıfır çizgisi ile seyir teli arasındaki farkı (m), S_b önceki dezeksmanı (m), S_a sonraki dezeksmanı (m), x istenen konumu (m), l açıklığı (m) göstermektedir.

Rüzgar yükü sebebiyle oluşan, “x” m uzaklıktaki sıfır çizgisi ile seyir teli arasındaki mesafe “ e_w ” olarak tanımlanmıştır ve Denklem 11. ile hesaplanmaktadır, (+) yönde ve (-) yönde oluşan rüzgar yükü sapmaları Denklem 12. ve Denklem 13. ile bulunmaktadır [9]:

$$e_w = [(Q_{WCc} + Q_{WCm}) \cdot x \cdot (1 - x)] / (2 \cdot T) \quad (11)$$

$$+e = c_s + e_w \quad (12)$$

$$-e = c_s - e_w \quad (13)$$

Burada; +e (+) yöndeki sıfır çizgisi ile seyir teli arasındaki toplam farkı (m), -e (-) yöndeki sıfır çizgisi ile seyir teli arasındaki toplam farkı (m), e_w rüzgar yükü altında seyir teli sapmasını (m), c_s sıfır çizgisi ile seyir teli arasındaki farkı (m), Q_{WCc} seyir teline etkiyen rüzgar yükünü (N/m), Q_{WCm} portör teline etkiyen rüzgar yükünü (N/m), X istenen konumu (m), L açıklığı (m) T seyir ve portör teli toplam gergi kuvvetini (N) göstermektedir.

Limit değerler, “ c_r ” ve “N” kombinasyonları olarak tanımlanabilir. Seyir telinin bu aralık içerisinde kalması gerekmektedir. Limit değerler, Denklem 14., Denklem 15., Denklem 16. ve Denklem 17. ile elde edilmektedir [9].

$$+limit = c_r + N \quad (14)$$

$$-limit = c_r - N \quad (15)$$

$$-limit < +e < +limit \quad (16)$$

$$-limit < -e < +limit \quad (17)$$

2.4. Buzun katener sistemi üzerindeki etkisi

Açık arazide bulunan iletkenler, direkler ve tesisler havanın soğumasıyla buzlanmaya maruz kalırlar. Buzlanma katener sistemini ağırlık ve alan artışı olacak şekilde etkilemektedir. Birim buz ağırlığı Denklem 18. ile elde edilmektedir [10]:

$$G_b = k \cdot \sqrt{d} \quad (18)$$

Burada; G_b iletken etkiyen birim buz ağırlığını (kg/m), d iletken çapını (mm), k buz bölgesi katsayısını (Birinci buz yükü bölgesi için 0; İkinci buz yükü bölgesi için 0,2; üçüncü buz yükü bölgesi için 0,3; dördüncü buz yükü bölgesi için 0,5; beşinci buz yükü bölgesi için 1,2) göstermektedir.

İletkendeki buz ağırlığı hesaplandıktan sonra iletkenin buzlu durumdaki toplam ağırlığını bulmak için iletkenin kendi ağırlığının da hesaba dahil edilmesi gerekmektedir.

Buz yükü hesaplanırken, buz tabakasının iletken boyunca silindirik olarak iletken etrafında olduğu kabul edilmektedir. Buz tabakasının iletkenin etrafını kaplamasıyla birlikte iletken, kendine tesir eden rüzgar yükleri açısından daha büyük bir çapa sahip olur. Bu yüzden bu durumdaki iletkenlere etkiyen rüzgar kuvvetinin hesabı için öncelikle, iletkenin buzla kaplı haldeki çapının belirlenmesi gerekmektedir. Buzla kaplı haldeki iletken üzerinden rüzgar yükünün değerlendirilmesi gerekir. Buz ve rüzgar yüklerinin ortak olarak düşünüldüğü yük kombinasyonunda (EN 50119 Yük Durumu D), belirtildiği üzere rüzgar yükünün yarısı hesaba katılmaktadır. Buzlu durumdaki iletken çapı Denklem 19. ile elde edilmektedir [4]:

$$D = \sqrt{d^2 + 4 \cdot k / (\pi \rho)} \quad (19)$$

Burada; D buzlu durumda iletken çapını (mm), d iletken çapını (mm), k buz bölgesi katsayısını, ρ buz yoğunluğunu (kg/m³, 600 kg/m³ alınır) göstermektedir [11].

3. Bulgular

Bu bölümde Türkiye Buz Yükü Haritasından [10] seçilen üç farklı buz yükü bölgesi için yapılan hesaplama sonuçları yer almaktadır. Hesaplamalarda çevresel koşullar haricindeki değerler üç il için de sabit tutularak tipik değerler seçilmiştir. Birinci buz yükü bölgesinden Osmaniye ili, ikinci buz yükü bölgesinden Eskişehir ili, dördüncü Birinci buz yükü bölgesinden ise Kırklareli ili seçilmiştir. Birinci buz yükü bölgesinde buz oluşumu beklenmemektedir. Bu nedenle sadece rüzgar yükünün olduğu durum düşünülerek hesaplama yapılmıştır. İkinci ve dördüncü buz yükü bölgesinde buz yükü oluşmaktadır. Buz yükünün olduğu durumda rüzgar yükü “EN 50119 Standardı Yük Durumu D”ye göre yarıya indirilmiştir. Seçilen üç ile ait meteorolojik veriler Tablo 1’de yer almaktadır. Tablo 1’de 5 sn’lik periyot değerleri verilen rüzgar hızları, Durst Eğrisi kullanılarak EN 50125-2 standardı gereğince 10 dk’lık periyotlara çevrilerek hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 1. Osmaniye, Eskişehir, Kırklareli illeri meteorolojik verileri [12]

| Şehir | Rakım | Min. Sıcaklık | Yıl | Maks. Sıcaklık | Yıl | Maks. Rüzgar | Yıl |
|------------|-------|---------------|------|----------------|------|--------------|------|
| Osmaniye | 121 m | -8,5 °C | 1989 | 45 °C | 2020 | 43,7 (m/sn) | 2008 |
| Eskişehir | 788 m | -28,6 °C | 2019 | 40,6 °C | 2000 | 28,3 (m/sn) | 2016 |
| Kırklareli | 194 m | -15,8 °C | 1972 | 42,5 °C | 2000 | 34,4 (m/sn) | 1972 |

Hesaplamalarda kullanılan tipik değerler Tablo 2’de verilmiştir. Tipik değerler üç hesaplamada da sabit tutularak değişken çevresel koşulların sisteme olan etkisinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Tablo 2. Tipik değerler

| Sembol | Açıklama | Değer |
|--------------------|---|--------|
| Z | Rüzgarın Yerden Yüksekliği (m) | 10 |
| Z _{0,II} | II. Bölgeye Ait Arazi Faktörü | 0,05 |
| Z _{max} | Rüzgarın Yerden Maksimum Yüksekliği (m) | 200 |
| K _r (z) | Arazi Faktörü | 0,19 |
| C _r (z) | Pürüzlülük Faktörü | 1,006 |
| C _o (z) | Orografi Faktörü | 1 |
| K _I | Türbülans Faktörü | 1 |
| I _v (z) | Türbülans Yoğunluğu | 0,188 |
| Z _f | Seyir ve portör teli germe kuvvetleri toplamı (N) | 30000 |
| U _{max} | Açıklıktaki en fazla seyir teli sapma değeri (m) | 0,4 |
| e | Çekme faktörü | 1,25 |
| A | Seyir ve portör teli çapları toplamı (m) | 0,0237 |
| R | Kurp (m) | 999999 |
| C | Dever (m) | 0 |
| S _b | Önceki dezeksman (m) | -0,2 |
| S _a | Sonraki dezeksman (m) | 0,2 |
| D | Yarı Pantograf Uzunluğu (m) | 0,8 |
| T | Yarı iletken şerit uzunluğu (m) | 0,6 |
| D _c | Seyir teli çapı (m) | 0,0132 |
| D _m | Portör teli çapı (m) | 0,0105 |
| D _r | Geri dönüş iletkeni çapı (m) | 0,0175 |
| G _{yc} | Seyir teli birim ağırlığı (N/m) | 10,5 |

| Sembol | Açıklama | Değer |
|--------|--|-------|
| Gycm | Portör teli birim ağırlığı (N/m) | 5,85 |
| Gycr | Geri dönüş iletkeni birim ağırlığı (N/m) | 6,62 |

Tablo 1’de verilen meteorolojik veriler ile hesaplanan üç şehre ait dinamik rüzgar basınçları Tablo 3’te gösterilmektedir.

Tablo 3. Dinamik rüzgar basıncı karşılaştırma tablosu

| Buz Yükü Bölgesi / Seçilen İl | 1 / Osmaniye | 2 / Eskişehir | 4 / Kırklareli |
|--|--------------|---------------|----------------|
| Dinamik Rüzgar Basıncı (N/m ²) | 1149,47 | 561,1 | 890,34 |

Tablo 3 incelendiğinde dinamik rüzgar basıncını belirleyen çevresel koşulun rüzgar hızı olduğu sonucu elde edilmektedir. Son 50 yıl içinde kaydedilen rüzgar hızı değeri fazla olan Osmaniye ilinin dinamik rüzgar basıncı değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Meteorolojik veriler dikkate alınarak hesaplanan üç ile ait direk açıklıkları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Direk açıklıkları karşılaştırma tablosu

| Buz Yükü Bölgesi / Seçilen İl | 1 / Osmaniye | 2 / Eskişehir | 4 / Kırklareli |
|-------------------------------|--------------|---------------|----------------|
| Hesaplanan Direk Açıklığı (m) | 58 | 93 | 74 |
| Kullanılan Direk Açıklığı (m) | 58 | 65 | 65 |

Tablo 4 incelendiğinde direk açıklığı hesabında dinamik rüzgar basıncının dolayısıyla rüzgar çevresel faktörünün etkili olduğu söylenebilmektedir. Osmaniye ilindeki dinamik rüzgar basıncı fazla olduğu için iletkenlere gelen rüzgar kuvveti de fazla olmaktadır. Bu durumda, rüzgar etkisi nedeniyle iletkenlerin pantograf temasının kesilmesini önlemek için direk açıklığının düşürülmesi gerekmiştir. Teorik olarak Eskişehir ilinde 93 m, Kırklareli ilinde ise 74 m direk açıklığı kullanılabilir ancak buz yükü oluşan bu illerde direk açıklığı arttıkça direk tipini, temel boyutlarını, tij çapını, tij boyunu ve tij kalitesini arttırmak gerekecektir. Hattın daha güvenli işletilmesini sağlamak ve arızalara daha hızlı müdahale edebilmek adına UIC 799’a göre direk açıklığı hesaplamadan bağımsız olarak 65 m ile sınırlandırılmıştır [13].

Seçilen illerdeki katener iletkenlerine gelen birim rüzgar yükleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Birim rüzgar yükleri karşılaştırma tablosu

| Buz Yükü Bölgesi / Seçilen İl | 1 / Osmaniye | 2 / Eskişehir | 4 / Kırklareli |
|---|--------------|---------------|----------------|
| Seyir teline etkileyen birim rüzgar yükü (N/m) | 14,35 | 8,72 | 21,19 |
| Portör teline etkileyen birim rüzgar yükü (N/m) | 11,41 | 8,11 | 19,88 |
| GDI’ye etkileyen birim rüzgar yükü (N/m) | 19,02 | 9,6 | 22,99 |

Tablo 5 incelendiğinde iletkenlere gelen birim rüzgar yükü hesabındaki belirleyici çevresel faktörün rüzgardan ziyade buz yükü bölgesi olduğu tespit edilebilmektedir. Dördüncü buz yükü bölgesinde bulunan Kırklareli ilindeki iletkenler diğer illere göre daha fazla buzla kaplandığı için rüzgarın etki alanı büyümektedir. Osmaniye ilindeki yüksek rüzgar hızına rağmen Kırklareli ilindeki rüzgarın etki alanının fazla olması iletkenlerin daha fazla birim rüzgar kuvvetine maruz kalmasına sebebiyet vermiştir. İkinci buz yükü bölgesindeki Eskişehir ilinde de buz nedeniyle iletken çaplarında artış olacaktır ancak bu artış sebebiyle oluşan birim rüzgar kuvveti, buz yükü oluşmayan Osmaniye ilindeki yüksek rüzgar hızı nedeniyle oluşan birim rüzgar kuvvetini geçebilecek seviyede değildir.

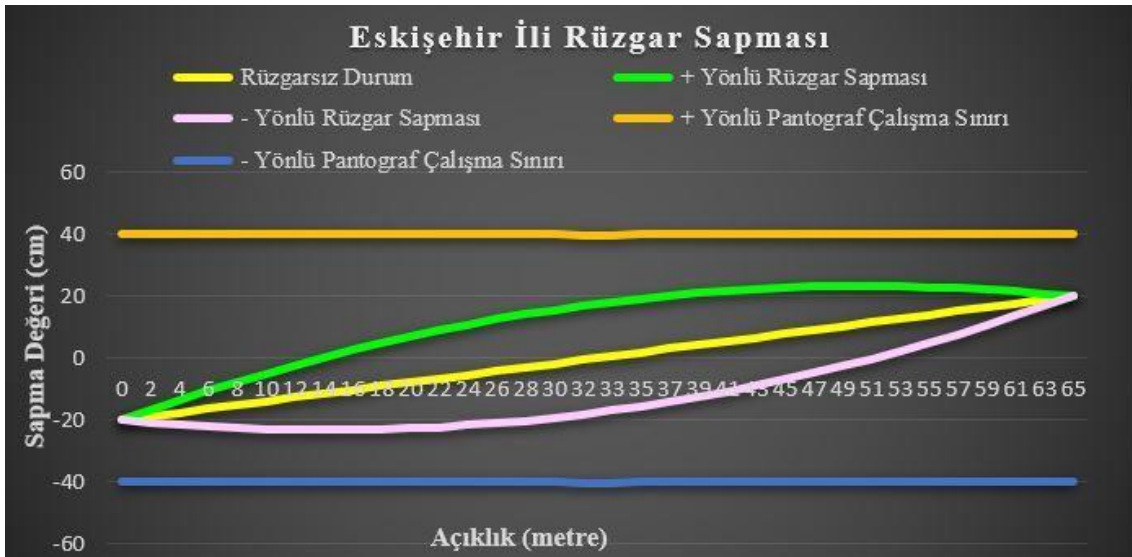
Şekil 3’te Osmaniye ili rüzgar sapması grafiği görülmektedir.



Şekil 3. Osmaniye ili rüzgar sapması grafiği

Şekil 3'te görüleceği üzere sırasıyla - 20 cm ve + 20 cm dezeksman değerlerine sahip seyir teli her iki yönden esmesi muhtemel rüzgar düşünüldüğünde 58 metre açıklıkta + 40 ve - 40 cm saptmaya maruz kalmaktadır. Bu değerler aynı zamanda 160 cm'lik pantografin çalışma sınırları olduğu için 58 metreden fazla açıklık kullanılması durumunda veya 20 cm değerlerinden büyük dezeksman kullanılması durumunda seyir teli ile pantograf temasının sağlanamaması durumu ortaya çıkabilir ve demiryolu aracı enerjisiz kalabilir.

Şekil 4'de Eskişehir ili rüzgar sapması grafiği görülmektedir.



Şekil 4. Eskişehir ili rüzgar sapması grafiği

Şekil 4'te görüleceği üzere sırasıyla - 20 cm ve + 20 cm dezeksman değerlerine sahip seyir teli her iki yönden esmesi muhtemel rüzgar düşünüldüğünde 65 metre açıklıkta yaklaşık olarak + 25 ve - 25 cm saptmaya maruz kalmaktadır. Bu değerler 160 cm'lik pantografin çalışma sınırları (+40 cm/- 40 cm) içerisinde kaldığı için seyir teli ile pantograf temasının sağlanamaması durumu söz konusu değildir.

Şekil 5'te Kırklareli ili rüzgar sapması grafiği görülmektedir.



Şekil 5. Kırklareli ili rüzgar sapması grafiği

Şekil 5'te görüleceği üzere sırasıyla - 20 cm ve + 20 cm dezeksman değerlerine sahip seyir teli her iki yönden esmesi muhtemel rüzgar düşünüldüğünde 65 metre açıklıkta yaklaşık olarak + 35 ve - 35 cm sapmaya maruz kalmaktadır. Bu değerler 160 cm'lik pantografin çalışma sınırları (+40 cm/- 40 cm) içerisinde kaldığı için seyir teli ile pantograf temasının sağlanamaması durumu söz konusu değildir.

Seçilen illerdeki meteorolojik verilere göre hesaplanan katener iletkenleri ağırlıkları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Birim iletken ağırlıkları karşılaştırma tablosu

| Buz Yükü Bölgesi / Seçilen İl | 1 / Osmaniye | 2 / Eskişehir | 4 / Kırklareli |
|--|--------------|---------------|----------------|
| Seyir Teli Birim Ağırlığı (N/m) | 10,5 | 17,62 | 28,32 |
| Portör Teli Birim Ağırlığı (N/m) | 5,85 | 12,2 | 21,74 |
| Geri Dönüş İletkeni Birim Ağırlığı (N/m) | 6,62 | 14,83 | 27,14 |

Tablo 6 incelendiğinde birim iletken ağırlığı hesaplamasında buz çevresel koşulunun belirleyici olduğu görülmektedir. Buz yükü oluşmayan Osmaniye iline ait iletkenlerin birim ağırlıkları en az iken, ciddi buz yükü oluşumuna maruz kalan Kırklareli ilindeki iletkenlerin birim ağırlıkları en fazladır. Buz yükü bölgesi seviyesi arttıkça iletkenlerin birim ağırlıkları da artmaktadır.

Çevresel koşulların farklı olması nedeniyle katener direklerine gelen yükler de farklılık göstermektedir. Direk fonksiyonları dikkate alınarak direklere gelen yüklere göre seçilen H profil direk tipleri ve 100 km'lik hat kesimindeki yaklaşık direk adetleri Tablo 7'de yer almaktadır. Direk tipleri ve adetleri sonucunda oluşan toplam direk ağırlığı karşılaştırması da Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Yüz kilometrelik hat kesiminde direk maliyet karşılaştırması

| Buz Yükü Bölgesi / Seçilen İl | 1 / Osmaniye | 2 / Eskişehir | 4 / Kırklareli |
|--|--------------|---------------|----------------|
| Tekli Konsol Direği (8m) | HE 240 A | HE 220 A | HE 260 A |
| Tekli Konsol+Antişöminman Direği (8m) | HE 260 A | HE 240 A | HE 280 A |
| Tekli Konsol+Antişöminman Ankraj Direği (8m) | HE 260 A | HE 240 A | HE 260 A |
| Tekli Konsol+Katener Ankraj Direği (9m) | HE 240 B | HE 220 B | HE 260 B |

| Buz Yüğü Bölgesi / Seçilen İl | 1 / Osmaniye | 2 / Eskişehir | 4 / Kırklareli |
|---|--------------|---------------|----------------|
| Çiftli Konsol Direği (8m) | HE 240 B | HE 240 B | HE 260 B |
| Çiftli Konsol Sapan Direği (8m) | HE 240 B | HE 240 B | HE 260 B |
| Tekli Konsol Direği Adedi | 900 | 800 | 800 |
| Tekli Konsol+Antişöminman Direği Adedi | 100 | 100 | 100 |
| Tekli Konsol+Antişöminman Ankraj Direği Adedi | 200 | 200 | 200 |
| Tekli Konsol+Katener Ankraj Direği Adedi | 200 | 200 | 200 |
| Çiftli Konsol Direği Adedi | 200 | 200 | 200 |
| Çiftli Konsol Sapan Direği Adedi | 200 | 200 | 200 |
| Toplam direk ağırlığı (kg) | 999.000 | 864.300 | 1.053.100 |

Tablo 7’de görüleceği üzere Kırklareli ilinin yaklaşık 100 km’lik hat kesiminde Eskişehir iline kıyasla 188.800 kg daha fazla çelik kullanımı ihtiyacı oluşmaktadır. Osmaniye ilinde direk açıklığı daha düşük olduğu için daha fazla sayıda direk kullanımı gerekmektedir. Bu durum, Osmaniye ilinde buz yükü olmamasına rağmen çelik kullanımlarını dördüncü buz yükü bölgesindeki Kırklareli iline yakın değerlere ulaştırmaktadır. Çevresel koşulların temel hacmine, tij adedine vb. kalemlere olan etkilerini görebilmek amacıyla benzer karşılaştırma tabloları hazırlanabilir.

4. Sonuç

Bu makalede çalışmada elektrikli demiryolu hatlarının yapımında veya mevcut hatların modernize edilmesinde coğrafi koşullar ve ilgili bölgenin iklim özelliklerinin tasarımı doğrudan etkilediği savunulmuştur. İklimsel verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden alınan üç farklı il için tipik değerler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu ortaya çıkan verilerle oluşturulan karşılaştırma tabloları yardımıyla üç ile ait katener sistemindeki farklar ortaya koyulmuştur. Tasarım aşamasında çevresel koşulları dikkate alarak yapılacak hesaplamalar sayesinde çevresel koşulların katener sistemi üzerindeki etkisinin tespit edilebileceği ve böylece sistemin olası arızalarını önleme, daha doğru maliyet analizi yapabilme ve daha güvenli bir tasarım yapabilme imkanının olduğu gösterilmiştir. Rüzgar hızına bağlı olarak direk açıklıklarının ve dezeksman değerlerinin doğru seçilmemesi sonucu seyir teli ile pantograf temasının kesilebileceği vurgulanmıştır. Rüzgar ve buz yükleri doğru analiz edilerek direk ve temel tipleri belirlenmelidir, aksi takdirde sistemde büyük arızalar meydana gelebilmektedir.

Bu makaleden yola çıkarak yapılacak çalışmalarda sıcaklık değişimine bağlı olarak gerçekleşecek iletken boyundaki değişimlerin sistem üzerindeki etkisi ele alınabilir. Otomatik gergi cihazı ağırlıklarının iletken boylarındaki değişim nedeniyle yere ve otomatik gergi cihazına çarpmayacak şekilde çalışması istenir. Benzer bir şekilde çiftli konsol hoban sabit parça boyları da iletkenlerin boylarındaki değişim dikkate alınarak seçilmelidir. İletken boylarının sıcaklık sonucu uzaması sonucunda artacak sehim kısa devrelere neden olabilmektedir. Bu durumlardan yola çıkarak sonraki çalışmalarda çevresel koşulların neden olabileceği durumların hattın belirli noktalarına montajlanacak yazılım destekli sistemlerle izlenmesi hakkında olabilir.

Kaynakça

- [1] A. Colovic, L. Principe, M. Binetti and M. Ottomaneli, “A network design tool for railway electrification considering the environmental impact,” *IEEE International Conference on Environment*, pp. 1, September 2021.
- [2] J. Octavio, C. Rebollo and A. Carnicero, “The dependence on mechanical design in railway electrification,” *IEEE Electrification Magazine*, pp. 1-7, September 2013.
- [3] M. Tutucu, N. Güzel, “Demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde topraklama ve temas gerilimi,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 14, ss. 122-129, Tem. 2021, doi:10.47072/demiryolu.936613.

- [4] *Demiryolu uygulamaları-sabit Tesisler-elektrikli cer havai temas hatları*, EN 50119, European committee for electrotechnical standardization, 2020.
- [5] *Demiryolu uygulamaları-donanım için çevre şartları-bölüm 2:sabit elektrik tesisleri*, EN 50125-2, European Norm, European committee for electrotechnical standardization, 2012.
- [6] *Minimum design loads for buildings and other structures*, ASCE7-05, American society of civil engineers, 2002.
- [7] *Yapılar üzerindeki etkiler-bölüm 1-4:genel etkiler-rüzgâr etkileri*, EN 1991-1-4, European committee for electrotechnical standardization, 2010.
- [8] *Kinematik gabarilerin uygulama sonuçları*, UIC 606-1, International union of railways, 1987.
- [9] F. Kiessling, R. Puschman, A. Schmirder, E. Schneider, *Contact lines for electric railways: planning, design, implementation and maintenance*. Erlangen, Germany: Publicis Publishing, 2009.
- [10] K. Evginer, "Türkiye'nin buz yükü haritası," *Türkiye Elektrik Kurumu*, TJKD: 621.315.1, pp. 1-14, 1970.
- [11] T.C. Resmi Gazete, Ankara, Türkiye, *Elektrik kuvvetli akım tesisleri yönetmeliği* 24246 sayılı. 2000. Accessed: Haz. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=9949&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- [12] T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, "Osmaniye, Eskişehir, Kırklareli," 2022. [Online]. Available: <https://www.mgm.gov.tr> [Accessed Haziran 18, 2022].
- [13] *Characteristics of a.c. overhead contact systems for highspeed lines worked at speeds of over 200 km/h*, UIC 799, International union of railways, 2002.

Özgeçmiş



Cengiz Görkem ELA

Antalya'da 1993 yılında doğmuştur. Lisans eğitimini Selçuk Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Osmangazi Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Açı Mühendislik A.Ş.'de Katener Tasarım Uzmanı olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları katener ve trafo sistemleridir.

E-Posta: c.gorkemela@gmail.com



Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

1984 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Yüksek lisans ve doktorasını aynı alanda sırasıyla 1987'de The Georgia Institute of Technology'de, 1991 yılında The University of Texas at Arlington'da tamamlamıştır. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesidir.

E-Posta: akaraman@ogu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Cengiz Görkem ELA: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kontrol.



Yüksek Hızlı Tren Hatlarında Rayların Yeniden Profilendirilmesinde Döner Taşlama Metodunun Uygulanabilirliği: Ankara-Eskişehir Hattı Örneği

Elvan ARSLAN 

TCDD Genel Müdürlüğü, 8. Bölge (YHT) Müdürlüğü, Demiryolu Bakım Servis Müd., Ankara, Türkiye

elvanarslan@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 14.10.2022, Kabul/Accepted: 28.10.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Demir yolu rayları uzun süreli ve emniyetli kullanım için bakım planlaması yapılması gereken önemli üst yapı elemanlarıdır. Rayların optimum profile sahip olması, sürüş konforunun artırılması ve ray ömrünün ekonomik olarak uzatılabilmesi için rayların belirli periyotlarla yeniden profilendirme yapılması gereklidir. Bu çalışmada Yüksek Hızlı Tren Hatlarında rayların yeniden profilendirme çalışmalarında mobil ray taşlama makinesi ile döner taşlama metodunun uygulanabilirliği Ankara-Eskişehir hattı özelinde araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle yeniden profilendirme stratejileri ve metotları ele alınmıştır. Çalışma öncesi hattın durumu incelenerek ön ölçümler alınmıştır. Değerlendirme sonucu belirlenen tolerans ve kalite gereksinimlerine göre döner taşlama uygulaması yapılmış olup alınan ölçümler incelenmiştir. Çalışma sonu yapılan değerlendirmede söz konusu metodun Yüksek hızlı Tren Hatlarında uygulanabilir olduğu görülmüştür. Bahse konu çalışmanın literatürde yeteri kadar yer almaması karşısında Yüksek Hızlı Tren Hatlarında yeniden profilendirme stratejilerinin oluşturulmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Yüksek hızlı tren hattı, Yeniden profilendirme, Taşlama, Demiryolu

Applicability of Rotating Grinding Method in Re-profiling of Rails on High-Speed Train Lines: Example of Ankara-Eskişehir Line

Abstract: Railway tracks are one of the most important superstructure elements that need maintenance planning for long-term and safe use. In order for the rails to have an optimum profile, to increase the driving comfort and to extend the rail life economically, it is necessary to re-profiling the rails at certain intervals. In this study, the applicability of the rotary grinding method with the mobile rail grinding machine in the re-profiling of the rails on the High Speed Train Lines was investigated in the Ankara-Eskişehir line. In the study, firstly, re-profiling strategies and methods are discussed. Before the study, the condition of the line was examined and preliminary measurements were taken. According to the tolerance and quality requirements determined as a result of the evaluation, a rotary grinding application was made and the final measurements were examined. In the evaluation made at the end of the study, it was seen that the method in question is applicable in High Speed Train Lines. It is thought that this study will contribute to the formation of re-profiling strategies in High Speed Train Lines, due to the lack of sufficient coverage in the literature.

Keywords: High speed train line, Re-profiling, Grinding, Railway

1. Giriş

Demir yolu rayları uzun süreli ve emniyetli kullanım için bakım planlaması yapılması gereken önemli üst yapı elemanlarıdır. Raylar demir yolu araçlarının üzerinde hareket ettiği, tutunduğu, frenleme yaptığı ve üstündeki yükü altyapıya aktardığı mukavemetli hadde çeliğinden oluşmaktadır. Raylar çevresel doğal etkiler ve üzerinden geçen yük dolayısıyla eskimeye ve hasar görmeye başlar. Yıpranan rayın kullanım ömrünün uzatılabilmesi, işletme emniyetinin sağlanması için raya da bakım yapılması elzemdir. Dolayısıyla raya yapılan bakım pratikte aşağıdaki şekilde sıralanabilir [1].

Atıf için/Cite as: E. Arslan, "Yüksek hızlı tren hatlarında rayların yeniden profilendirilmesinde döner taşlama metodunun uygulanabilirliği: Ankara-Eskişehir hattı örneği," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 38-53, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1189161

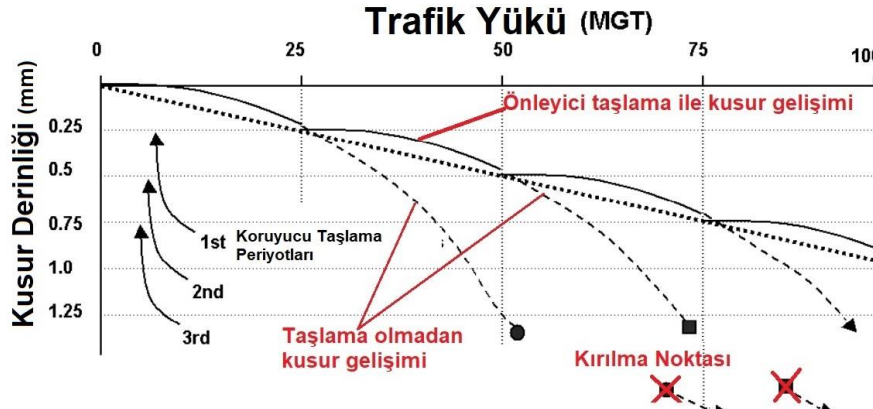
- Tahribatsız muayene yöntemleri ile süreksizlik aranması, (VT, UT, MT, ET, PT vb.)
- Sıcaklık ve mekanik etkiler neticesinde oluşan ray geriliminin kontrolü
- Ray değişimi
- Düzeltici tamir kaynağı (dolgu, termit ve alın kaynağı)
- Rayın yeniden profilendirilmesi,

Rayların yukarıdaki bakımlarının yanı sıra sağlıklı ve optimum profile sahip olması ve ray ömrünün ekonomik olarak uzatılabilmesi için rayların belirli periyotlarla yeniden profilendirme yapılması sürdürülebilir bir demir yolu işletmeciliği için gereklidir. Bu kapsamda çalışmada Yüksek Hızlı Tren Hatlarında yapılacak rayların yeniden profilendirme çalışmaları mobil ray taşlama makinesi ile döner taşlama metodu uygulanarak Ankara-Eskişehir YHT hattı özelinde düzeltici ve önleyici ray taşlama yapılması ele alınmıştır. Çalışmada öncelikle yeniden profilendirme stratejileri ve metotları açıklanmıştır. Çalışmada döner taşlama metodu kullanılarak söz konusu hattın durumu ve ön ölçümleri alınarak yeniden profilendirme stratejisi oluşturulmuştur. Belirlenen kalite gereksinimlerine göre ray taşlama çalışması yapılarak son ölçümler değerlendirilmiş olup sonuç olarak döner taşlama metodunun Yüksek Hızlı Tren Hatlarında uygulanabilir olduğu Ankara-Eskişehir YHT hattında gösterilmiştir. Çalışmanın tamamlanmasının ardından sonuç kısmında bir dizi önerilerde bulunulmuştur. Bahse konu çalışmanın literatürde yeteri kadar yer almaması karşısında Yüksek Hızlı Tren Hatlarında yeniden profilendirme stratejilerinin oluşturulmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Demir Yolu Raylarını Yeniden Profilendirme

2.1. Yeniden profilendirme stratejisi oluşturma

Rayların yeniden profilendirilmesi önemli bir bakım planlamasının parçasıdır. Zaman içerisinde ve üzerinden geçen yük sonrasında tekerlek temasının yarattığı kuvvet sonrası ve çeşitli yanlış bakım çalışmaları ray kusurları oluşturmaktadır [2]. Bu kusurlar zamanla ve yeterli çevrim ömründe büyüyerek seyrüsefer emniyetini tehlikeye düşüreceklerdir.



Şekil 1. Korumucu yeniden profilendirme çalışmaları çalışma periyotları [2]

Yeniden profilendirme aşağıdaki nedenlerden dolayı ihtiyaç duyulur.

- Araç dinamiğinin karmaşıklığı
- Tekerlek temasının oluşturduğu yüksek gerilimler
- Ray yüzey yorulması
- Ray metalürjisinin dayanım gücü
- Ray geometrisinin değiştirilmesi

Yeniden profilendirme işi planlı bir bakım faaliyetidir. Dolayısıyla çalışma programı boyunca profil (ondülasyon derinliği), enine profilden sapma ve yüzey çatlakların derinliği gibi önceden belirlenmiş müdahale eşiklerine ulaşan hasarlara bağlı olarak yapılır.

Raylarda yapılacak periyodik yeniden profilendirme çalışması aşağıdaki parametrelere bağlı olabilir.

- Ray üzerinden geçen araç ve yük durumu
- Ray yüzey kusur durumu
- Diğer bakım faaliyetlerinden sonra (ray değişimi, kaynak yapımı gibi)

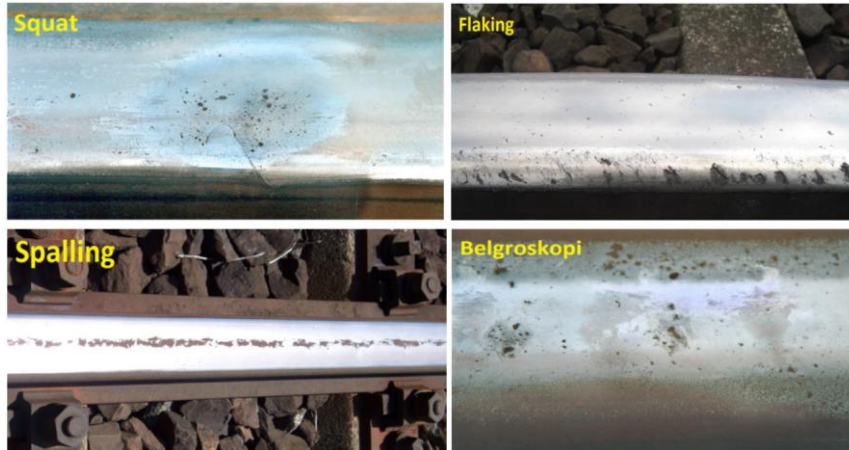
Optimum yeniden profilendirme süresi bu parametrelere bağlı olarak İşletmecilerle belirlenebilir. Yeniden profilendirmeden önce aşağıdaki verilerin bilinip buna göre çalışma prosedürü oluşturulmalıdır.

- Kusur onarımı ve yeri (talaş kaldırma miktarı);
- Boyuna profil (tolerans);
- Enine profil (hedef profil ve tolerans);
- Yüzey durumu (kusur, pürüzlülük, faseta izleri, vb.)

Temas yorulması çatlaklarından (RCF) korunma: Temas yorulma çatlakları işletmecilik açısından oldukça tehlikeli bir ray kusurudur. Çatlak boyu çevrim sayısı boyunca hızlı bir şekilde ilerleme gösterebilir. Dolayısıyla ekonomik olarak korunmak için belirli periyotlarla 0,2-0,6 mm arasında ekartman yönü mantar köşesi ile ray eksenini arasından metal kaldırılması gerekebilir. Bu kusur türü yük ve çevrime bağlı olmasından dolayı R260 kalite raylarda kurplarda 15 milyon ton, düz yolda 45 milyon ton yük sonrasında yapılması öngörülmektedir. Eğer ray özel alaşımlı sert bir ray ise (R350 HT vb.) ise bu periyotlar iki katına kadar çıkarılabilir [3].

Ray yüzey kusurları: Rayda oluşan her düzensizlik yüksek ve tehlikeli dinamik yüklere neden olarak hasarı önemli oranda ilerletir. Bu durum ray ile sınırlı kalmayarak selet, bağlantı elemanları, travers ve balast kalitesine önemli oranda zarar verir. Tanımlanan bazı kusurlar aşağıda verilmiştir [4].

- Rolling Contact Fatigue (RCF) [Yuvarlanma Temas Yorulması]
- Belgroski
- Squat (yorulma ezilmesi)
- Flaking (Gauge corner cracking) kabuklanma, pullanma (spalling)



Şekil 2. Raylarda bazı yüzey kusurları [4]

Enine profil kusurları

- Yassılaştırmış ray profili (Flattened)
- Ekartman köşe aşınması (Side cutting)
- Metal yığılması (Lipping)

Boyuna profillerdeki periyodik hatalar

- Kısa aralıklı ondülasyon (10-100mm)
- Kısa dalga ondülasyon (30-300mm)
- Uzun dalga ondülasyon (300-1000mm)



Şekil 3. Ray enine ve boyuna yüzey kusurları [4]

Planlama ve bakım eşikleri

Boyuna profil: Hatta ondülasyonların uzunluk ve dalga boyları ayrıntılı olarak belirlenmelidir. Ondülasyon derinliği nedeniyle oluşan gürültü ve titreşimle birlikte yol stabilitesine zarar vermeye başlayacaktır. Yüksek Hızlı Tren hatlarında müdahale eşiği aşağıdaki tabloya göre bakım planı oluşturulabilir.

Tablo 1. Boyuna profil bakım müdahale ve uygulama seviyeleri [3]

| Hız (km/h) | Hata Tipi | Dalga Boyu Uzunluğu Aralık (mm) | Planlama Eşiği Derinlik (mm) | Müdahale Eşiği Derinlik (mm) |
|------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| V>160 | Kısa Aralıklı Ondülasyon | 10-100 | 0,02 | 0,04 |
| V>80 | Kısa dalga boylu Ondülasyon | 30-300 | 0,1 | 0,2 |
| V>160 | Uzun Dalga Boylu Ondülasyon | 300-1000 | 0,4 | 0,5 |

Enine profil: Enine profil genellikle ray profilendirme işinin programlanması için bir kriter olarak kabul edilmez. Bununla birlikte eşdeğer koniklik hatası, tekerlek/ray teması, ondülasyon ve yuvarlanma teması yorgunluğu (RCF) gibi ray yüzeyi kusurlarının gelişmesinde önemli bir rol oynar. Enine profilden Yüksek Hızlı Tren hatlarında 5000 metre ve üzerindeki kurplarda sapma için planlama ve uygulama için önerilen eşik değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Enine profilden sapma Yüksek Hızlı Tren Hatlarında veya yüksek hızlarda emniyet için kritik kabul edilmektedir. Düzenli bir şekilde enine profil ölçümleri yapılarak diğer ölçüm metodlarının da (eşdeğer koniklik, aşınma vs.) kullanılması gerekmektedir.

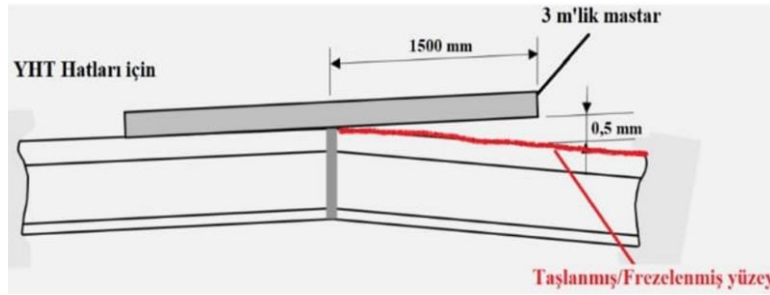
Tablo 2. Enine profil bakım müdahale ve uygulama seviyeleri [3]

| Hız (km/h) | Planlama Eşiği (mm) | Uygulama Eşiği (mm) |
|---------------|---------------------|---------------------|
| V>160 | 0,5 | 0,7 |

Metal kaldırma: Metal kaldırma enine ve boyuna yönde geometrik kusurların giderilmesi, RCF kusurlarının ıslahı ve ideal ray profili oluşturabilmek için önemlidir.

Metal kaldırma başlangıcından ve bitirilmesinden hatta yeniden profilendirme taşları kademeli olarak bitirilmeli ve aşağıda verilen en fazla ray eğimi verilmelidir. Yüksek Hızlı Tren Hatlarında profilendirme çalışmaları başlangıcından ve işin bitirildiği ray dizilerinde kademeli olarak yeniden profilendirmenin bitirilmesi gerekmektedir.

Eğim toleransı maksimum 1 / 3 000 (V> 160 km / h) [3]



Şekil 4. Ray eğiminin 3 m.lik çelik master ile ölçülen maksimum değeri

Ray eğiminin yolun işletmeye açılmadan önce yeniden profilendirmenin başladığı ve bitirildiği noktada 1/3000 ray eğiminin sağlanması gerekmektedir. 3 m çelik master sahada kullanılabilir olmadığından dijital doğrultu ölçüm masterları ile ölçülmesi büyük kolaylık sağlayacaktır. Ray eğiminin sağlanması yolculuk konforu ve emniyet açısından önemlidir.

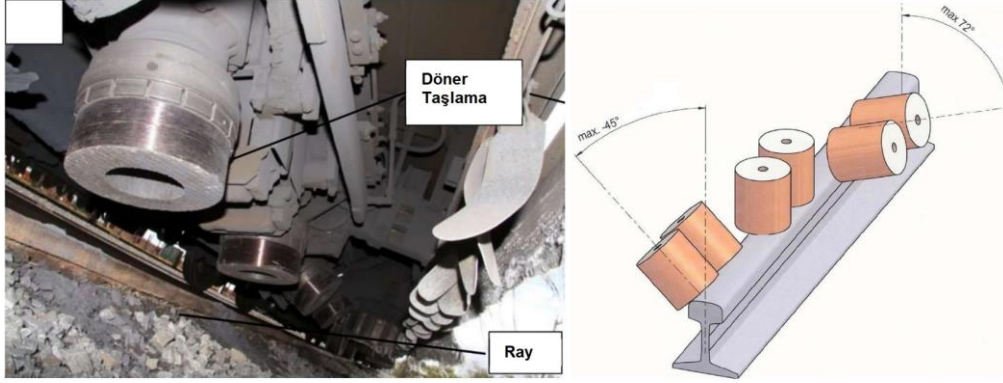
Metal kaldırmada yolda oluşan kusurlar derinliğine ek olarak 0,1 mm daha fazla metal kaldırılması tavsiye edilir.

2.2. Yeniden profilendirme metotları

Döner taşlama (grinding): Taşlama Şekil 5' görüldüğü gibi döner taşların ray yönüne dik eksen etrafında dönen ileri-geri hareketiyle taşlama yapılır. Taşlama makinenin bilgisayarından ray profili seçimi, taş pozisyonları, taş basıncı ve dönme hızını ayrı ayrı ayarlanır. Ekartman tarafı 70° dış ray ise -20° kadar taşlanabilir. Yeniden profilendirme yapmaya uygun bir metottur. Makine çalışma hızı 3 – 15 km/h arasındadır [3]. Makine performansı taş sayısı, taş cinsi ve makine cer gücüne bağlıdır.

Bu metotta taş ve araç kapasitesine bağlı olarak ekonomik olması açısından 1 mm'ye kadar yeniden profilendirme yapılabilir. Dünyada 20 ila 96 adet taşı bulunan taşlama makineleri bulunmaktadır. Ray ve makasların taşlamasında aşağıdaki uygulamalarda, önleyici ve düzeltici işlemler yapılabilir.

- Boyuna ve enine profilin düzeltilmesi,
- RCF kontrolünün sağlanması, koruyucu taşlama yapılması
- Yüzey kusurlarının düzeltilmesi
- Ray profilinin değiştirilmesi
- Ekartman genişletilmesi



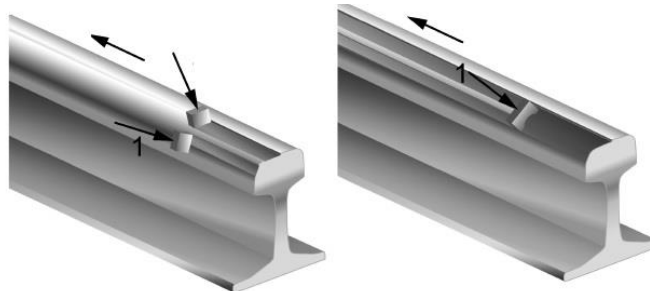
Şekil 5. Taşlama metodunda taşların konumu [5, 6]

Ray frezeleme (miling): Karbür uçlu taşlarla donatılmış ray frezeleme kesici kafalarının ray mantarının uzunlamasına yönünde döndüğü bir işlemdir. Çalışma hızı genelde 500 m/h – 1500 m/h arasında toplam 2 ila 6 freze ünitesi ile donatılmıştır. Ray açısına göre 70° dış ray ise 5° kadar tek geçişle elde edilebilir. Ayrıca yol ekipmanlarının sökülmesini gerekmez. Metal kaldırma sonunda talaşlar toz emme sistemleri ile toplanır. Metal kaldırma için elmas uçlu veya karbon esaslı taş uçlar kullanılır [3]. Ekonomik gerekçelerle bu yöntemin kullanılması için tek seferde en az 0,5 mm ve üzeri metal kaldırma amaçlanmış ise kullanılması tavsiye edilir.



Şekil 6. Ray frezeleme yöntemi [7]

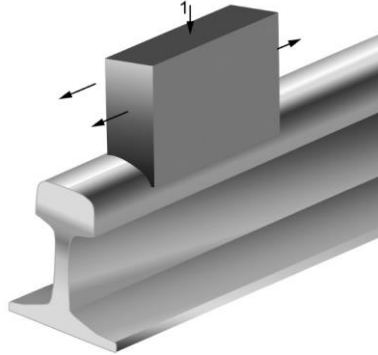
Planyalama (planing): Raylar, ray profiline uyarlanmış yerleştirilen düz ve radyal kesme uçları ile talaş kaldırma işlemiyle yapılır. Raylar ekartman tarafı rayları 70° 'ye kadar çalıştıran dış rayda 5° 'ye kadar şekillendirilir. İstenen enine profil ve istenilen boyuna profil uygulanır. Genelde kıvılcım ve talaş tozu oluşturmaz. Çalışma hızı yaklaşık 5 km/h'dır. Talaş kaldırma ve profil verme işlemi birkaç geçişle sağlanabilir. Yüzey kalitesi taşın kalitesine bağlı olsa da yüzey kalitesi düşüktür. Bu yöntem ile 0,2 mm'den 3 mm'ye kadar metal kaldırılabilir [3].



Şekil 7. Planyalama metodu [3]

Ray salınlı taşlama (oscillating grinding): Taşlama taşları rayın uzunlamasına yönü boyunca salınım hareketleri gerçekleştirir ve makine aynı zamanda ileri doğru hareket eder. Salınlı taşlama aslında ıslak taşlama yöntemidir. Taşlar 2 m uzunluğuna kadar olmakla birlikte 2 veya 6 adet taş bulundurabilir. Raylar, çalışma kenarında 45° ile dış rayda -5° arasında taşlanır. Dolayısıyla yeniden profilendirme yapmak mümkün değildir [3].

Raylar ve makaslar için sadece boyuna profil için düzeltici ve yeniden profilendirme çalışması yapılabilir. Toz oluşumu ve kıvılcımlanmaya görülmez. Salınlı çalışma hızı 1200 m/h'dir. Salınlı ama temaslı çalışma hızı 15 km/h'dir. Pürüzlülük oranı EN gereksinimlerine uygundur

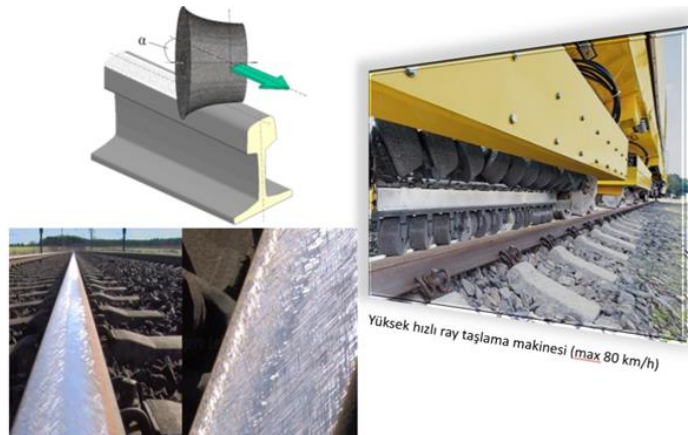


Şekil 8. Salınlı taşlama metodu [3]

Yüksek hızlı taşlama (high speed grinding): Bu taşlama metodu önleyici bir taşlama tekniğidir. Düzeltici ray bakımı ve yeniden profilendirme için kullanılamaz. Taşlar ray boyunca sürüklenerek hareket ettirilir. Taş profil yapısı taşlamaya imkân sağlar. Taşlar ray kafasının şekline uyum sağlayarak, taşlama izi belirsiz bir yüzey sağlar. Taşlama taşları, ray üzerine aynı anda basılan her taşlama arabası üzerinde 2×12 taşlık gruplar halinde gruplandırılır. Her set taş seti 20 mm ila 30 mm alanı kaplar. Taş üniteleri makas ve geçitlerde kaldırılıp indirilebilir şekildedir. Her bir taşlama taşı setinin radyal yönü, ray ekartman kenarında 70° ile dış raydan -8° arasında önceden ayarlanabilir [3].

Taşlama işlemi 50 km/h – 80 km/h arasında gerçekleştirilir. Daha düşük hızlarda taşlama yapmaz. Hemzemin geçitlerde ve makaslarda kullanımına dikkat edilmelidir. İşin esasında RCF ve ondülasyonu kontrol etmek için önleyici ray taşlama için kullanılır.

Yüksek Hızlı Tren Hatlarında bakım sürelerinin kısa olması nedeniyle, 80 km/h hız ile yorulma çatlakları ve ondülasyonların başlamadan düzeltilebilmesi için periyodik olarak kullanılması uygundur.



Şekil 9. Yüksek hızlı taşlama metodu [7]

3. Yüksek Hızlı Tren Hatlarında Döner Taşlama Metodu Uygulanmasında Ankara-Eskişehir Hattı Örneği

3.1. Çalışma öncesi hazırlıklar ve ölçümler

Ankara-Eskişehir YHT hattı 2009 yılında işletmeciliğe başlamıştır. Hat işletmeye açılmadan önce rayda ortalama ~ 0,3 mm metal kaldırılarak koruyucu taşlaması tamamlanmıştır. Söz konusu hat bu tarihten sonra herhangi bir yeniden profillendirme işlemine tabi tutulmamıştır. Zaman içerisinde çeşitli ray kusurları tespit edilerek bu kusurlar ray değişimi ile giderilmiştir. Bu hatta son koruyucu taşlama sonrasına hatta geçen yük miktarı ve hattın spesifik bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3. Ankara-Eskişehir YHT Hattı Özellikleri

| | |
|--|-------------------|
| Hat İstasyon Aralıkları | Ankara- Eskişehir |
| Hat Uzunluğu (çift hat toplam) | 428.000 hat.m |
| İşletme Hızı | 250 km/h |
| Ray Profili ve Kalitesi | UIC 60E1, R 260 |
| Son Yapılan Yeniden Profillendirme Tarihi | 2008 |
| Hatta Geçen Yük Miktarı (yaklaşık değer) | 26 milyon.ton |
| Minimum Kurp Yarıçapı | 3.200 m |
| Hat Kapama Süresi (bakım için verilen zaman aralığı) | 5 saat |

Hattın durumu değerlendirildiğinde hatta geçen yük miktarı TCDD Bakım Konseptine göre koyucu taşlama yapılması vaktinin geldiğini göstermiştir [10]. Yeniden profillendirme çalışmalarının başlaması için hattın durumu değerlendirilerek Tablo 2. de verilen verilerin alınmasına gerek görülmemiştir.



Şekil 10. Düzeltici yeniden profillendirme öncesi kusur derinliği ölçümü

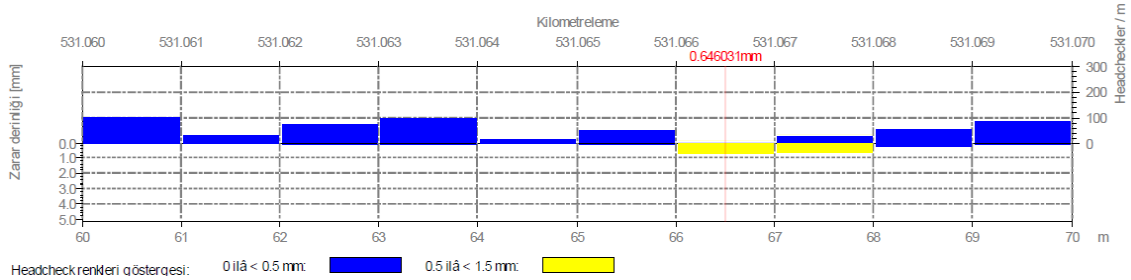
Yeniden profillendirme çalışmaları için hangi metodun seçileceği, metal kaldırma derinliğinin ne olacağı, hangi ray yüzeyinden metal kaldırılacağı belirlenmesi için kusurlarının değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu aşamada kusur sayısı, derinliği ve ekartman durumu ölçülerek aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4. Ölçülen ve belirlenen kusur durumu

| Ankara-Eskişehir YHT Hatları | Kusur Sayısı (Squat, belgroskobi, flaking, apleti, ondülasyon vb.) | Ortalama Kusur Derinliği (mm) | 0-0,5 mm Derinlik Aralığındaki Kusur Sayısı | 0,5-1,5 mm Derinlik Aralığındaki Kusur Sayısı | Yassılaştırılmış ray profili (Flattened) Ekartman köşe aşınması (Side cutting) Metal yığılması (Lipping) | Ekartman Açıklığı Aralıkları (mm) |
|------------------------------|--|-------------------------------|---|---|--|-----------------------------------|
| Hat 1 | 460 | 0,45 | 285 | 175 | Rastlanmamıştır | 1434-1438 |
| Hat 2 | 348 | 0,44 | 227 | 121 | | 1434-1439 |

Verilen yüzey kusurlarının yanı sıra çatlak kontrolü için hattın tamamının Eddy Current yöntemi ile ölçümü yapılamamıştır. Bunun yerine kısmi ve riskli görünen bazı yerlerde örneğin yaya turnede yapılan görsel muayenelerde Km 551 hat1 ve hat2 de dar yarıçaplı kurpta (R=3.550 m) tespit edilen RCF kusurlarında Eddy Current Ölçüm cihazı ile yapılan çatlak ölçümlerinde bölgede 0,65 mm'ye kadar çatlak derinliği tespit edilmiştir. Maksimum derinlik verisi alınan nokta Şekil 10'da verilmiştir.

Belirtilen konumda ölçüm verileri değerlendirildiğinde RCF hata derinliklerinin istisnalar dışında 0,1-0,3 mm aralığında kaldığı görülmüştür. En dar kurlardan biri olan bu noktadaki ölçüm verileri diğer dar kurlar için de benzer verilerin alınacağı öngörülerek 5000 m altındaki kurlarda yaklaşık 0,75 mm metal kaldırılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Girdap akımları yöntemi ile RCF çatlak ölçümü

Hat ölçümlerinde kullanılan Roger 800 yol ölçüm aracından alınan veriler ışığında bazı ray bölümlerinde eşdeğer koniklik hataları alınmıştır. Yerinde yapılan doğrulamalarda ekartman ve ray eğiminde herhangi bir kusur bulunamazken ray profilindeki bozulmalardan dolayı eşdeğer koniklik hataları alınmıştır. Yüksek Hızlı Tren hatları için teorik eşdeğer koniklik verisi (GW1/40 ve S1002 tekerlek profili için) en fazla 0,3 olması gerekirken bu değer bazı yerlerde 0,6 olmakta ve ray tekerlek etkileşimini olumsuz etkilemekte ve yüksek hızlarda işletme emniyetini tehlikeye atmaktadır [9, 10].

Mobil ray taşlama makinesi 42 metre uzunluğunda her bir ray dizisi için 10'ar tane döner taş mevcuttur. Ölçüm sistemi sürekli olup rayın enine ve boyuna profil ölçümünü yapabilmektedir. Bu lazer ölçüm sistemleri araç ön ve arka ray üstü şaseye bağlantılıdır. Çift taraflı operatör kabineye sahip taş açısı, taş basıncı ve dönme hızları operatörce kontrol edilebilmektedir.

Boyuna profil ölçümü: Tüm hattın boyuna profil ölçümleri 100 m aralıklarla sapma oranlarının alınmasına karar verilmiştir. Alınan değerler 428.000 hat.metre yol için birleştirildiğinde aşağıdaki sapma yüzdesi hesaplanarak Tablo 5.'te verilmiştir.

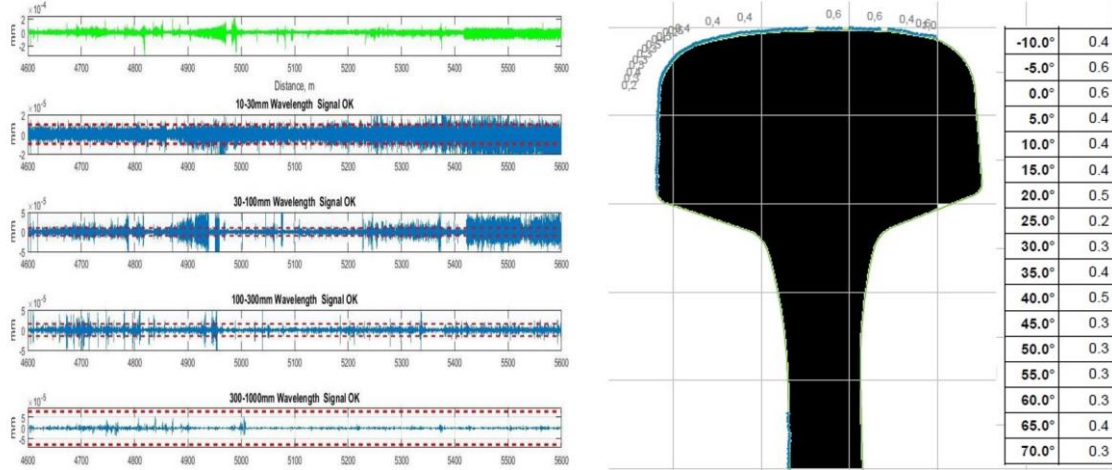
Tablo 5. Hattın boyuna profil ön ölçüm ortalamaları

| | | Sol Ray Dizisi | | | | Sağ Ray Dizisi | | | |
|------------------------|-------|----------------|--------|---------|----------|----------------|--------|---------|----------|
| | | 10-30 | 30-100 | 100-300 | 300-1000 | 10-30 | 30-100 | 100-300 | 300-1000 |
| Dalga Boyu (mm) | | 10-30 | 30-100 | 100-300 | 300-1000 | 10-30 | 30-100 | 100-300 | 300-1000 |
| Sapma Limitleri | | ±0,01 | ±0,01 | ±0,015 | ±0,075 | ±0,01 | ±0,01 | ±0,015 | ±0,075 |
| Ölçülen Ortalama Değer | Hat 1 | 1,65 | 1,99 | 5,15 | 3,69 | 1,6 | 1,91 | 7,72 | 3,43 |
| | Hat 2 | 1,24 | 1,04 | 5,22 | 3,54 | 1,88 | 1,5 | 6,38 | 3,2 |

Enine profil ölçümü: Tüm hattın boyuna profil ölçümleri 500 m aralıklarla alınmıştır. Sol ve sağ dizide ray yüzeyindeki -5° - 70° aralığından 5'er derecelik aralıklarla alınarak her noktadan 16 adet ±0,3'den sapma verisi alınmıştır. Alınan değerler 428.000 yol için birleştirildiğinde sapma yüzdesi hesaplanarak Tablo 6 'da verilmiştir.

Tablo 6. Tüm hattın enine profil ön ölçüm ortalamaları

| Hat | Sol Ray Ölçüm Sapma Miktarları (adet) | | Sol Ray Dizisi Kalite Yüzdesi ($\pm 0,3$) | Sağ Ray Ölçüm Sapma Miktarı (adet) | | Sağ Ray Dizisi Kalite Yüzdesi ($\pm 0,3$) |
|-------|---------------------------------------|----------------------|---|------------------------------------|----------------------|---|
| | $\pm 0,3$ mm ve altı | $\pm 0,3$ mm ve üstü | | $\pm 0,3$ mm ve altı | $\pm 0,3$ mm ve üstü | |
| Hat 1 | 9050 | 4662 | 66% | 8227 | 5485 | 60% |
| Hat 2 | 9735 | 3977 | 71% | 9461 | 4251 | 69% |

**Şekil 12.** Sürekli boyuna [11] ve noktasal enine profil ölçümü

Metal kaldırma derinliği: Yeniden profilendirme çalışmalarında hattın ne kadar metal kaldırılacağı tespit edilebilmesi için 1000 m aralıklarla her bir hattın ray eksen merkezinden 0,5 m alan içinde 5 noktadan mantar boyu ölçümleri alınarak toplam 429 nokta saha ekiplerince işaretlenmiştir. O noktadan çalışma yapıldıktan sonra aynı yerlerden alınan 5 nokta ortalaması arasındaki fark metal kaldırma miktarını olarak hesaplanacaktır.

3.2. Hat verilerinin değerlendirilmesi

Hattın teknik özellikleri, trafik durumu, yeniden profilendirme geçmişi, ray kusur durumu, enine ve boyuna ölçüm verileri gibi birçok parametre değerlendirildiğinde verilerin kabul edilebilen düzeltici ve koruyucu yeniden profilendirmeye gerek duyulmuştur.

Hattın kusur derinlikleri ölçüldüğünde 1,5 mm 'ye ulaştığı tespit olmuştur. Özellikle dar kurplarda RCF kusurlarının başladığı ve ilerlediği görülmüştür. Her bir rayda ekartman problemi olmadığı için -5^0 - 70^0 aralığından ideal ray profilinin sağlanması için metal kaldırılmasında sakınca olmayacağı düşünülmüştür. İlk etapta tüm hattın 0,4-0,5 mm aralığında kadar metal kaldırılmasına karar verilmiştir. Bu derinlik dışında olan 1,5 mm'ye kadar olan diğer ray kusurları ise lokal olarak müdahale edilerek düzeltilmesi planlanmıştır.

Yüksek hızlı tren hatlarında yapılan yeniden profilendirme çalışmalarında asgari şartlar EN 13231-2 'de ve TCDD Bakım konseptinde yer almıştır. Çalışmada yüksek hızlı tren hattı için istenilen kalite seviyeleri Tablo 7,8,9 ve 10'da verilmiştir.

Tablo 7. Boyuna profil referans toleranslar [12]

| Dalga Boyu Aralığı (mm) | 10-30 | 30-100 | 100-300 | 300-1000 |
|-------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Pikten Pike Limit | $\pm 0,01$ | $\pm 0,01$ | $\pm 0,015$ | $\pm 0,075$ |
| Boyuna Profil Kalite Sınıfı 1 | 95% | 95% | 95% | 95% |

Tablo 8. Enine profil referans toleranslar ve kalite [12]

| Kalite Sınıfı | Maksimum Sapma Aralığı (pikten pike) | Belirtilen sapma aralığı içerisinde ölçülen noktaların toplam noktalara oranı |
|---------------|--------------------------------------|---|
| Q | 0,6 | 90% |

Tablo 9. Yüzey kalite sınıfı ve ray eğimi [12, 4]

| | |
|------------------------------------|-------------|
| Yüzey Kalite Sınıfı | 2 |
| Maksimum Yüzey Kalite İndeksi (QI) | $QI \leq 5$ |
| Maksimum Geçiş Eğimi | 1/3000 |

4. Çalışma Sonrası Alınan Ölçümler ve Bulgular

Mobil ray taşlama makinesi 0,5 mm metal kaldırılması için her pasta yaklaşık 0,1 mm metal kaldırarak 5-6 pasta metal kaldırma derinliğini sağlayabilmiştir. Hat 1 ve Hat 2 olmak üzere çalışmaya başlayarak 122 iş gününde 428.000 m hattın döner taşlama metodu ile taşlamasını tamamlamıştır.

Ray taşlaması sonrasında üzerinden herhangi bir tren veya süre geçmeden enine ve boyuna profil son ölçümleri devamlı olarak yapılmıştır. Taşlama sonucu her çalışmada kaldırılan metal miktarı kontrollü olarak saha ekiplerince ölçülerek yaklaşık 0,5 mm metal kaldırılmıştır.

Boyuna profil: Hatta taşlama sonrasında alına boyuna profil (ondülasyon) verileri tüm hatta devamlı olarak ölçülmüştür. Ölçümler 100 metrede alınan ortalama verilerden boyuna profilden sapma yüzdesi aşağıda tabloda verilmiştir.

Tablo 10. Tüm hat boyuna profil ölçüm sonuçları

| Hat | Dalga Boyu Aralığı (mm) | 10-30 | 30-100 | 100-300 | 300-1000 |
|-------|-------------------------|--------|--------|---------|----------|
| Hat 1 | Sol Ray | 98,70% | 97,60% | 98,20% | 97,20% |
| | Sağ Ray | 98,10% | 98,50% | 96,10% | 99,20% |
| Hat 2 | Sol Ray | 99,10% | 97,70% | 97,20% | 97,90% |
| | Sağ Ray | 97,80% | 98,70% | 97,70% | 98,20% |

Tüm hatta yapılan boyuna profil ölçümlerinde boyuna profil verilerinin istenilen kalite yüzdesini sağladığı görülmüştür. Bazı lokal alanlardaki 100 m aralıklarla ölçülen boyuna profil verilerinde kalitenin %77 seviyelerine kadar düştüğü görülmüştür. Ancak gün sonunda yapılan toplam çalışmanın (ortalama 4.000 m) sonunda ortalama boyuna profil kalite seviyesi %95 ve üzeri olduğu görülmüştür.

Enine profil: Taşlama sonrasında devamlı olarak yapılan enine profil ölçümleri değerlendirilmiştir. Ölçümler 500 m aralıklarla tüm hatta bulunan noktasal veriler değerlendirilerek oluşturulmuştur. Hesaplanan istatistiki veri aşağıda tabloda verilmiştir.

Tablo 11. Tüm hat boyuna profil ölçüm sonuçları

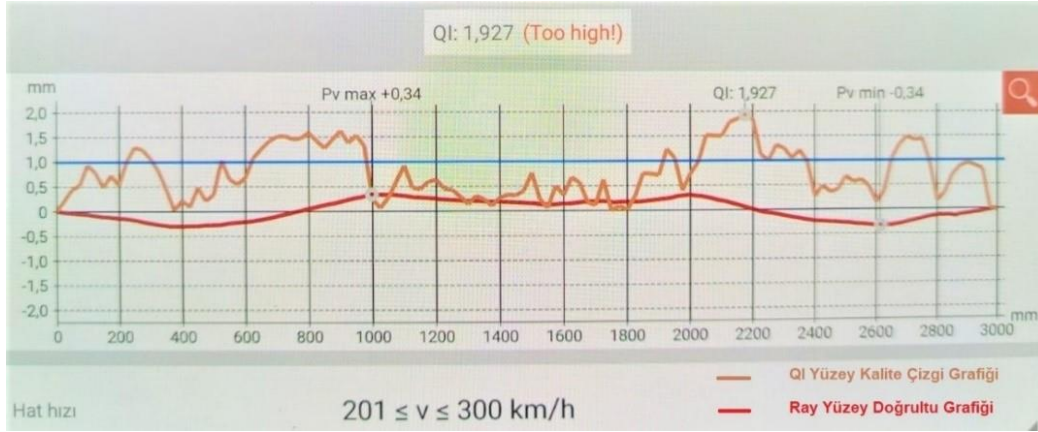
| Hat | Sol Ray Sapma Miktarları (adet) | | Sol Ray Kalite Yüzdesi ($\pm 0,3$) | Sağ Ray Sapma Miktarı (adet) | | Sağ Ray Kalite Yüzdesi ($\pm 0,3$) |
|------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| | $\pm 0,3$ mm ve altı | $\pm 0,3$ mm ve üstü | | $\pm 0,3$ mm ve altı | $\pm 0,3$ mm ve üstü | |
| Hat1 | 12890 | 822 | 94% | 13163 | 549 | 96% |
| Hat2 | 12477 | 1235 | 91% | 12888 | 824 | 94% |

Ölçümlerde enine profil kalite indeksi %91 ve üzerinde çıktığından hedeflenen enine profil sağlanmıştır. Bazı lokal alanlardaki 500 m aralıklarla ölçülen enine profil verilerinde minimum

kalite %72 seviyelerine de düştüğü görülmüştür. Ancak gün sonunda yapılan toplam çalışmanın (ortalama 4000 m) sonunda ortalama boyuna profil kalite seviyesi %90 ve üzeri olduğu görülmüştür.

Yüzey kalitesi: Tüm hat her 1000 metrede bir genel karakteristiği sağlayacak şekilde olmak üzere sağ ve sol ray için 1 metrelik alanda elektronik doğrultu mastarı ile alınan ölçümlerde maksimum QI verileri hesaplanarak tüm ölçümlerde $QI < 3$ olduğu görülmüştür.

Geçiş eğimi: Tüm hatta çalışmanın tamamlanması ve yolun işletmeciliğe açılması durumlarında makinenin taşlamaya başladığı ve bitirdiği noktalar en fazla 1/3000 eğim olacak şekilde ölçümler elektronik doğrultu ölçüm mastarı ile yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarında bu geçiş eğiminin aşılmadığı görülmüştür.



Şekil 13. 3 m alanda geçiş eğimi ve yüzey kalitesi ölçüm grafiği

Metal kaldırma: Her 1000 metrede işaretlenen toplam 429 noktadan sahada aletlerinden alınan verilerde son ölçüm verileri alındığında 0,4-0,5 mm aralığında metal kaldırılmasının doğrulandığı görülmüştür.

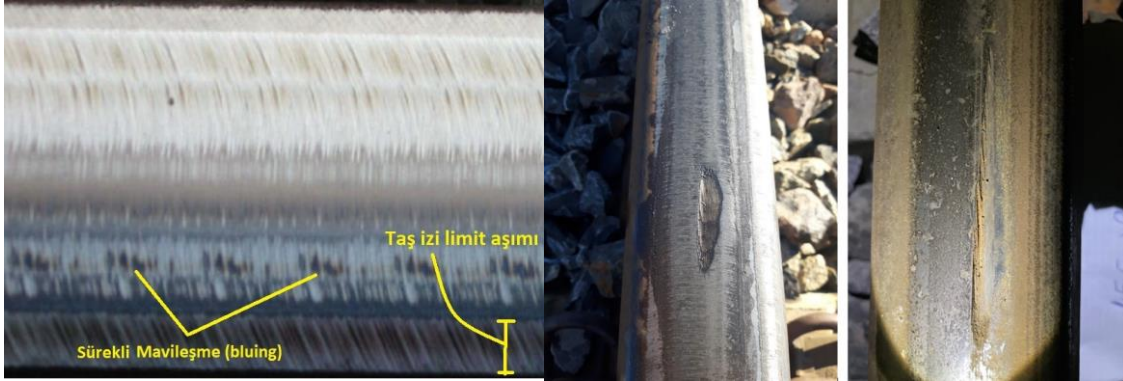


Şekil 14. Metal kaldırma derinliğinin ölçülmesi [13]

Lokal tamiratlar: Hatta yapılan taşlamada 0,4-0,5 mm talaş kaldırılmasından sonra 1,5 mm kadar ulaşan hataların derinliği yaklaşık 0,5 mm kadar azalmış olup 0,5-1,5 mm arasında başta belirlenen kilometrelerde noktasal taşlama çalışmaları yapılmıştır. Noktasal kusurlarda her noktasal tamirat makine ve cihaz ölçüm aralıkları da dikkate alınarak yaklaşık 50 metre alanda yapılmıştır. Kısa alanda yapılan taşlama çalışmalarında istenilen kalite sınıflarında bu 50 m alanda enine, boyuna ve ray eğimi ölçümlerinin alınarak kalite gereksinimleri sağlanmıştır.

Yüzey kontrolü: Yapılan çalışmalarda taşlama yapılan alan sahada gözle kontrolü sürekli yapılmıştır. Taşlama taşı değmeyen veya yeterli talaş derinliği olmayan noktaların varlığı tespit

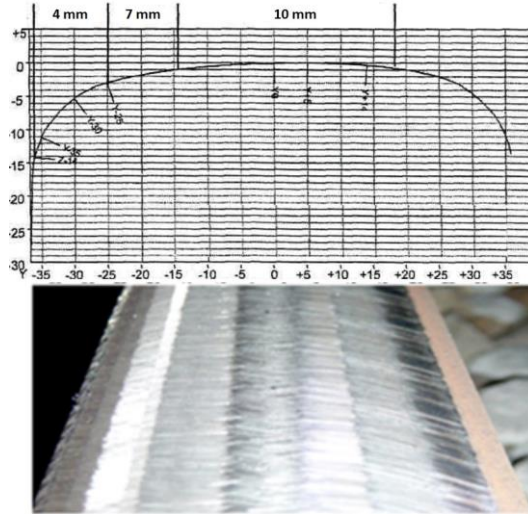
edilmiş bu noktalara tekrar girilerek düzeltme yapılmıştır. Ayrıca taşlama işleminde meydana gelen 1 mm kadar derinlik oluşan taş vuruntuları da tespit edilerek lokal tamiratları yapılmıştır.



Şekil 15. Sürekli menevişleme [3] ve taşlama makinesinin rayda oluşturduğu kusur

Ray ve travers üzerinde talaş tozu kaldığından gerekli iyileştirme makinede yapılmıştır. Ayrıca çizgisel olarak devamlı olarak menevişleme (lacivert taş yakması) olduğu görülmüştür. Makinede ve taşlama taşında yapılan iyileşme ile önüne geçilerek menevişleme olan bölge tekrar taşlanmıştır.

Görsel kontrollerde taşlama yapılan ray dizisi boyunca taşlama taş izleri (faseta) oluşmuştur. Bu fasetaların boyu ray yüzeyindeki radius alanlarında sınırlandırılmıştır. Fasetaların boyutları mantar köşesinde 4 mm, omuzda 7 mm ve ray tepesinin 10 mm 'yi geçmemiştir.



Şekil 16. Taş izlerinin yüzeydeki enine limitleri ve bir görünüm [10]

Eşdeğer koniklik: Roger 800 yol geometrisi ölçüm makinesi ile tespit edilerek el ölçüm aletleri ile de doğrulanan eşdeğer koniklik hataları olan bölgelerde taşlama sonrasında teorik eşdeğer koniklik oranları (GW1/40 ve S1002 tekerlek profili için [14]) 0,01-0,10 aralığında olduğu görülerek kusurun ortadan kalktığı tespit edilmiştir.

Günlük iş sonu raporlama: Günlük yapılan çalışma sonrasında hattın son ölçümleri alınıp değerlendirilmiştir. Günlük iş sonu raporunda hat adı, çalışma yapılan km başlangıç-bitişi, yeniden profilendirilen yol miktarı, boyuna profil sapma yüzdeleri, enine profil sapma yüzdesi, yüzey kalite indeksi, geçiş eğimi kontrolü, metal kaldırma derinliği, ray yüzey kontrolü, taş izleri

ve boyutları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarının uygun bulunmasıyla hat işletme hızında açılabilmiştir. Günlük yapılan iş sonu oluşturulmuş örnek bir rapor aşağıda verilmiştir.

| RAY YENİDEN PROFİLLENDİRME | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|---------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------|----------------|--|-------------------------|---------------------------|---|--------------------------|-------------------------------------|---|--|----------------------------|--|
| İŞ SONU GÜNLÜK KONTROL ve ÖLÇÜM SONUÇLARI DEĞERLENDİRME RAPORU | | | | | | | | | | | | | Rapor No: | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | Tarih:/...../..... | | | | | |
| Sıra No | Hat Kesimi -Ray Dizisi (stasyon Aralığı) | Ray Yeniden Profillendirme Yapılan Hat Aralıkları (km+hm) | | Taşlama Yapılan Alan (hat.m) | Boyuna Profil Sapma Yüzdesi | | | | Ortalama Enine Profilden Sapma Yüzdesi | Yüzey Kalite İndeksi QI | Kaç pasta profil düzeltme | Geçiş Eğimi (tanları) (maksimum 1/3000) | | **Ortalama Metal Kaldırma Derinliği | Taşlama (fasetta) izlerinin Ölçüm ve Kontrolü | Ray Yüzeyi ve Hattın Kontrolü (Menevileşme, ray üstü talaş temizliği, ray dizisi kontrolü vs.) | Hattın İşletme Hızı (km/h) | TÜM ÖLÇÜM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ |
| | | Başlangıç | Bitiş | | 10<A<=30 mm | 30<A<=100 mm | 100<A<=300 mm | 300<A<=1000 mm | | | | Başlangıç (mm) | Bitiş (mm) | | | | | |
| 1 | Hat 1-Sağ | 506+321 | 511+321 | 5000 | 1% | 2% | 3% | 2% | 2% | 2,2 | 6 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | Uygun | Kontrol edildi | 250 | UYGUNDUR |
| 2 | Hat 1-Sağ | 506+321 | 511+321 | 5000 | 1% | 2% | 3% | 2% | 4% | 2,2 | 6 | 0,3 | 0,1 | 0,5 | Uygun | Kontrol edildi | 250 | UYGUNDUR |
| RAPORLAMAYI YAPANLAR | | | | | | | | | | | | | ONAYLAYAN | | | | | |
| Adı-Soyadı, Unvan, Tarih, İmza | | | | | | Adı-Soyadı, Unvan, Tarih, İmza | | | | | | Adı-Soyadı, Unvan, Tarih, İmza | | | | | | |

Şekil 17. Örnek iş sonu günlük kontrol ve ölçüm sonuçları değerlendirme raporu

5. Sonuç ve Öneriler

Ankara–Eskişehir YHT hattı içerisinde Hat1 ve Hat 2 olarak toplam 428.000 hat.m alanın yeniden profillendirme çalışmaları döner taşlama metoduna göre yapılmıştır. 122 iş günü süren çalışma trafik yükü, yol kapatma süresi ve ray geometrik durumu dikkate alındığında günlük ortalama 3500 hat.metre kapasite ile çalışma yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında boyuna profil verilerinin minimum %96, enine profilin minimum %91, yüzey pürüzlülüğünün ise $QI < 3$ olması Yüksek Hızlı Tren Hattı için kalite taleplerini karşıladığı görülmüştür.

Günlük çalışmalarda verilen 5 saatlik yol kapatma süresi içerisinde rayın mantar yüzeyinden 0,5 mm talaş kaldırabilmesi için makinenin 5-6 pas yapması günlük çalışma hızını düşürmüştür, Yüksek Hızlı Tren hatlarında özellikle yol kapatma süresinin kısa olduğu hatlarda daha yüksek kapasiteli (fazla sayıda taş veya ünite bulunan) makine kullanılması gerektiği görülmüştür. Ayrıca günlük yapılan çalışma sonucunda alınan ölçüm verilerinin istenilen seviyede olmasına rağmen kısa aralıkla alınan ölçümlerde tolerans dışı olduğu görülmüştür.

Ray yüzeyinden 70° ila -5° aralığındaki yüzeyinden metal kaldırılması istenmiş olmasına rağmen ölçümler sadece ray ekseninden alınan verilere göre metal kaldırıldığı kabul edilmiştir. Ray eksenindeki ray yüzeyinden ne kadar metal kaldırıldığı lazer ve mekanik aletlerle ölçümler yapılsa da hassasiyet sorunları nedeniyle anlamlı ölçümler alınamamıştır. Dolayısıyla ray yüzeyinin hangi noktasından ne kadar metal kaldırıldığını ölçebilen ve hassasiyet oranı en fazla $\pm 0,01$ olan ray profiline has cihaz veya alet kullanılması gerekli görülmüştür.

Çalışma sonrasında YHT setleri ile yapılan sürüş kontrollerinde sürüş konforu artmış ve yolcuların hissettiği araç titreşimlerinin ve gürültünün azaldığı tespit edilmiştir. Alınan sonuçlar ve ölçüm verileri değerlendirildiğinde Yüksek Hızlı Tren Hatlarında döner taşlama metodunun uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Yeniden profillendirme çalışmalarında döner taşlama metodunda karşılaşılan zorluklar ve çalışma sonucunda ortaya konan bir dizi tecrübeler aşağıda verilmiştir.

- Yeniden profillendirme yapılması gereken hattın belirlenmesinde rayın gözle muayenesi sonucu kusur durumu, rayın enine ve boyuna profil ölçümleri, tekerlek temas yorulma çatlak (RCF) boyutlarının tespiti için tüm hattın Eddy Current ölçüm sistemi ile çatlak ölçüm

sonuçları alınarak rayın hangi bölgesinden ne kadar metal kaldırılacağı önceden belirlenmelidir.

- Hattın ondülasyon ölçümleri (boyuna profil) devamlı bir şekilde yapılmalıdır. Yüksek Hızlı Tren Hatlarında en fazla 100 metre aralıklarla ondülasyon verisi alınarak istenilen kalite toleransları bu aralıklarla hesaplanmalıdır. Çünkü günlük çalışma sonunda toplamda sapma oranı kalite toleransı içerisinde olsa da lokal alanlardaki boyuna profil kalitesi istenilen düzeyde olmayacaktır. Bu durumda lokal bölgelerde ondülasyon hataları zamanla büyüyecektir.
- Rayın enine profil değerleri emniyet açısından önemlidir. Bu sebeple rayın enine profil durumu devamlı olarak ölçülmelidir. Enine profil ölçümleri Yüksek Hızlı Tren Hatlarında devamlı ölçülemediği halde en fazla 10 m aralıklarla elle yapılacak noktasal ölçümler alınarak 50 metredeki sapma miktarları hesaplanmalı ve buna göre kalite değerlerini sağlamalıdır. Yeniden profilendirme çalışmalarının sonunda enine profil raporlama en fazla 50 m aralıklarla yapılarak belirtilen kalite seviyelerini bu aralıklarla sağlamasına dikkat edilmelidir. Aksi halde lokal alanda ray profilinde enine kusurlar büyüyecek olup ray tekerlek etkileşimi bozulabilecektir.
- Yeniden profilendirme çalışmalarında Yüksek Hızlı Tren Hatlarında bakım faaliyetlerinde bakım süresinin kısıtlı olmasından ölçüm sistemlerinin raporlamanın zaman alması veya taşıma işleminin tamamlanamaması nedeniyle hız kısıtlaması konulmak istenmesi durumlarında çalışmada yeniden profilendirme verilerini tutarlılığının sağlanması ve yolun işletmeye açılmadan hemen önce eşdeğer koniklik değerlerinin kontrol edilmesi için teorik eşdeğer konikliğin de hesaplanması önerilir. Demir yolu işletmeciliğinde yeniden profilendirmeden kaynaklı ray profili bozukluğunda hangi durumlarda ne kadar bir hız kısıtlaması konulacağı belirlenmemiştir. Bu durumda ray profilinin durumu teorik eşdeğer koniklik parametresi ile değerlendirilmiş olacaktır. Ray profilinde yapılan çalışmalar ekartman ve eşdeğer konikliği etkileyeceğinden bu parametrelerin değerlerine göre hız kısıtlaması uygulanabilecektir.
- Yeniden profilendirme çalışmalarında kusur derinliğine göre kaldırılacak metal kalınlığı belirlenmelidir. Bu değer ray yüzey kusur derinliğine 0,1 mm ekleyerek belirlenmelidir.
- Yeniden profilendirme çalışmalarında mevsimsel döngüler önem taşımaktadır. Özellikle sıcaklığın sıfırın altında olduğu kar yağışının ray tabanının üzerinde olduğu durumlarda lazerle profil okuyabilen alıcılar ölçüm alınamayacaktır. Ayrıca aşırı soğuk ve kötü hava koşulları saha ekibinin çalışmasını zorladığı gibi makine ve aletlerde arızalar oluşabilecektir. Özellikle hat boyunca veya lokal bazı noktalarda bulunan yabancı ot veya farklı malzemeler ölçüm sonuçlarını etkileyerek sağlıklı ölçüm yapılmasını engelleyecektir. Dolayısıyla çalışmanın bahar ve yaz aylarında hatta otla mücadele yapıldıktan sonra yapılması tavsiye edilmektedir.

Kaynakça

- [1] E. Arslan, “Demiryolu Raylarının Bakımı: Yeniden Profilendirme (Reprofiling) Prosedür ve Kabul Şartları” 2020. [Online]. Available: <https://elvanarslanet.wordpress.com/2020/03/28/demiryolu-raylarının-bakimi-yeniden-profilendirme/> [Accessed: 12-Sep-2022].
- [2] P. Sroba, “Rail Grinding Best Practice For Committee 4, Sub-Committee 9” Principal Engineer, National Research Council of Canada, Canada, 2003.
- [3] *TS EN 13231-5 Demiryolu uygulamaları- Hat- İşlerin kabulü- Bölüm 5: Düz hat, makaslar, geçitler ve dilatasyon contasında ray profili yenileme prosedürü*, TSE, Ankara, 2018
- [4] *IRS 70712 Rail Defect*, International Union of Railways (UIC), Paris, 2018

- [5] Guidelines For Working of Rail Grinding Machine, Indian Railways Institute of Civil Engineering, Pune, Indian. 2012
- [6] M. Mesaritis, M. Shamsa, P. Cuervo, J.F. Santa, A. Toro, M.B. Marshall, R. Lewis,. “A Laboratory demonstration of rail grinding and analysis of running roughness and wear,” *Wear*, vol. 456-457, pp.1-2., September 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203379
- [7] R. Stock, M. Seeleithner, “Efficient implementation of modern rail maintenance technologies,” *Jahrbuch Für Schienenverkehr & Technik, Eisenbahn Ingenieur Kompendium (EIK 2022)*, pp. 72, 2022
- [8] Z. Kędra, “Technologia Robót Torowych” Gdańsk, Poland., Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej, 2015
- [9] *TS EN 14363+A1 Railway applications - Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running Behaviour and stationary tests*, TSE, Ankara, 2022
- [10] TCDD Hat Bakımı El Kitabı, TCDD Yol Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2013.
- [11] A. F. R. Pereira, “Rail corrugation: a software tool for detection and analysis using wavelets” Master Thesis, Licenciatura em Ciências de Engenharia Electrotécnica e de Computadores., Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa., 2018
- [12] *TS EN 13231-2, “Demiryolu uygulamaları- Demiryolu- İşlerin kabulü- Bölüm 2: Düz hatlar, makaslar, kruvazmanlar ve klavuz raylarda yeniden profillenmiş raylarının kabulü*, TSE, Ankara, 2021.
- [13] Grinding Depth Measuring Gauge Wilmec HT1 documentation. Accessed: Ekim. 11, 2022. [Online]. Available: <http://www.wilmec.it/images/ferrovia/HT1-Wilmec-ENG-rail.pdf>
- [14] *TS EN 13715, Demiryolu uygulamaları- Tekerlek takımları ve bojiler - Tekerlekler - Yuvarlanma yüzeyi profile*, TSE, Ankara, 2020.

Özgeçmiş



Elvan ARSLAN

1986 tarihinde Yozgat’ın Sorgun ilçesinde doğmuştur. Ortaöğrenimini burada tamamlayarak lisans eğitimini T.C. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde, tezli yüksek lisansını T.C. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Trafik Planlama ve Uygulama ABD’de yapmıştır. TCDD Taşımacılık ve TCDD’de 2007 yılından beri çeşitli birimlerde ve unvanlarda görev yapmış olup halen TCDD Ankara 8. Bölge (YHT) Müdürlüğü’nde Mühendis unvanında görev yapmaktadır. Ayrıca Uluslararası Kaynak Mühendisliği (IWE) diplomasına sahiptir. İlgi alanına giren araştırma konuları demiryolu üstyapısı, ray kaynağı, çeken-çekilen demiryolu araçları bakım işletmeciliği ve makine tasarımıdır.

E-Posta: elvan@live.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.



Elektrikli Lokomotif Sistemlerinde Cer Transformatörü ve Baraların Oluşturduğu Manyetik Alanların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hesaplanması

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE^{*1}, Yunus Berat DEMİROL², Oluş SÖNMEZ¹, Mehmet Aytaç ÇINAR³, Bora ALBOYACI⁴

¹ Sönmez Transformator San. ve Tic. A.Ş., Kocaeli, Türkiye

² Genetek Güç Enerji Ltd., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, Türkiye

³ Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksek Okulu, Kocaeli, Türkiye

⁴ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

*s.curukova@sonmeztrafo.com.tr

(Alınış/Received: 15.09.2022, Kabul/Accepted: 31.10.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Güç sistemi ekipmanlarının etrafında oluşturduğu manyetik alan yoğunluğunun insan sağlığı üzerine olan etkileri çeşitli kuruluşlar tarafından incelenmektedir. İnsanların güç sistemi ekipmanlarının şebeke frekansında oluşturduğu manyetik alan yoğunluğuna maruz kalması durumunda izin verilen sınır değerler International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) tarafından belirlenmiştir. Buna göre kamuya açık alanlar ve çalışma ortamları için izin verilen en yüksek manyetik alan yoğunluğu değerleri sırası ile 0,2mT ve 1mT olarak belirtilmiştir. Bu kapsamda lokomotiflerde cer gücünü sağlamak için kullanılan cer transformatörü, bara, sürücü ve motor gibi elemanların oluşturduğu manyetik alan yoğunluklarının önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Bu bileşenlerin etrafında oluşan manyetik alan yoğunluklarının yolcuların ve personelin sağlığı için belirlenen sınırların altında kalması önerilmektedir. Bu sebepten dolayı lokomotif sistemlerinin tasarımı aşamasında bileşenlerin etrafında oluşan manyetik alan yoğunluklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında lokomotiflerde kullanılmakta olan bir cer transformatörünün ve örnek bir bara yapısının oluşturduğu manyetik alan yoğunluklarının hesaplanması hedeflenmiştir. Bu amaç ile cer transformatörü, basit bir lokomotif kasası ve bara yapısının geometrik modeli üç boyutlu koordinat sisteminde oluşturulmuş ve Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar analizi yazılımına aktarılıp analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre belirlenen ölçüm düzlemlerinde manyetik alan yoğunluklarının sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Manyetik alan yoğunluğu değerleri modelin geometrik yapısına, malzeme parametrelerine ve işletme durumuna bağlı olarak değiştiğinden dolayı bu analizlerin tasarım aşamasında değerlendirilmesinin gerekliliği çalışma kapsamında vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Cer transformatörü, Sonlu elemanlar analizi, Manyetik alan, Ekranlama, Maxwell denklemleri

Calculation of Magnetic Fields Generated by Traction Transformers and Busbars in Electric Locomotive Systems by Finite Element Method

Abstract: The effects of the magnetic field intensity created around the power system equipment on human health are examined by various organizations. Permissible limit values have been determined by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) when people are exposed to the magnetic field intensity generated by the power system equipment at a low frequency. Accordingly, the maximum allowable magnetic field intensity values for public areas and working environments are specified as 0.2mT and 1mT, respectively. In this context, it is seen that the magnetic field intensity generated by components such as traction transformer, busbar, driver, and motor used to provide traction power in locomotives are essential parameters. Therefore, it is recommended that the magnetic field intensities around these components remain below the limits for the health of passengers and personnel. For this reason, it is necessary to determine the magnetic field intensities around the components during the design phase of the locomotive systems. This study aimed to calculate the magnetic field densities generated by a traction transformer and a sample busbar structure used in locomotives. For this purpose, the geometric

Atıf için/Cite as: S. Çürükova Kale, Y.B. Demiroğlu, O. Sönmez, M.A. Çınar, B. Albozacı, "Elektrikli lokomotif sistemlerinde cer transformatörü ve baraların oluşturduğu manyetik alanların sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 54-65, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1175771

model of the traction transformer, a simple locomotive casing, and busbar structure was created in a three-dimensional coordinate system and transferred to the Ansys Electronics Suite finite element analysis software, and analysis studies were carried out. Finally, it is seen that the magnetic field intensities in the measurement planes determined according to the analysis results are below the limit values. Since the magnetic field intensity values change depending on the geometric structure of the model, material parameters, and operational status, the necessity of evaluating these analyses at the design stage has been emphasized within the scope of the study.

Keywords: Traction transformer, Finite element analysis, Magnetic field, Shielding, Maxwell equations

1. Giriş

Demiryolu sistemlerinde kullanılmakta olan cer transformatörü, bara ve kablo gibi akım taşıyan bileşenler manyetik alan kaynağıdır. Manyetik alanların canlıların sağlığı üzerindeki etkileri literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Bu etkilerden kaynaklanan olumsuzlukların en aza indirilebilmesi amacıyla canlıların karşı karşıya kalabileceği elektromanyetik alanlara ilişkin sınır değerler ICNIRP tarafından belirlenmiştir. Bu sebepten dolayı tren sistemlerinde bulunan lokomotiflerde kullanılan cer transformatörü [1], bara, sürücü ve motor gibi elemanların [2] etrafında oluşan manyetik alanların tasarım aşamasında hesaplanması gerekmektedir. Literatürde baralı kanal birimi sistemlerinin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [3-5] endüstriyel ortamların ve transformatör merkezlerinin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [6-7], yüksek güçlü transformatörlerin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [8-9], cer tren transformatörlerinin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [10], çalışmalar bulunmaktadır. Bunun yanında katener sistemlerin etrafında oluşan manyetik alanların değerlendirildiği [11-14], lokomotiflerde kullanılan pantograf sistemlerinin elektriksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır [15-18]. Buna karşın lokomotiflerin etrafında ve içerisinde cer transformatörü ve baralardan kaynaklı oluşan manyetik alanların hesaplandığı çalışmaların literatürde çok sınırlı olduğu görülmektedir. Manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalarda belirlenen maruz kalma seviyelerinin gerçek hayatta karşılığının anlaşılabilmesi için sistemlerin etrafında oluşan manyetik alan seviyelerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında örnek bir cer transformatörünün ve bara modelinin etrafında oluşan manyetik alanların hesaplanması hedeflenmektedir. Bu amaç ile sistemler bilgisayar ortamında modellenmiş ve Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar analizi yazılımı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

1.2. Manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkilerinin ve sınır değerlerin incelenmesi

Kamuya açık alanlar ve çalışma ortamları için şebeke frekansında izin verilen en yüksek manyetik alan yoğunluğuna maruz kalma değerleri ICNIRP tarafından sırası ile 0,2mT ve 1mT olarak belirtilmiştir [19]. Elektromanyetik alanlara mesleki olarak maruz kalan insanlar, genellikle bilinen koşullar altında elektromanyetik alana maruz kalan, buna bağlı olarak oluşabilecek potansiyel risklerin farkında olan ve bunun için uygun önlemleri almak üzere eğitilmiş yetişkin insanlardır. Bunun yanında genel halk her yaştan ve farklı sağlık durumuna sahip bireylerden oluşur, özellikle elektromanyetik alanlara karşı özel bir duyarlılığı olan insanları içerebilir. Genel halk çoğu zaman elektromanyetik alana maruz kaldığının farkında bile değildir. Bunun yanında halkın bireysel üyelerinin elektromanyetik alana maruz kalmayı en aza indirmek için önlemler alması veya elektromanyetik alanın sağlıklarına etkisini bilmesi beklenmez. Elektromanyetik alana maruz kalma konusunda halk için alınan önlemlerin daha geniş kapsamlı ve fazla olmasının sebebi budur [20-24].

İnsan ve hayvan bedenleri elektrik alandan önemli derecede etkilenir. İnsan vücudunun manyetik geçirgenliği hava ile aynıdır, dolayısıyla manyetik alan içeren bir çevrede bulunduğumuzda vücudumuzda çevre ile yaklaşık aynı miktarda manyetik alan oluşur. İnsan vücudu manyetik alan çizgilerinin yönelimine etki etmez. Manyetik alanların vücuda etkilerinden biri Faraday

prensibinden dolayı vücut yüzeyinde oluşan akımlardır [23-25]. İnsanların manyetik alana maruz kalmasındaki dozimetri değerinin temel olarak baz aldığı özellikler şunlardır;

Belirli bir manyetik alan büyüklüğü ve yönelimi için, vücut boyutu daha büyük insanların bedenlerinde daha çok elektrik akımı indüklenir, çünkü vücut iletken olduğu için büyük insanlarda iletken boyutu da daha büyüktür. Vücutta indüklenen akım vücudun maruz kaldığı manyetik alanın yönelimine bağlıdır. Manyetik alan bedenin önünden arkasına doğru yöneldiğinde genel olarak vücutta indüklenen akım en büyük olur ancak bazı organlar için en yüksek indüklenen akım değerleri farklı yönelme durumları için oluşabilir. Manyetik alan bedene dik olarak yöneldiğinde ise vücutta en az akım indüklenir. Bunun yanında vücutta indüklenen akımın dağılımı çeşitli organ ve dokuların iletkenliğinden etkilenir [26-27].

2.2. Manyetik ekranlama prensibi

Transformatör kazanlarında kullanılmakta olan yapısal çelik malzeme ve lokomotif kasasında kullanılmakta olan alüminyum malzeme doğal bir ekran görevi görmektedir. Bu bölümde manyetik alan ekranlama prensipleri açıklanmıştır. Biot-Savart yasasına göre uzayın belirli bir noktasındaki manyetik alan, bu alanı oluşturan akıma bağlı olarak bulunabilir. Biot-Savart yasası Denklem 1. ile ifade edilmektedir.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dlx\hat{r}}{r^2} \quad (1)$$

Burada, B manyetik alan yoğunluğu (T), I iletken içerisinde geçen akım (A), μ_0 serbest uzayın manyetik geçirgenliği, r ilgili noktasının içerisinde akım geçen iletkene uzaklığı (m) olarak tanımlanmaktadır. Akım taşıyan iletkenlerin veya bobinlerin etrafında oluşan manyetik alan şiddetini azaltmak için ekranlama uygulaması yapılabilir. Ekranlama, elektromanyetik kaynak ile gözlem noktası arasına uygun malzeme ve yapıda elemanlar yerleştirilerek gözlem noktasındaki manyetik alan şiddetinin azaltılmasıdır. Bu amaç için genelde elektriksel iletkenlik değeri veya manyetik geçirgenlik değeri yüksek olan malzemeler kullanılır [28].

Yüksek iletkenlik değerine sahip olan malzemelerde ekranlama, girdap akımları yardımı ile gerçekleşir. Ekran malzemesinin maruz kaldığı manyetik alandan dolayı içerisinde girdap akımları oluşur ve oluşan bu girdap akımları kendini oluşturan manyetik alana ters bir yönde manyetik alan oluşturur. Bunun sonucunda manyetik alan ekranın yüzeyine paralel bir biçimde şekillenmeye zorlanır. Yüksek manyetik geçirgenlik özelliğine sahip malzemelerde ekranlama prensibi ise akı yönlendirilmesi yoluyla olur. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip ferromanyetik malzemelerde akı metalin içine doğru, alana dik olarak ve yoğunlukla ekrandan geçmeden ekran içi boyunca şekillenir.

2. Metot

Elektrik sistemlerinde kullanılan bileşenlerin etrafında oluşan manyetik alanların hesaplanması basit yapılar dışında teorik yöntemler ile mümkün olmamaktadır. Bu kapsamda teorik olarak hesaplanması oldukça zor veya mümkün olmayan parametrelerin hesaplanması için sonlu elemanlar analizi yönteminin kullanılması günümüzde vazgeçilmez olmaktadır.

2.1. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili model geometrilerinde manyetik alanlar hesaplanabilmektedir. Bu yöntem ile, ilgili geometri üzerinde sonlu sayıda bir ağ yapısı oluşturulmakta ve bu ağ yapısı üzerinde Denklem 2.-Denklem 5. çözülmektedir [29].

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

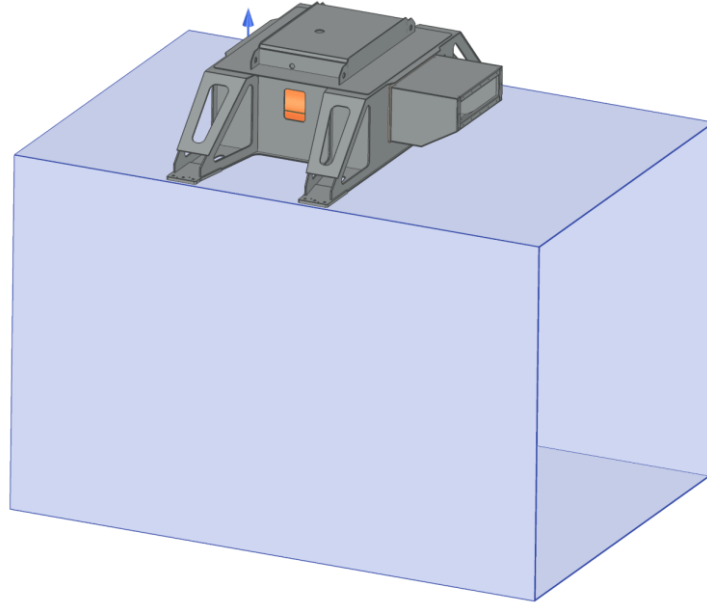
$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (5)$$

Burada, H manyetik alan şiddeti vektörü (A/m), J akım yoğunluğu vektörü (A/m²), D elektrik akı yoğunluğu vektörü (C/m²), t zaman (s), E elektrik alan şiddeti vektörü (V/m), B manyetik alan yoğunluğu vektörü, ρ yük yoğunluğu (C/m²) olarak tanımlanmaktadır.

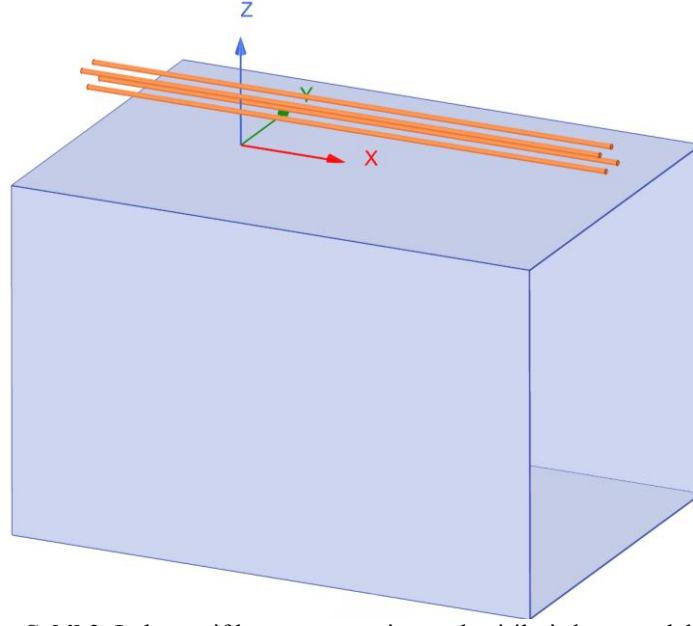
2.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme çalışmaları

Sonlu elemanlar yönteminde analizi gerçekleştirilecek olan cer transformatörü modeli SolidWorks programında üç boyutlu olarak çizilmiştir. Analizlerin gerçekleştirilebilmesi için cer transformatörünün detaylı olarak tüm parçalarının çizildiği modelin analizlerde kullanılmasına gerek yoktur. Bu kapsamda cer transformatörü modeli basitleştirilmiş ve örnek bir lokomotif kasası üzerine yerleştirilmiştir. Bu durum Şekil 1. üzerinde gösterilmiştir.



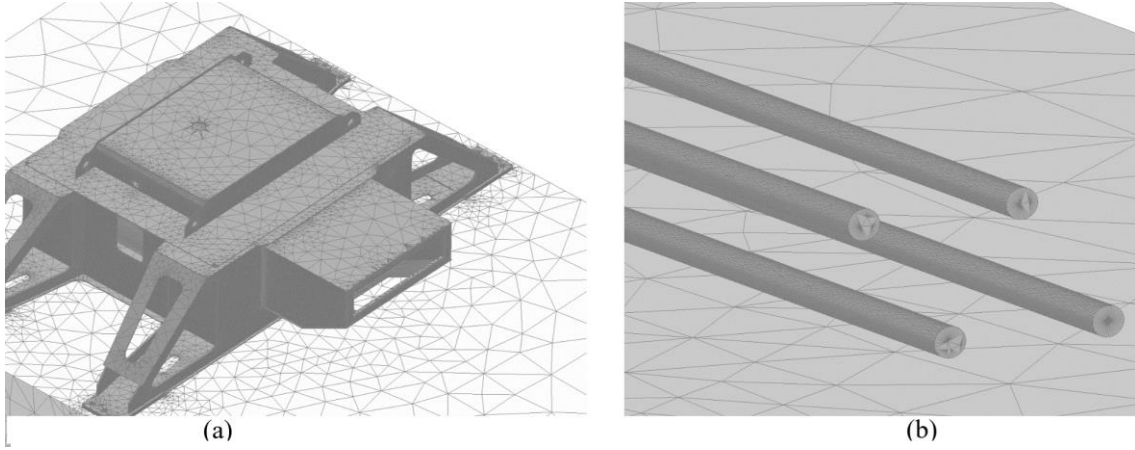
Şekil 1. Cer transformatörünün basitleştirilmiş ve lokomotif kasası üzerine eklenmiş modeli

Cer transformatörüne ek olarak lokomotif üzerinde bulunması muhtemel bara yapısı için de sonlu elemanlar analizi modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda cer transformatörünün buşing bağlantılarından bakır baraların çıktığı ve bu baraların lokomotifin üzerinde doğrusal olarak devam ettiği varsayılmıştır. Gerçek durum bundan farklı olabilir fakat bu analiz sadece manyetik alan etkisinin anlaşılabilmesi için oluşturulmuştur. Şekil 2. Üzerinde lokomotifin üzerinde bulunan baraların yapısı gösterilmiştir. Analizlerde Şekil 2.'de kullanılmış olan modelin etrafında oluşan manyetik alan dağılımı belirlenmiştir. Manyetik alan analizleri için ortamdaki manyetik alan şiddeti sıfır Tesla olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Lokomotif kasasının üzerine yerleştirilmiş bara modeli

Analizlerde kullanılan cer transformatörünün iki adet cer sargısı bulunmakta ve her sargıdan 1000A geçmektedir. Buna bağlı olarak bara modellerinden de aynı akım geçmektedir. Analizler üç boyutlu koordinat sisteminde eddy akımı çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerin gerçekleştirildiği iş istasyonunda “128 Gb 1866 Mhz” bellek, “NVIDIA Quadro K2000” ekran kartı ve iki adet “Intel(R) Xenon(R) CPU E5-2683 v3 işlemci kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan mesh yapısı cer transformatörü ve bara modelleri için Şekil 3. üzerinde gösterilmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Tablo-1 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) Cer transformatörü analizlerinde kullanılan mesh yapısı (b) Bara analizlerinde kullanılan mesh yapısı

Tablo 1. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

| Modeldeki kısım | Elektriksel iletkenlik (S/m) | Görelî manyetik geçirgenlik (μ_r) |
|----------------------|---------------------------------|--|
| Nüve | 2000000 | B-H eğrisi |
| Sargılar | 58000000 | 0,999991 |
| Transformatör kazanı | 2000000 | B-H eğrisi |
| Bara | 58000000 | 0,999991 |
| Lokomotif gövdesi | 38000000 | 1,000021 |

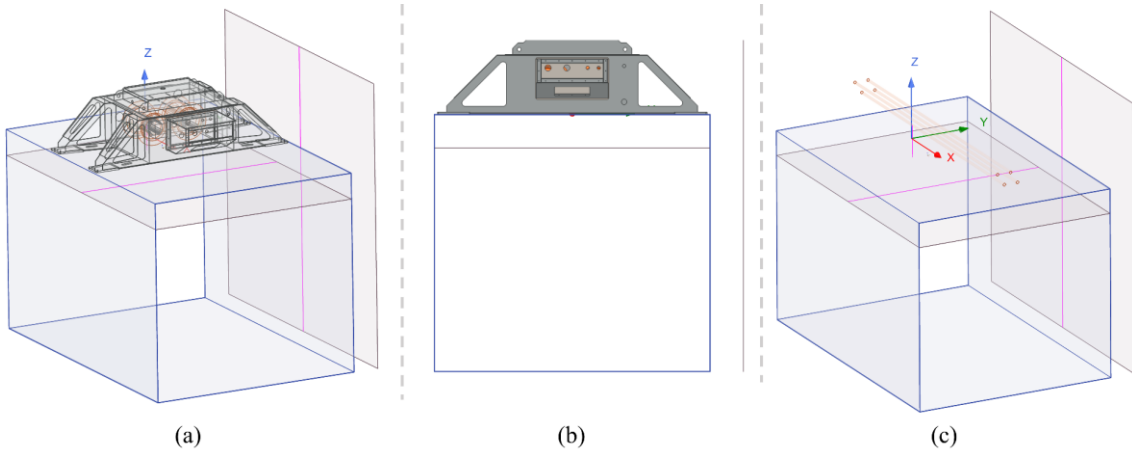
3. Bulgular

Analizler ile hesaplanması hedeflenen parametre cer transformatörünün ve baraların etrafında oluşturduğu manyetik alanlardır. Bu manyetik alanlar hem lokomotifin içinde hem de dışında oluşmaktadır. Lokomotifin içinde oluşan manyetik alan dağılımı yolcular ve tren personeli için önemli olmaktadır. Lokomotifin dışında oluşan manyetik alan ise tren perona geldiğinde, peronda bekleyen yolcular için önemli olmaktadır.

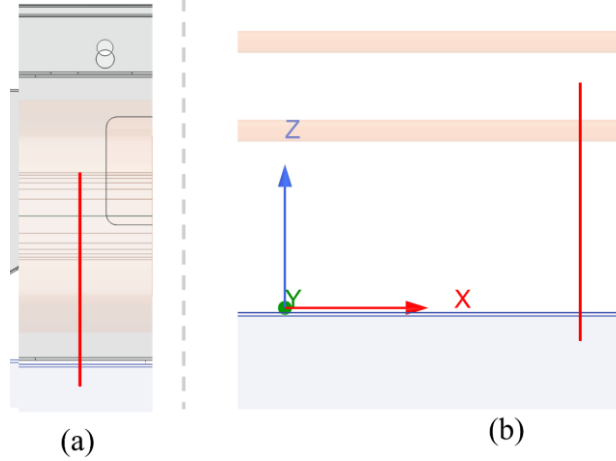
Bu kapsamda oluşturulan sonlu elemanlar modellerinde çeşitli düzlemler ve çizgiler belirlenmiştir. Cer transformatörlerine özel olarak hazırlanmış olan TS EN 60310 (Demiryolu uygulamaları- Trenlerdeki cer transformatörleri ve indüktörler) standardında transformatörün etrafında oluşan manyetik alanın ölçülmesi ile ilgili olarak opsiyonel bir test bulunmaktadır. Bu test için transformatör üreticisi ve müşteri arasında manyetik alan ölçüm noktaları ve oluşacak sınır değerler belirlenmelidir [30]. Cer transformatörü etrafına oluşacak manyetik alanların ölçüm prensipleri ise TS EN 50500 (Demiryolu ortamlarındaki elektrikli ve elektronik sistemlerden kaynaklanan insanların maruz kaldığı manyetik alan seviyelerinin ölçülmesi) standardında anlatılmaktadır [31].

Cer transformatörü ve bara modeli için üzerinde oluşan manyetik alan dağılımı değerlendirilecek olan iki adet düzlem belirlenmiştir. Bunlardan biri lokomotifin içerisinde X-Y düzlemine paralel ve lokomotifin en üst yüzeyinden aşağı doğru 300 mm ötelenmiş olan Düzlem-1'dir. Diğer düzlem ise X-Z düzlemine paralel ve lokomotifin sağ yüzeyinden, sağ tarafa doğru 300 mm ötelenmiş olan Düzlem-2'dir. Bunun yanında her düzlem üzerinde bir adet çizgi belirlenmiştir. Düzlem-1 üzerinde Çizgi-1, Düzlem-2 üzerinde Çizgi-2 bulunmaktadır.

Oluşturulan düzlem ve çizgiler Şekil 4. üzerinde gösterilmiştir. Bunların yanında transformatör kazanı ve lokomotif kasasının ekranlama özelliğinin anlaşılması için Çizgi-3 tanımlanmıştır ve Şekil 5. üzerinde gösterilmiştir, Çizgi-3 için detaylar bölüm 3.1 içerisinde açıklanmıştır.



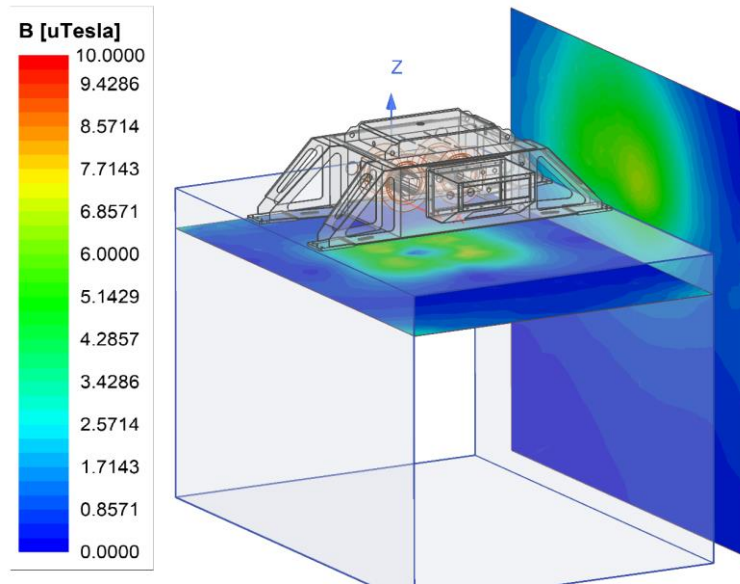
Şekil 4. (a) Cer transformatörü analizlerinde oluşturulan düzlem ve çizgiler (b) Cer transformatörü analizlerinde oluşturulan düzlem ve çizgilerin Z-Y eksenine karşısından görünümü (c) Bara analizlerinde oluşturulan düzlem ve çizgiler



Şekil 5. (a) Cer transformatörü analizlerinde oluşturulan Çizgi-3 (b) Bara analizlerinde oluşturulan Çizgi-3

3.1. Cer transformatörü modeli için manyetik alan dağılımı

Cer transformatörü modelinde belirlenen Düzlem-1 ve Düzlem-2'de oluşan manyetik alan dağılımları Şekil 6. üzerinde gösterilmiştir. Buna göre maksimum manyetik alan şiddetinin yaklaşık 7 uT olduğu görülmektedir. Cer transformatörü kazanının manyetik alanı önemli derecede ekranladığı görülmektedir. Hem kazan malzemesinin manyetik geçirgenlik değerinin yüksek olmasından dolayı hem de lokomotif kasasının elektriksel iletkenlik değerinin yüksek olmasından dolayı ekranlama performansı Düzlem-1 için daha iyidir. Hesaplanan manyetik alan değerlerinin literatürde bulunan bazı çalışmalar ile mantıksal olarak örtüştüğü görülmektedir [10].

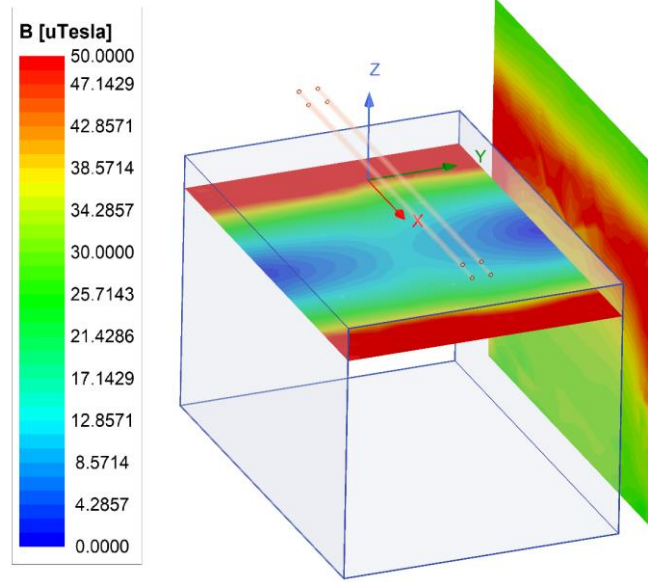


Şekil 6. Cer transformatörü modeli analizi için belirlenen düzlemlerde oluşan manyetik alan dağılımı

3.1. Bara modeli için manyetik alan dağılımı

Bara modelinde belirlenen Düzlem-1 ve Düzlem-2'de oluşan manyetik alan dağılımları Şekil 7. üzerinde gösterilmiştir. Buna göre maksimum manyetik alan şiddetinin yaklaşık 50 uT olduğu görülmektedir. Bara modelinde, transformatör modelinde olduğu gibi kazan yapısı yoktur. Lokomotif içerisine doğru ekranlama işlemini sadece alüminyum gövde gerçekleştirmektedir. Düzlem-2 üzerinde oluşan manyetik alan dağılımının, Düzlem-1'e göre önemli derecede fazla olduğu görülmektedir. Çünkü manyetik alan çizgileri Düzlem-2'ye ulaşmaya kadar bir

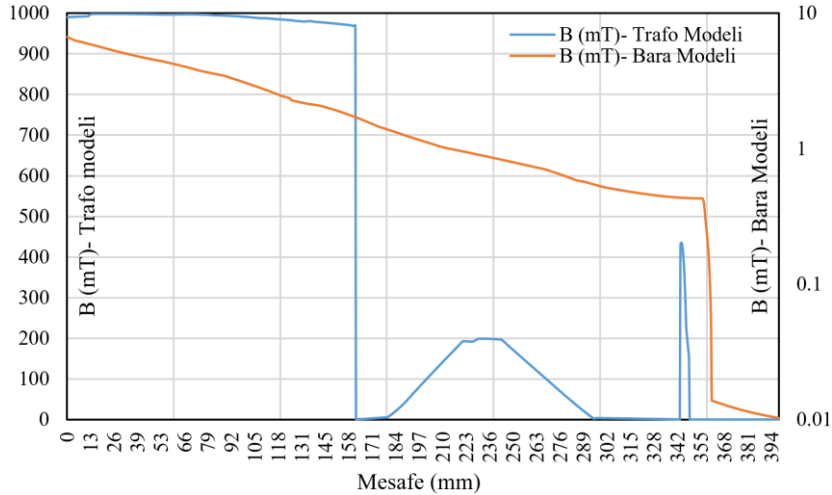
ekranlama malzemesi bulunmamaktadır. Analizlerde kullanılmış olan transformatör modelinin gerçek bir model olmasına karşın, bara modeli endüstriyel olarak kullanılmış bir yapı değildir. Bu analizin amacı bara yapısının etkisinin görülmesidir. Farklı bara yapıları ile farklı sonuçlar elde edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre optimizasyon çalışmaları yapılabilir.



Şekil 7. Bara modeli analizi için düzlemlerde oluşan manyetik alan dağılımı

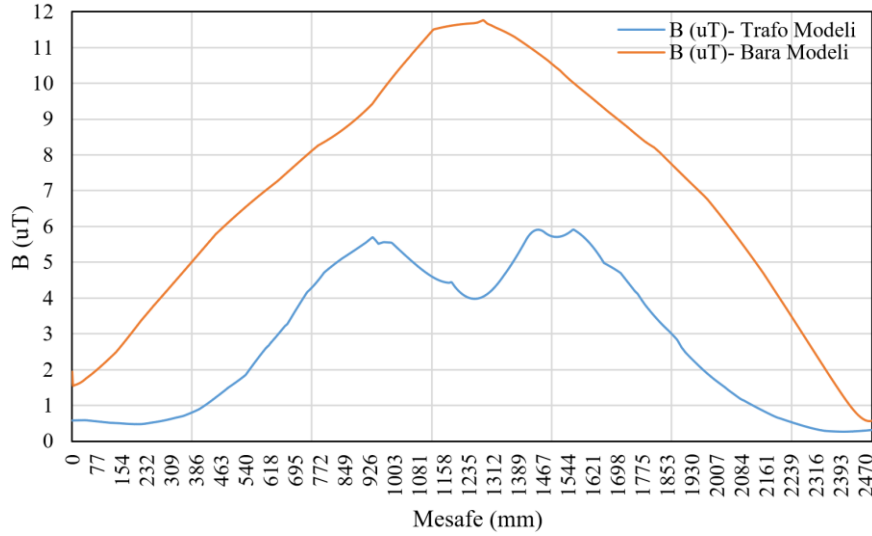
3.1. Belirlenen çizgiler üzerinde oluşan manyetik alan dağılımının karşılaştırılması

Analizler sonucunda belirlenen çizgiler üzerinde oluşan manyetik alan dağılımları incelenmiştir. İlk olarak transformatör modelinde ve bara modelinde malzemelerin ekranlama durumunun anlaşılması için Çizgi-3 üzerinde oluşan manyetik alan değerleri Şekil 8. üzerinde gösterilmiştir.

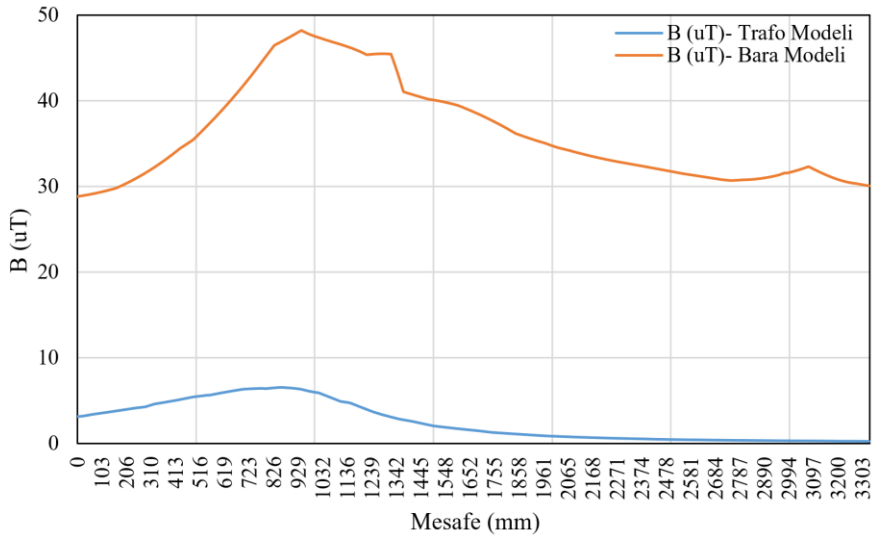


Şekil 8. Transformatör ve bara modelleri için Çizgi-3 üzerinde oluşan manyetik alan dağılımları

Burada mavi grafik trafo modeli üzerinde oluşan, turuncu grafik bara modeli üzerinde oluşan manyetik alan dağılımını ifade etmektedir. Mavi grafik için 0-158 mm aralığı nüve malzemesi içerisinde kaldığından dolayı oluşan manyetik alan yüksektir. 184-302 mm arası ise yüksek gerilim sargısının içi ve cer sargısının dışı arasında kalan alanı ifade etmektedir. 342-348 mm arası ise transformatör tankını ifade etmektedir.



Şekil 9. Transformator ve bara modelleri için Çizgi-1 üzerinde oluşan manyetik alan dağılımları



Şekil 10. Transformator ve bara modelleri için Çizgi-2 üzerinde oluşan manyetik alan dağılımları

Şekil 9. üzerinde Çizgi-1'de oluşan manyetik alanlar gösterilmiştir. Transformator modeli için maksimum manyetik alanın yaklaşık 6 uT, bara modeli için ise 12 uT olduğu görülmektedir. Şekil 10. üzerinde ise Çizgi-2'de oluşan manyetik alanlar gösterilmiştir. Transformator modeli için maksimum manyetik alanın yaklaşık 7 uT, bara modeli için ise 50 uT olduğu görülmektedir. Bara modeli için Çizgi-1 ve Çizgi-2 arasında oluşan fark ekranlama durumundan kaynaklanmaktadır. Çizgi-1 için alüminyum lokomotif kasası ekranlama özelliği sağlarken Çizgi-2 için ekranlama özelliği gerçekleştiren bir yapı bulunmamaktadır. Bunun yanında bara modelinde oluşan manyetik alan dağılımının transformator modeline göre daha fazla olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada elektrikli lokomotiflerde kullanılmakta olan cer transformatorü ve bara yapısının oluşturduğu manyetik alan dağılımı hesaplanmıştır. Bu kapsamda sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda cer transformatorü ve bara modelinin oluşturduğu manyetik alan dağılımının incelenen düzlemler için ICNIRP tarafından belirlenen sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Bunun yanında cer transformatorü modelinde buluna kazan yapısından dolayı ekranlama performansı bara modeline göre daha iyi

olmaktadır. Analizlerde kullanılan cer transformatörü gerçek bir model olmasına karşın bara yapısı sadece bir örnek olarak oluşturulmuştur. Sonuç olarak raylı sistemlerde kullanılan elektrikli lokomotiflerde manyetik alan dağılımı hesaplarının gerçekleştirilmesinin gerekliliği bu çalışmada açıklanmış ve bir örnek üzerinden uygulama gerçekleştirilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan transformatör ve lokomotif modellerinin hazırlanması aşamasında sağladığı katkılarından dolayı Sönmez Transformatör Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] S. Çürükova, Y. B. Demiroğlu, O. Sönmez, M. A. Çınar, and B. Albayrak, "Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 66–78, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1110515.
- [2] N. Polater, P. Tricoli, "Technical review of traction drive systems for light railways", *Energies*, vol. 15, no. 9, pp. 1-26, 2022.
- [3] D. Kusiak, "The Magnetic field and impedances in three phase rectangular busbars with a finite length," *Energies*, vol. 12, no. 8, pp. 1–20, 2019.
- [4] T. Keikko, J. Kotiniitty, and L. Korpinen, "Calculations of magnetic fields from indoor distribution substation bus bars," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 2000, vol. 4, pp. 2309–2314, doi: 10.1109/pess.2000.867351.
- [5] Y. B. Demiroğlu, M. A. Çınar, B. Albayrak, "Evaluation of cable and busbar system in multiconductor distribution systems in terms of current and magnetic field distributions", *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, no. 7, pp. 3119–3132, 2021, doi:10.3906/elk-2103-108
- [6] S. Nikolovski, Z. Klaić, Z. Kraus, and M. Stojkov, "Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations," *MIPRO 2010 - 33rd Int. Conv. Inf. Commun. Technol. Electron. Microelectron. Proc.*, no. April, pp. 641–646, 2010.
- [7] S. Graubner, D. Filistovich, S. Hiebel, R. Wengerter, "Practical examples of magnetic field measurements in industrial and environmental surroundings" 2015. [Online]. Available: https://www.sekels.de/fileadmin/PDF/Englisch/45_3_Magnetic_Field_Measurement_Publication_.pdf [Accessed: 31 October 2022]
- [8] G. Apaydin and S. S. Seker, "Theoretical and Experimental Study of Electromagnetic Fields Around High Power Transformer," in *2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2021, pp. 1–4, [Online]. Available: https://www.emo.org.tr/ekler/14d37f84c3f41a6_ek.pdf.
- [9] L. Štrac, F. Kelemen, and D. Žarko, "Modeling and calculation of electromagnetic field in the surroundings of a large power transformer," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 17, no. 3, pp. 301–314, 2009, doi: 10.3906/elk-0908-182.
- [10] I. Sitar, Z. Janic, and B. Cucic, "External magnetic field density of main traction transformer for EMU," *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 716–725, 2012, doi: 10.1108/03321641211200680.
- [11] Z. Fei, T. Konefal, and R. Armstrong, "AC railway electrification systems-An EMC perspective," *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 8, no. 4, pp. 62–69, 2019, doi: 10.1109/MEMC.2019.8985603.
- [12] G. Lucca and M. Moro, "Environmental 50Hz magnetic field produced by a railway line equipped with autotransformers," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, 2008, doi: 10.1109/EMCEUROPE.2008.4786794.
- [13] G. Lucca, M. Moro, R. Florio, and G. Lidonnici, "Measurements and calculations of 50Hz magnetic field produced by Italian High Speed Railway system," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 10–15, 2012, doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396900.
- [14] C. Buccella and M. Feliziani, "Three dimensional magnetic field computation inside a high speed train with a.c. electrification," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.*, pp. 1-4, 2003, doi: 10.1109/icsmc2.2003.1428334.
- [15] M. Ö. Baştürk, V. Yüksel, Y. E. Tetik, M. Yılmaz, M. Güner, and T. Kaya, "Detection of Pantograph Horn Defects Based on Deep Learning and Image Processing," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 102–115, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1132123.

- [16] Z. Dai, T. Li, N. Zhou, J. Zhang, and W. Zhang, "Numerical simulation and optimization of aerodynamic uplift force of a high-speed pantograph," *Railw. Eng. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 117–128, 2022, doi: 10.1007/s40534-021-00258-7.
- [17] G. Wu et al., "Pantograph–catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks," *Railw. Eng. Sci.*, 2022, doi: 10.1007/s40534-022-00281-2.
- [18] G. Wu, W. Wei, G. Gao, J. Wu, and Y. Zhou, "Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system," *J. Mod. Transp.*, vol. 24, no. 2, pp. 132–138, 2016, doi: 10.1007/s40534-016-0099-1.
- [19] "International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz–100kHz).," *Heal. Phys.*, vol. 99, no. 6, pp. 818–836, 2010.
- [20] M. N. Bates, "Extremely low frequency electromagnetic fields and cancer: The epidemiologic evidence," *Environmental Health Perspectives*, vol. 95, pp. 147–156, 1991, doi: 10.1289/ehp.9195147.
- [21] J. Grellier, P. Ravazzani, and E. Cardis, "Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe," *Environ. Int.*, vol. 62, pp. 55–63, 2014, doi: 10.1016/j.envint.2013.09.017.
- [22] M. W. Khan, J. Juutilainen, and P. Roivainen, "Registry of Buildings With Transformer Stations as a Basis for Epidemiological Studies on Health Effects of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields," *Bioelectromagnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 34–40, 2020, doi: 10.1002/bem.22228.
- [23] SCENIHR, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks: Potential Health Effects of Exposure to Electromagnetic Fields (EMF)., January. 2015.
- [24] J. Bernhardt, "The direct influence of electromagnetic fields on nerve- and muscle cells of man within the frequency range of 1 Hz to 30 MHz," *Radiat. Environ. Biophys.*, vol. 16, no. 4, pp. 309–323, 1979, doi: 10.1007/BF01340569.
- [25] "IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," IEEE Std C95.1-2005 (Revision IEEE Std C95.1-1991), vol. 2005, no. April, pp. 1–238, 2006.
- [26] S. Ozen, E. G. Ogel, and S. Helhel, "Residential area medium voltage power lines; public health, and electric and magnetic field levels," *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 26, no. 4, pp. 573–578, 2013.
- [27] S. Ozen, H. F. Carlak, O. H. Colak, and S. Helhel, "Magnetic field risk analysis for employees and patients due to power transformers in hospital buildings," *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, pp. 1743–1746, 2017, doi: 10.1109/PIERS.2017.8262031.
- [28] O. Bottauscio, E. Carpaneto, M. Chiampi, D. Chiarabaglio, and I. Panaitescu, "Numerical and experimental evaluation of magnetic field generated by power busbar systems," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 143, no. 5, pp. 455–460, 1996, doi: 10.1049/ip-gtd:19960557.
- [29] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics*. 2004.
- [30] Demiryolu uygulamaları - Trenlerdeki cer transformatörleri ve indüktörler, TS EN 60310, 09.12.2016
- [31] Demiryolu ortamlarındaki elektrikli ve elektronik sistemlerden kaynaklanan insanların maruz kaldığı manyetik alan seviyelerinin ölçülmesi, TS EN 50500, 19.01.2010

Özgeçmiş



Serenay ÇÜRÜKOVA KALE

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi'nde 2013 yılında tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2015-2017 yılları arasında aynı üniversitede 'Transformatörlerin Kazan Duvarlarında Meydana Gelen Kayıpların Azaltılması için En Uygun Şönt Eleman Boyutunun Belirlenmesi' konulu tez çalışması ile tamamlamıştır. 2013 yılından beri Sönmez Transformatör Sanayi ve Ticaret A.Ş. 'de tasarım müdürü olarak görev yapmaktadır. İlgi alanına giren çalışma konuları, transformatörler ve bunlara dair hesapların geliştirilmesidir. E-Posta: s.curukova@sonmeztrafo.com.tr



Yunus Berat DEMİROL

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi'nde 2020 yılında tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir. 2020 yılından beri Genetek Güç Enerji şirketinde elektrik mühendisi olarak transformatörler başta olmak üzere güç sistemi ekipmanlarının sonlu elemanlar analizi ile elektriksel parametrelerinin hesaplanması alanında çalışmaktadır.
E-Posta: yunusberat.demirol@genetek.com.tr



Oluş SÖNMEZ

Elektrik mühendisliği alanında lisans eğitimini 2009 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi'nde, yüksek lisans eğitimini ise 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamladı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine devam etmektedir. Transformatör ve reaktör tasarımı, elektriksel ve termal modellenmesi ve benzetimi konu başlıklarında araştırmalar gerçekleştirmektedir.
E-Posta: osonmez@sonmeztrafo.com.tr



Mehmet Aytaç ÇINAR

Elektrik mühendisliği alanında lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini sırasıyla 1999, 2002 ve 2008 yıllarında Kocaeli Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Halen Kocaeli Üniversitesi İzmit Meslek Yüksekokulu'nda Dr.Öğr.Üyesi unvanıyla görev yapmaktadır. Transformatör ve reaktörler başta olmak üzere elektrik makinalarının tasarımı, optimizasyonu, modellenmesi ve benzetimlerinin gerçekleştirilmesi konularında çalışmaktadır.
E-Posta: aytac@kocaeli.edu.tr



Bora ALBOYACI

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini 1995 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi'nde, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini ise sırasıyla 1995 ve 1998 yıllarında Kocaeli Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Halen aynı üniversitede Elektrik Tesisleri ABD'da öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2008-2010 yılları arasında Milli Güç Kalitesi Projesi'nde ODTÜ'de doktora sonrası araştırmacı olarak görev yapmıştır.2012 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Teknoparkta bulunan GENETEK Güç & Enerji Ltd. Şti.'nde Ar-Ge Müdürlüğü görevini yürütmektedir. Uzmanlık alanları enerji dağıtım sistemleri, güç kalitesi ve manyetik dizayn uygulamalarıdır.
E-Posta: alboyaci@kocaeli.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.
Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Haberleşme Tabanlı Tren Kontrolünün (CBTC) Otomatik Tren Korumasına (ATP) İlişkin Dağıtılmış-Hiyerarşik Kontrol Yaklaşımı

Cem ATILGAN*¹, Özgür Turay KAYMAKÇI¹, Tarık Veli MUMCU²

¹ Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye

² Çanakkale 18 Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

³ İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*cematilgan@klu.edu.tr

(Alınış/Received: 21.10.2022, Kabul/Accepted: 01.11.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Kentleşme ile birlikte metropollerde yaşayan insan sayısı artmaktadır, nüfus artışına paralel olarak şehir içi ulaşımda çok önemli bir yer tutan raylı ulaşım sistemlerine olan talep, kalabalık şehirlerde her geçen gün daha da artmaktadır. Artan talebe paralel olarak raylarda artacak trafik yoğunluğu, sinyalizasyon sistemlerini güvenlik, kapasite ve rayların verimine etkisi açısından oldukça önemli kılmaktadır. Günümüzde birçok raylı ulaşım sistemlerinde sinyalizasyon sistemi olarak Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol (CBTC) tercih edilmektedir. CBTC, Otomatik Tren Koruması (ATP), Otomatik Tren Denetimi (ATS) ve Otomatik Tren İşletmesi (ATO) gibi bazı alt sistemlerden meydana gelmektedir. Alt sistemlerin kendine özgü tanımlanan bazı görevleri bulunmaktadır. Bu görevleri yerine getirirken, alt sistemlerden artan gereksinimlerden etkilenmeden, istenen emniyet fonksiyonlarını en üst düzeyde güvenle uygulaması beklenmektedir. Ancak, bu sistemlerin genel tasarımının, ihtiyaç duyulan yeni gereksinimlere göre değiştirilmesi gerekebilir. Bu bağlamda çeşitli standartların sağlarken, alt sistemlerin kontrol edilmesi ve modellenmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, CBTC'nin alt sistemi ATP, ayrık olay sistemi yaklaşımıyla sonlu durum otomatları ile modellenmiştir ve alt sistemlere ait denetimsel gözetleyicilerin tasarımı yapılarak, kontrol edilebilirlik ve kilitlenmesiz kontrol koşullarını karşıladığı gösterilerek, elde edilen sonuçlar yekpare yaklaşım modeli ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ayrık olaylı sistemler, Sonlu durum otomatları, Denetimsel gözetletiyici, Dağıtılmış-hiyerarşik kontrol, Haberleşme tabanlı tren kontrolü

Decentralized-Hierarchical Control Approach to Automatic Train Protection (ATP) of Communication-Based Train Control (CBTC)

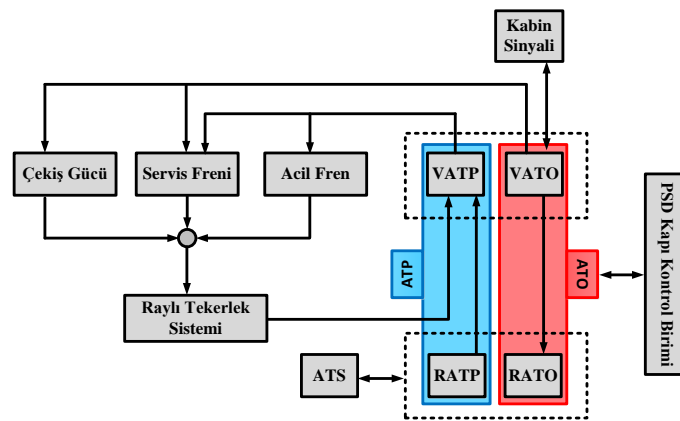
Abstract: With urbanization, the number of people living in metropolises is increasing, parallel to population growth, the demand for rail transportation systems, which has a very important place in urban transportation, is increasing day by day in populous cities. The traffic density, which will increase in parallel with the increasing demand on rail, makes the signal systems very important in terms of their impact on rail safety, capacity and efficiency. Today, communication-based train control (CBTC) is the preferred signaling system in many rail transportation systems. CBTC consists of some subsystems such as Automatic Train Protection (ATP), Automatic Train Control (ATS) and Automatic Train Operation (ATO). The subsystems have some specific, defined tasks. In performing these tasks, it is expected that the desired safety functions will be implemented with the highest level of confidence without being compromised by the increasing requirements from the subsystems. Nevertheless, the overall design of these systems may require to be modified to meet the new necessities. In this case, it is of great importance to control and model the subsystems while considering different standards. In this study, the subsystem of CBTC, ATP, is modeled with finite state automata with the discrete event system approach, and the supervisory watchers of the subsystems are designed, shown to satisfy the controllability and nonlocking conditions, and the obtained results are matched with the model of the monolithic approach.

Keywords: Discrete event systems, Finite state automata, Supervisory Control, Decentralized-hierarchical control, Communication based train control

Atıf için/Cite as: C. Atılğan, Ö.T. Kaymakçı, T.V. Mumcu, "Haberleşme tabanlı tren kontrolünün (CBTC) otomatik tren korumasına (ATP) ilişkin dağıtılmış-hiyerarşik kontrol yaklaşımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 66-81, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1191856

1. Giriş

Günümüzde tren ve metro sistemlerinin en önemli alt yapısı sinyalizasyon sistemleridir. Sinyalizasyon sistemleri, tren trafiğini düzenlerken, trenlerin demiryolu hattı üzerinde güvenli bir şekilde hareket etmesini sağlar. Raylı sistemlerde seferlerin sorunsuz bir şekilde sürdürülebilmesi için seyrüsefer güvenliğine yönelik çalışma ve projeler üretilip, uygulanmaktadır [1]. Teknolojinin gelişimine paralel olarak sinyalizasyon sistemlerinin alt yapısı da her geçen gün gelişmektedir. Günümüzde en çok üzerinde çalışılan sinyalizasyon tipi hareketli blok sinyalizasyonudur. Hareketli blok, tren hattının sanal bloklara ayrıldığı ve blokların bilgisayarlar tarafından her trenin etrafında güvenli bölgeler olarak gerçek zamanlı olarak tanımlandığı bir sinyalizasyon sistemidir. Bu, hem herhangi bir zamanda tüm trenlerin tam konumu ve hızı hakkında bilgi sahibi olmayı hem de merkezi sinyalizasyon sistemi ile trenin kabin sinyalizasyon sistemi arasında sürekli iletişimi sağlamaktadır. Hareketli bloğa dayalı Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol (CBTC) sistemleri, bu temelde çalışan bir sistemdir. CBTC yüksek çözünürlüklü tren konum belirleme, ray devrelerinden bağımsız olarak, sürekli, yüksek kapasiteli ve çift yönlü veri iletişimiyle çalışan bir tren kontrol sistemidir. CBTC, iki ardışık tren arasındaki güvenlik mesafesinin azaltılmasına izin verir ki bu ray hatlarının kapasitesini artırmak anlamına gelmektedir. Trenler arasındaki mesafe, güvenlik gerekliliklerini koruyarak, trenin konumu ve hızının sürekli güncellenmesine göre değişmektedir. Bu durum, gerekli güvenlik şartlarını sağlarken, trenlerin birbirine daha yakın çalışmasına izin verir. Belirtmek gerekir ki, CBTC sisteminde güvenlik gereklilikleri hayati bir rol oynamaktadır ve CBTC demiryolundaki güvenli trafik akışı açısından kritik öneme sahip sistemlerden biridir [2]. CBTC bünyesinde Otomatik Tren Denetimi (ATS), Otomatik Tren Operasyonu (ATO), Otomatik Tren Koruma (ATP) vb. alt sistemler içermektedir. Burada ATP ve ATO alt sistemleride alt sistemlerden meydana gelmektedir. ATP alt sistemi, Araçüstü Otomatik Tren Koruma (VATP) ve Bölgesel Otomatik Tren Koruma (RATP) alt sistemlerinden meydana gelmektedir. ATO alt sistemi ise Araçüstü Otomatik Tren Operasyonu (VATO) ve Bölgesel Otomatik Tren Operasyonu (RATO) alt sistemlerinden meydana gelmektedir. Araçüstü alt sistemler: VATP ve RATP tren üzerinde yer almaktayken, bölgesel alt sistemler: VATO ve RATO ray hattı boyunca belirlenen bölgeler içerisinde konumlandırılır. Bu alt sistemlerin kendine ait tanımlanmış çeşitli görevleri bulunmaktadır ve alt sistemler birbirleriyle çift yönlü iletişim halindedir. Trenlerin ve diğer sistemlerin güvenli bir şekilde çalışması ve birlikte çalışabilirliği bu alt sistemler sayesinde sağlanmaktadır [3]. Şekil 1’de CBTC’nin genel yapısı görülmektedir.

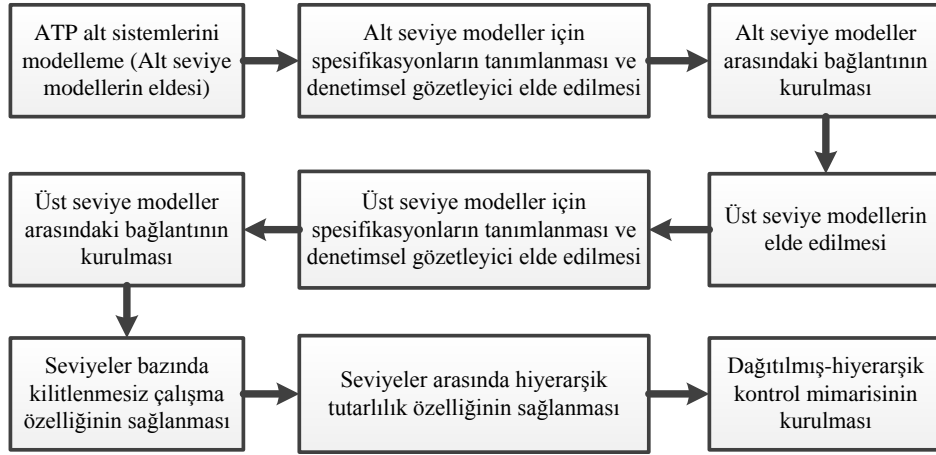


Şekil 1. CBTC yapısı

Bu nedenle alt sistemlerin görevlerini sorunsuz bir şekilde yerine getirebilmesi ve kontrol edilmeleri oldukça önemlidir. Şunu vurgulamak gerekir ki, CBTC’nin alt sistemleri karmaşık bir yapıya sahiptir. Yapıların karmaşıklığını en aza indirmek, sistem yapısını anlaşılır hale getirmek için modellenmesi gerekmektedir. Modelleme, sisteme şu avantajları getirir; sistemin izlenebilirliğini kolaylaştırır, kontrolörlerin tasarımını basitleştirir ve bir hata olması durumunda

sisteme daha kısa sürede müdahale edilmesine olanak sağlar. CBTC gibi ayrık zamanlı olaylardan ve durumlardan meydana gelen bir sistemi otomatlar ile modellenenabilir. Otomat modelde, sistemin belli durumları vardır ve olaylar meydana geldiğinde sistem durum değişikliğine gider. Diğer yandan otomatlarla modelleme yapılırken tercih edilen bazı yaklaşımlar CBTC gibi karmaşık sistemlerin modellenmesinde probleme neden olur. CBTC, sonlu durum otomatları ile yekpare olarak modellenmek istendiğinde içerdiği alt sistemlerin fazlalığı önemli bir sorun olan durum uzayı patlamasına neden olur ve modeller oldukça karmaşık hale gelir. Böyle bir durumda, sistem modellerini kontrol eden denetimsel gözetleyici sentezi çok zorlaşır ve hesaplama süresi önemli ölçüde uzar. Otomatlar ile modelleme yaparken dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta modelin kilitlenmeme özelliğini sağlamasıdır. Bu noktadan hareketle denetimsel gözetleyici tasarlamak, kilitlenmesiz çalışmayı sağlamak, model karmaşıklığını azaltmak ve durum uzayı patlamasını önlemek için farklı sistemlere uygulanmış birçok önemli çalışma bulunmaktadır. Jiang Shebbibg ve Kumar Rathnesh, kısmi gözlem altında eşzamanlı ayrık olaylı sistemlerin dağıtılmış denetimsel gözetleyici sorunu üzerinde çalışmışlardır ve çalışmalarında sistemlerin kontrollü davranışının belirli aralıklar arasında verilmesini sağlayan dağıtılmış denetimsel gözetleyici mevcudiyeti için gerekli koşulu oluşturmuşlardır. Bu çalışma sayesinde, eş zamanlı çalışan sistemlerin dağıtılmış kontrolü ve dağıtılmış yerel kontrolünü mümkün kılmışlardır [4]. Cunha, Cury ve Krogh, ayrık olay sistemlerinin hiyerarşik kontrolünde önemli rol oynayan hiyerarşik seviyeler arasında tutarlılığı sağlayan bir izdüşüm yapısı sunmuşlardır. Hiyerarşik yaklaşımla model karmaşıklığını azaltmışlardır [5]. Wong ve Wonham, birbirine bilgi kanalları ile bağlanan düşük seviyeli ve yüksek seviyeli modellerden oluşan iki seviyeli bir hiyerarşik mimarisi kurmuşlardır. Bu mimariyi hiyerarşik tutarlılığı ve kilitlenmesiz olma durumunu geliştirmek için kullanmışlardır ve modellerin karmaşıklığını azaltmışlardır [6]. Schmidt, Reger ve Moor dağıtılmış ve hiyerarşik kontrol mimarisi üzerinde çalışmışlardır, yazarlar dağıtılmış ayrık olaylı sistemi dikkate alarak, mevcut kontrol yapısını iki seviyeli bir hiyerarşik mimarisi ile birleştirmişlerdir. Yaklaşımlarını uyguladıkları sistemde, kapalı döngü davranışının hiyerarşik olarak tutarlılığını ve kilitlenmeme koşullarını sağladığını göstermişlerdir [7]. Ayrıca, Schmidt, Perk ve Moor, paylaşılan olaylarla senkronize edilen dağıtılmış ayrık olay sistemlerinin hiyerarşik kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarında çok seviyeli hiyerarşik kontrol mimarisi ile hiyerarşik tutarlılığı sağlamışlardır ve denetimsel gözetleyici sentezi hesaplama karmaşıklığını azaltmışlardır [8]. Öte yandan, tren sinyalizasyon sistemlerinin modellenmesi ve anlaşman hakkında da birçok önemli çalışma bulunmaktadır. Tang, Liu ve Wang, Güvenlik-Kritik Uygulama Geliştirme Ortamı (SCADE) kullanarak CBTC anlaşman sistemi için model tabanlı bir tasarım yaklaşımı sunmuşlardır. CBTC'nin karmaşıklığını azaltmak için farklı bir modelleme yaklaşımı önermişlerdir [9]. Kaymakçı, Anık, Üstoğlu, çalışmalarında anlaşman sistemleri üzerinde durmuşlardır ve demiryolu bileşenlerinin ayrık olay sistem modellerini sunarken aynı zamanda yerel modüler denetimsel gözetleyicilerini tasarlamışlar ve kontrol edilebilirlik, koşulunun sağlanabilirliğini kontrol etmişlerdir [10]. Haxthausen ve Peleska demiryolu kontrol sistemleri, tren kontrol bilgisayarları ve makas kilitleme tertibatı içeren dağıtılmış demiryolu kontrol sistemleri hakkında çalışmışlardır. Çalışmalarında dağıtılmış ve işbirliği yapan kontrol algoritmalarının spesifikasyonları vererek durum-uzay patlaması sorununu ortadan kaldırmışlardır [11]. Vu, Haxthausen ve Peleska anlaşman sistemi üzerinde çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında Avrupa Tren Kontrol Sistemi (ETCS) seviye 2 ile uyumlu olan Danimarka demiryolu anlaşman sistemlerinin genel bir modelini oluşturmuşlardır. Bu çalışmada durum uzayı patlama sorununu ortadan kaldırmak için Satisfiability Modulu Theories (SMT) tabanlı Bounded Model Checking (BMC) yaklaşımını uygulamışlardır [12]. Son olarak Quian Jie, Liu Jing, çalışmalarında CBTC hakkında temel bilgiler vermişlerdir. Ayrıca SCADE kullanarak, CBTC sistemi için güvenlik açısından kritik sistemlerin tasarım, simülasyon süreçlerini yürütmüş ve gerekli tetkikleri yapmışlardır. Çalışmalarında, CBTC'nin modellenmesi ve doğrulanmasının durum uzayı patlaması sorunu nedeniyle zorlu bir sorun olduğunu vurgulamışlardır [13]. Bu çalışmada, dağıtılmış ve hiyerarşik kontrol yaklaşımı, CBTC'nin alt sistemi olan ATP alt sistemine uygulanmıştır. Çalışmanın amacı durum uzayı patlamasının önüne geçerek modellerin karmaşıklığını azaltmaktır. Uygulanan adımlar Şekil 2'deki akış diyagramında özetlenmiştir.

Önerilen yaklaşımla elde edilen sonuçlar ile yekpare yaklaşımla elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, bulgular sunulmuştur.



Şekil 2. Önerilen yaklaşımın akış diyagramı

2. Materyal ve Metot

Dağıtılmış ve hiyerarşik yaklaşımla yekpare yaklaşımda karşılaşılan sorunlar ortadan kalkmaktadır. Bu sayede sistemin modellenmesi ve denetimsel gözetleyici tasarımı daha kolay yapılabilmektedir.

2.1. Otomatik tren koruma sistemi (ATP)

ATP alt sistemi trenlerin güvenli bir şekilde hareket etmesinden sorumlu olan oldukça önemli ve hayati bir alt sistemdir. ATP alt sistemi ile trenler arasındaki güvenli hareket mesafesi ayarlanırken, trenin güvenli hareket sınırları içerisinde çalışması için tren hızı sürekli olarak kontrol edilir. Hareket süresince, trenin hız sınırını aşması durumunda devreye girerek treni güvenli hız sınırları içerisine taşır, hareket sırasında meydana gelecek acil ve tehlikeli durumlarda acil frenleme ile treni tamamen durdurabilir. ATP alt sistemi VATP ve RATP alt sistemlerinden meydana gelmektedir ve bu alt sistemlerin kendilerine özgü tanımlanmış görevleri bulunmaktadır. VATP ve RATP alt sistemlerinin görevleri Tablo 1’de sıralanmıştır [14].

Tablo 1. VATP ve RATP görevleri

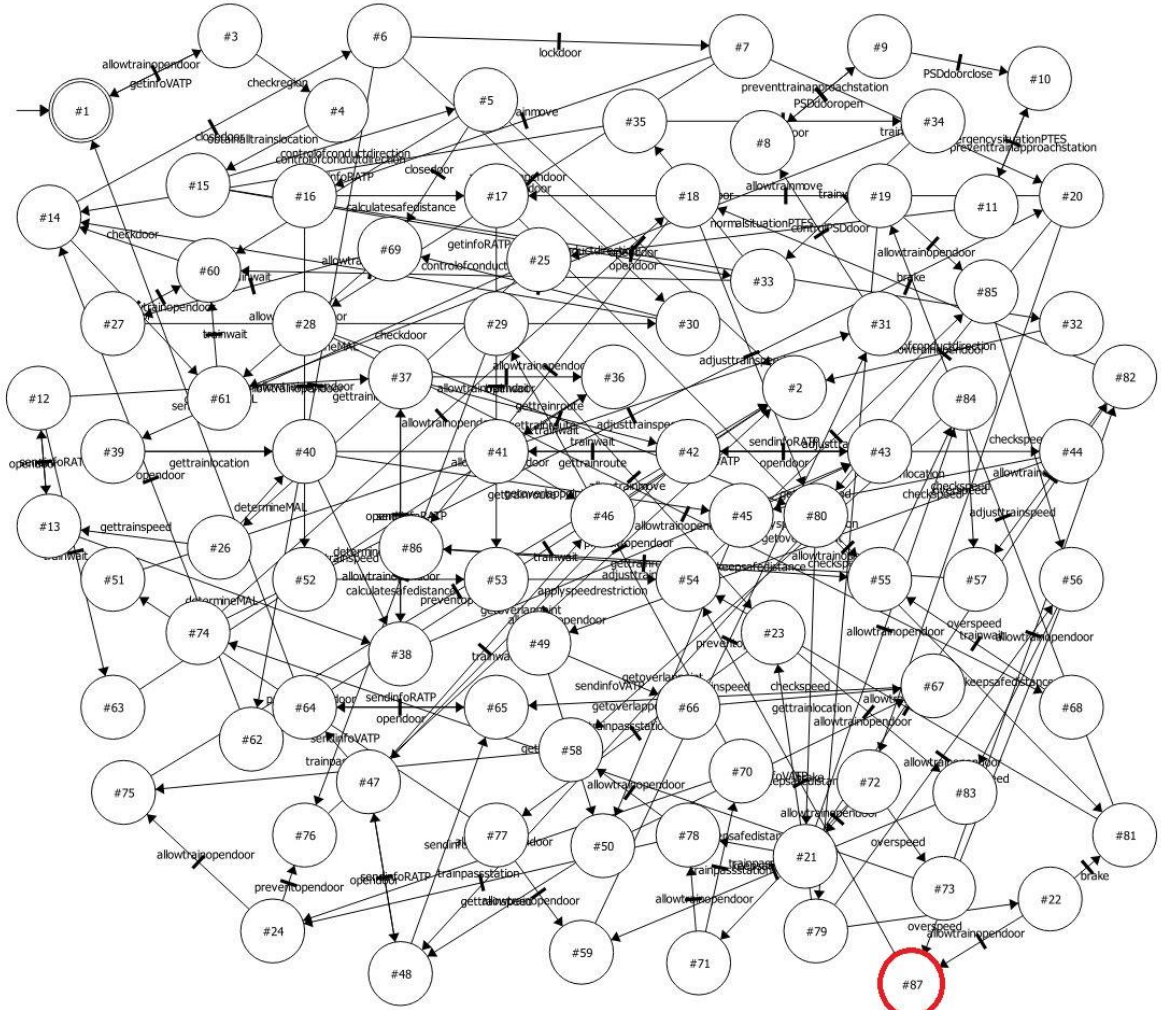
| VATP Görevleri | RATP Görevleri |
|---|---|
| Trenlerin konumlarının algılanması | Trenlerin konumlarının algılanması |
| Trenler arasındaki güvenli mesafenin ayarlanması | Hareket Yetki Sınırının (MAL) belirlenmesi |
| Trenin durumuna göre hız kısıtlarının uygulanması | Seyir yönünün kontrolü |
| Hız ihlalinde fren uygulanması | Tren kapılarının kilitlenme ve kapalılık durumlarının izlenmesi |
| Tren kapılarının kilitlenme ve kapalılık durumlarının izlenmesi | Tren kapılarının durumuna göre tren hareketine izin verilmesi |
| Tren kapılarının durumuna göre tren hareketine izin verilmesi | Peron ayırıcı kapıların kapalılık durumuna göre trenin istasyona giriş kontrolü |
| Trenin istasyonda duruncaya kadar kapıları kapalı tutması | |
| Peron ayırıcı kapıların kapalılık durumuna göre trenin istasyona giriş kontrolü | |

2.2. Matematiksel notasyon

Olay kümesi Σ ile, olay kümesindeki olaylar kullanılarak üretilecek diller L harfiyle, otomatlar G harfiyle, sisteme ilişkin denetimsel gözetleyici S harfiyle, sistem için tanımlanacak spesifikasyonlar ise D harfiyle temsil edilir. Tüm alt sistemlerin Σ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) ile temsil edilen bir olay kümesi vardır. Tüm alt sistemler $\Sigma := \Sigma_1 \cup \Sigma_2 \cup \dots \cup \Sigma_n$ ya da $\Sigma := \bigcup_{i=1}^n \Sigma_i$ üzerinde $G := G_1 || G_2 || \dots || G_n$ şeklinde tanımlanabilir. Ayrıca kontrol edilebilen ve edilemeyen olayları $\Sigma_{i,c} := \Sigma_i \cap \Sigma_c$ ve $\Sigma_{i,uc} := \Sigma_i \cap \Sigma_{uc}$ iken $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc}$ ve $\Sigma_c \cap \Sigma_{uc} = \emptyset$ şeklinde yazılabilir. G_i, G_j gibi ayrılmış alt sistemler, yalnızca $\Sigma_i \cap \Sigma_j \neq \emptyset$ şartı sağlanıyorken senkronize edilebilir. Denetimsel gözetleyici, maksimum izin verilen kapalı döngü davranışı $\kappa_{L(G)}(D)$ üretir ve denetimsel gözetleyiciler sadece kontroledilebilir olayları devre dışı bırakabilir. Kontrol edilemeyen olaylar üzerinde bir etkisi yoktur. $E, L(G)$ 'ye göre kontrol edilebilir bir dil olduğunu varsayarsak S gözetimsel denetleyicisi altında $\bar{E} = L(S/G)$ eşitliği sağlanır. Tüm kontrol edilebilir dillerin kümesi $C(L(G))$ ile temsil edilir ve $(L(G)) = \{E \subseteq L(G) | \exists S \text{ öyle ki } \bar{E} = L(S/G)\}$ şartını sağlar. Bu nedenle, tüm spesifikasyonların dili için, $L(G)$ 'ye göre D 'nin üst kontrol edilebilir alt dili mevcuttur denilebilir. D 'nin üst kontrol edilebilir alt dili $\kappa_{L(G)}(D) := \bigcup \{K \in C(L(G)) | K \subseteq D\}$ olarak tanımlanır. K dili, sistemin denetimsel gözetleyicisi altında istenen davranışı sergilemesini beklenen dil kümesi olarak tanımlanır. Ancak bir sistemin beklenen davranışını içeren K dili kontrol edilemeyebilir. Eğer K kontrol edilemezse, sistem istenen davranışı gösteremez. Beklenen davranışı verecek denetimsel gözetleyicinin tasarımı için dilin kontrol edilebilir alt dilleri kullanılabilir. $K, K^{\uparrow c}$ ile gösterilen en büyük kontrol edilebilir dil olarak adlandırılır. Lokal düşük seviyeli denetimse gözetleyici $S_i: L_i \rightarrow F_i$ (F_i kontrol dizileri) ile gösterilir. Düşük seviyeli kapalı döngü dilleri $L_i^c := L(S_i/G_i)$ $L_{i,m}^c := L_i^c \cap L_{i,m}$, $L^c := \bigcap_{i=1}^n L_i^c$, $L_m^c := \bigcap_{i=1}^n L_{i,m}^c = L^c \cap L_m$ ile ifade edilir ve $L^c = L(G^c)$, $L_m^c = L_m(G^c)$ eşitlikleri sağlanır. Diğer yandan düşük seviyeli bir sistemin izdüşümü alınarak elde edilen yüksek seviyeli sistemin denetimsel gözetleyicisi $S^{hi}: L^{hi} \rightarrow F^{hi}$ ve yüksek seviyeli kapalı döngü dili $L(S^{hi}/G^{hi})$ ile gösterilir. Kullanılabilir bir düşük seviye denetimsel gözetleyici $S^{lo}: L^c \rightarrow F, \theta(L(S^{lo}/G^c)) \subseteq L(S^{hi}/G^{hi})$ şartını sağlamalıdır. Son olarak, doğal izdüşüm ile $\theta: \Sigma^* \rightarrow (\Sigma^{hi})^*$ and $\Sigma^{hi} := \bigcup_{i,j,i \neq j} (\Sigma_i \cap \Sigma_j)$ üst seviye modelin olay kümesi elde edilir. Üst seviye dil $L^{hi} := \theta(L^c)$ ve $L_m^{hi} := \{s^{hi} \in L^{hi} \text{ öyle ki } \theta^{-1}(s^{hi}) \cap L_m^c \neq \emptyset\}$ ile $L^{hi} = L(G^{hi})$ olacak şekilde elde edilir. Paralel birleşim, modeller arasındaki senkronizasyonu sağlayan notasyondur yani aynı anda çalışan aynı seviyedeki otomatların ortak davranışının modellenmesini sağlar. Paralel birleşim matematiksel olarak $L_1 || L_2 \subseteq \Sigma^*$ ifade edilir. Bir sistemin kilitlenmesiz olması için $\overline{L_m(G)} = L(G)$ şartını sağlaması gerekir [15].

2.3. Yekpare yaklaşım

Yekpare yaklaşım tercih edilerek bir denetimsel gözetleyici tasarımı, büyük sistemler için çok fazla hesaplama gerektirir. Bu yaklaşımda sistem, alt sistemlere ayrılmaz ve tek bir sistem olarak modellenir. Oluşturulacak model, sistemin alt sistemlerinde durumlarını kapsayacak şekilde tüm durumları dikkate alınarak oluşturulur ve bu modele göre bir denetimsel gözetleyici tasarımı yapılır. Sistem tek bir birim olarak düşünüldüğünde elde edilen denetimsel gözetleyicinin oluşturulması çok karmaşık bir hale gelmektedir. Bunun nedeni, çok sayıda bileşene sahip olan sistemin yapısıdır. Bileşen sayısı arttıkça durum uzayı üstel olarak artar ve sonuçta durum uzayı patlaması meydana gelir. ATP sisteminin yekpare modeli Şekil 3'te görülebilir. Yekpare modelde 87 durum bulunmaktadır. Şekil 3'ten de anlaşılacağı gibi yekpare yaklaşımla oluşturulacak sistem modeli oldukça karmaşıktır ve takip edilebilirliği çok zordur. Şunu ayrıca eklemek gerekir ki böyle bir model için denetimsel gözetleyici tasarlamakta çok zordur. Diğer yandan, CBTC'nin, ATO ve ATS gibi birçok alt sistemden oluştuğu göz önüne alındığında yekpare yaklaşımla CBTC sistemi modellenmek istendiğinde elde edilecek modelin ne kadar karmaşık olduğu açıktır.



Şekil 3. ATP altsisteminin yekpare yaklaşımı ile oluşturulmuş modeli

2.4. Dağıtılmış kontrol mimarisi

Dağıtılmış kontrol mimarisinde, bir sistem alt sistemlerine ayrılır. Tüm ayrılmış alt sistemler için ayrı ayrı spesifikasyonlar tanımlanır. Spesifikasyonlar sistemden istenen veya beklenen davranışın modelleridir ve sistemlere bağlı olarak tanımlanırlar. Sistemin tanımlanan spesifikasyonlar doğrultusunda beklenen davranışı kontrol etmek için denetimsel gözetleyiciler tasarlanır. Bu yaklaşımda her bir alt sistem için bireysel denetimsel gözetleyiciler sentezlenir. Diğer yandan alt sistemler birlikte tüm sistemi meydana getirdiği için alt sistemlerin birbirine bağlanması gerekir. Burada tüm alt sistemlerden, sistem modeline sahip olabilmek için paralel birleşim işlemi uygulanır. Bu işlem ile alt sistemler belirli şartlar altında birbirine bağlanır ve sistem sorunsuz bir şekilde çalışır [16].

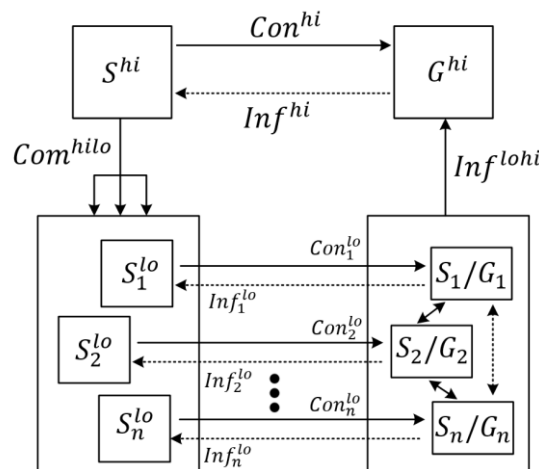
2.5. Hiyerarşik kontrol mimarisi

Hiyerarşik kontrol mimarisinde, denetimsel gözetleyici sentezi, sistem durumlarının azaltılmasına dayanır. Bu mimaride düşük seviyeli ve yüksek seviyeli olarak adlandırdığımız modeller bulunmaktadır. Düşük seviyeli bir model, yüksek seviyeli modelden daha karmaşıktır ve orijinal sistem modeli, düşük seviyeli bir model ile temsil edilir yani düşük seviyeli model sistemlerin tüm olası davranışlarını içeren ayrıntılı bir modeldir. Diğer yandan durumu azaltılmış sistem modeline yüksek seviyeli model denir. Teknik olarak, bir sistemdeki model sayının

azaltılması doğal izdüşümlerle sağlanır. Doğal izdüşüm, sistem durum sayısının azaltılmasını sağlayan önemli bir süreçtir. Diğer bir deyişle, doğal izdüşüm, belirlenen bir olay kümesi kullanılarak yüksek seviye modellerin elde edilmesini sağlar. Doğal izdüşüm teorik olarak şu şekilde açıklanabilir. Daha küçük olay kümesine (Σ_s) ait olmayan olayları daha büyük olay kümesinden (Σ_l) siler. Σ_l ve Σ_s sırasıyla daha büyük ve daha küçük olay setini temsil eder. Burada diğer önemli bir konu düşük seviye modeller ile yüksek seviye modellerin birbirine bağlanmasıdır. Düşük seviyeli model gerçek dünya modelini ifade ederken, yüksek seviyeli model belli durumları içeren sanal bir modeldir ve düşük seviyeli model üzerinde yönetici olarak yer alır. İki seviye, birbirlerine komut ve bilgi kanalları vasıtasıyla bağlıdır. Burada yüksek seviye model (yönetici) tarafından istenen üst düzey davranış alt seviye modele iletilir. Burada denetimsel gözetleyicilere ve genel sisteme bireysel hedefler atanır; yüksek seviyeli denetimsel gözetleyici, düşük seviyeli denetimsel gözetleyicileri kendi hedefine göre koordine ettiğinde genel hedefe ulaşırsa, sistemin karar problemlerinin tutarlı olduğu söylenir. Bu hiyerarşik tutarlılıktır. Bunun anlamı, hiyerarşinin herhangi bir seviyesinde bulunan kontrol modelinin, bir sonraki seviyenin gerektiği veya beklendiği gibi yanıt vereceği güvencesiyle kullanılabilmesi anlamına gelmektedir [17].

2.6. Dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi

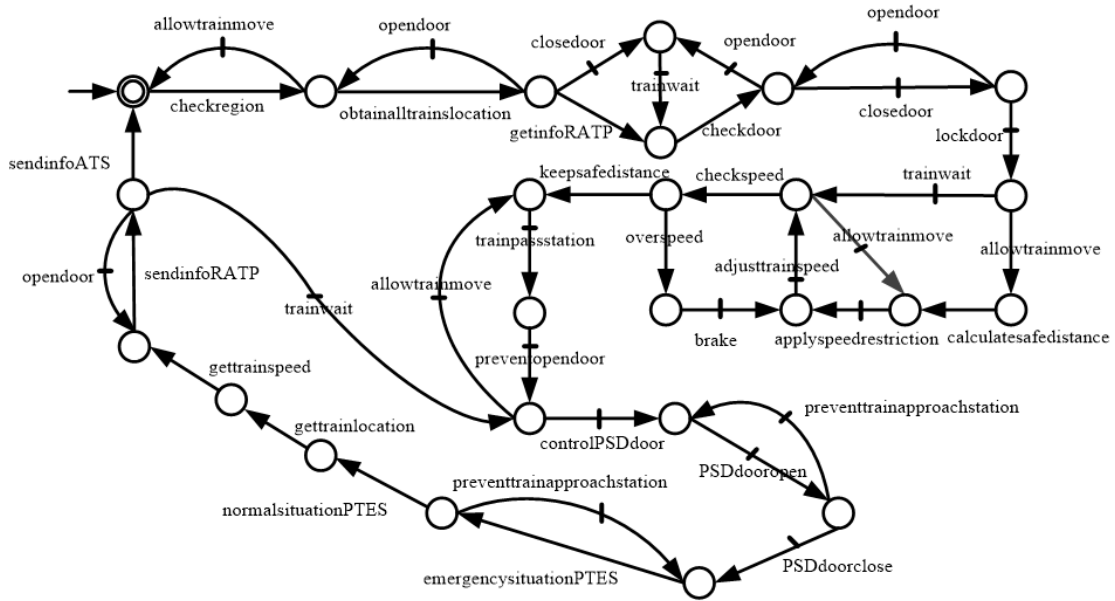
Dağıtılmış kontrol mimarisi ile hiyerarşik kontrol mimarisi birleştiğinde dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi ortaya çıkar. Şekil 4 dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisini yapısını göstermektedir. Gösterilen modelde S, denetimsel gözetleyiciyi, G ise sistemin sonlu durum otomatları tarafından ifade edilen davranışını belirtir. Diğer semboller ise; Com komut işlemini, Con kontrol işlemini, Inf bilgi işlemini, hi yüksek seviyeli sistem modellerini, lo düşük seviyeli sistem modellerini temsil etmek için kullanılmıştır. Bu kısaltmaların işlevleri şöyle ifade edilebilir. Com^{hilo} : Yüksek seviyeli denetimsel gözetleyiciden düşük seviyeli denetimsel gözetleyiciye komut göndermeyi, Inf^{lohi} : Düşük seviyeli sistem modelinden yüksek seviyeli sistem modeline bilgi göndermeyi, Con^{hi} : Yüksek seviye denetimsel gözetleyici tarafından yüksek seviye sistem modeline komut göndermeyi, Inf^{hi} : Yüksek seviye sistemden yüksek seviye denetimsel gözetleyiciye bilgi göndermeyi, Con^{lo} : Düşük seviyeli denetimsel gözetleyici tarafından düşük seviyeli sisteme modeline komut göndermeyi, Inf^{lo} : Düşük seviyeli sistem modelinden düşük seviyeli denetimsel gözetleyiciye bilgi göndermeyi ifade etmektedir. Bu parametreler sistemin birlikte çalışabilirliğini ve sistemler arası koordinasyonu sağlar. Bu sayede düşük seviye sistemler kendi aralarında haberleşir ve düşük seviye ve yüksek seviye sistemlerin birlikte çalışabilirliği sağlanır [7].



Şekil 4. Dağıtılmış ve hiyerarşik kontrol mimarisi [7]

3. Bulgular

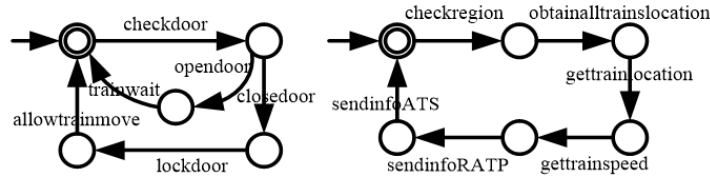
Bu bölümde CBTC'nin alt sistemi ATP sistemi göz önüne alınarak dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi kurulmuştur. Dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi elde edilirken şu yol izlenmiştir. ATP sistemi alt sistemlerine ayrılmıştır, ATP'nin VATP ve RATP olmak üzere iki alt sistemi vardır. VATP ve RATP alt sistemlerinin düşük seviyeli sistem modelleri oluşturulmuştur. VATP ve RATP alt sistemleri için spesifikasyonlar tanımlanmıştır. VATP ve RATP alt sistemlerinin düşük seviye modeli için tanımlanmış spesifikasyonlar kullanılarak, VATP ve RATP için bireysel denetimsel gözetleyiciler sentezlenmiştir. Denetimsel gözetleyici elde edildikten sonra, alt sistemler arasında paylaşılan olaylar tanımlanmıştır. Doğal izdüşüm işlemi ve paylaşılan olaylar kullanılarak yüksek seviyeli modeller elde edilmiştir. Son olarak, oluşturulan düşük seviyeli modeller, elde edilen yüksek seviyeli modeller, elde edilen düşük seviyeli denetimsel gözetleyici ve yüksek seviyeli denetimsel gözetleyiciler ile dağıtılmış hiyerarşik mimari inşa edilmiştir. Diğer yandan vurgulamak gerekir ki CBTC'nin diğer alt sistemleri de yukarıda bahsettiğimiz ATP sistemi için izlediğimiz yol kullanılarak modellenebilir. Bu çalışmada sadece VATP ve RATP modelleri detaylı olarak sunulmuştur. Şekil 5'te VATP alt sisteminin düşük seviye (G_{VATP}^0) görülmektedir. Burada bazı geçişlerin üzerinde çubuk işareti varken, bazı geçişlerin üzerinde çubuk işareti bulunmamaktadır. Herhangi bir geçişte çubuk işareti varsa, olayın kontrol edilebilir, çubuk işareti yoksa, olayın kontrol edilemez olduğu anlamına gelmektedir. Denetimsel gözetleyici yalnızca kontrol edilebilir olayları kontrol etme yeteneğine sahiptir. Modeldeki olaylar ile tüm modellerde bulunan olaylarının açıklaması Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 5, VATP sisteminin kontrolsüz davranışını (G_{VATP}^0) ifade etmektedir.



Şekil 5. Düşük seviyeli ve kontrol uygulanmamış VATP modeli

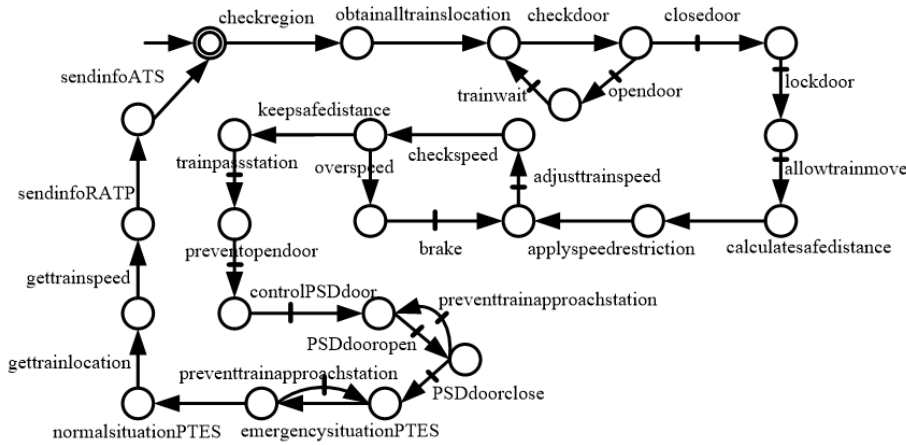
Kontrolsüz model demek içerisinde istenmeyen davranışları bulunduran model anlamına gelmektedir. Örneğin bu kontrolsüz modelde sanal bölgeler kontrol edilmeden trenin hareket etmesine izin verilmiştir. Bu istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, bu tür davranışları içeren modeller kontrolsüz modeller olarak adlandırılır. Kontrolsüz davranışların daha iyi anlaşılması için şu örnekler de verilebilir: trenin aşırı hızlanması, tren seyir halindeyken frenlerin tepki vermemesi vb. gibi. Bu tür istenmeyen durumlar meydana geldiğinde sistem düzgün çalışmaz ve bu durumlar sistemi kullanılamaz hale getirebilir. Peki kontrolsüz bir modelin istenen davranışı sergilemesini nasıl sağlanabilir ve bunun kontrolünü nasıl gerçekleştirilebilir? Bir modelin istenen davranışları spesifikasyonlar tanımlanarak ifade edilebilir. Tanımlanan spesifikasyonlarla

sistemin denetimsel gözetleyicileri elde edilir ve denetimsel gözetleyiciler olayları gözlemleyerek sistemin tanımlanan spesifikasyonlara uygun olarak çalışmasını sağlarlar yani sistemin istenmeyen davranışını ortadan kaldırarak kontrollü bir şekilde istenen davranışı sergilemesini sağlarlar. Şekil 6'da VATP sistemi için tanımlanmış spesifikasyonlar (D_{1VATP}^0, D_{2VATP}^0) görülmektedir.



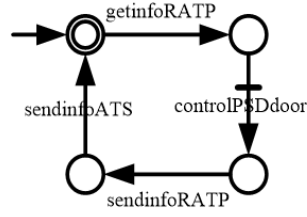
Şekil 6. VATP için tanımlanmış spesifikasyonlar

İlk spesifikasyon, kapı ve tren hareket ilişkisi ile ilgili tren kapıları durumu için, ikinci spesifikasyon ise ray hattında çarpışmayı önlemek için tanımlanmıştır. Bu spesifikasyonların amacı, sanal bölgelerin kontrolü sonrasında tren lokasyonlarını öğrenmek ve diğer trenlerin hızına göre trenin hızını ayarlamak ve bu bilgileri RATP ve ATS'ye göndermek ve trenin kapılarının açık-kapalı olma durumunu kontrol ederek trenin hareket etmesine izin vermektir. Bu özelliklerin senkronizasyonu paralel birleşim işlemi ile gerçekleştirilir. Bu işlem, aynı anda çalışan bir dizi otomatın ortak davranışını veren modeli $D_{VATP}^0 = D_{1VATP}^0 || D_{2VATP}^0$ elde etmemizi sağlar. VATP denetimsel gözetleyicisi ise $(G_{VATP}^{(0),c}) = L(S_{VATP}^0 / G_{VATP}^0) = \kappa_{L(G_{VATP}^0)}(D_{VATP}^0)$ ifadesi ile sentezlenmiştir. VATP'nin denetimsel gözetleyici modeli Şekil 7'de görülebilir.



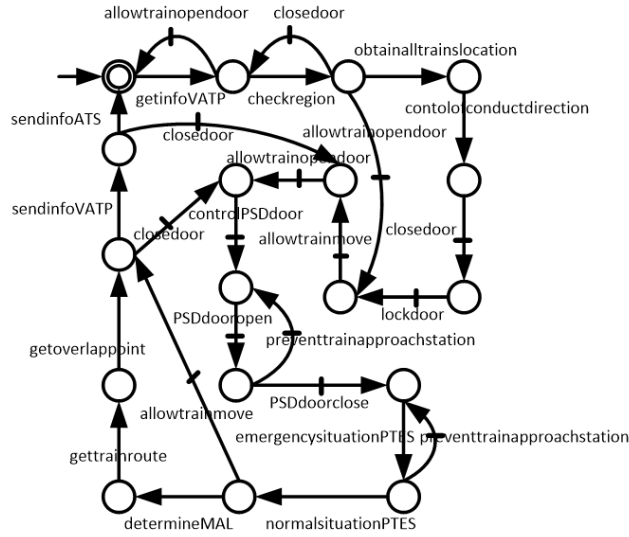
Şekil 7. VATP'nin denetimsel gözetleyici modeli

VATP için elde edilen denetimsel gözetleyici, VATP sistemini gözlemler ve spesifikasyonları sağlayabilmek amacıyla kontrol edilebilen bazı olayları devre dışı bırakır. Diğer yandan VATP alt sistemi, paylaşılan olaylar aracılığıyla RATP alt sistemine bağlanmıştır. Yüksek seviye bir VATP modeline sahip olmak için paylaşılan olaylar aşağıdaki tanımda belirtilmiştir. $\Sigma_{VATP}^1 = \{getinfoRATP, sendinfoRATP, sendinfoATS, controlPSDdoor\}$ ve $\Sigma_{VATP}^1 \subseteq \Sigma_{VATP}^0$. Burada belirlenen paylaşılan olaylar kümesi kullanılarak doğal izdüşüm işlemiyle VATP'nin yüksek seviye modeli elde edilmiştir. Yüksek seviyeli VATP modeli ($G_{VATP}^{(1),c}$) Şekil 8'de görülebilir.



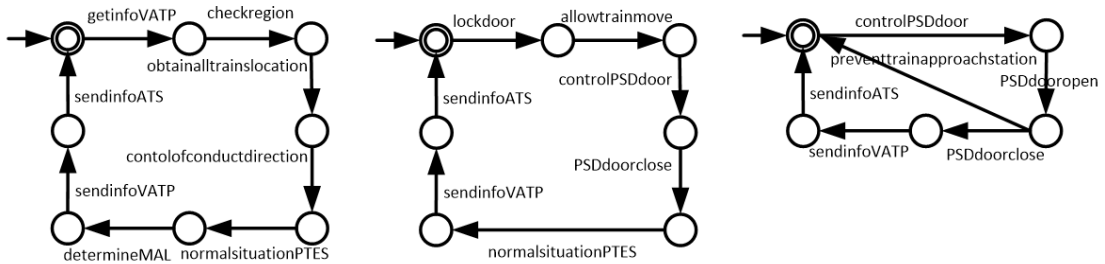
Şekil 8. Yüksek seviye VATP modeli

VATP alt sistemine uygulanan işlemler, RATP alt sistemine de uygulanmıştır. RATP alt sisteminin düşük seviyeli modeli (G_{RATP}^0) Şekil 9'daki gibi tanımlanmıştır.



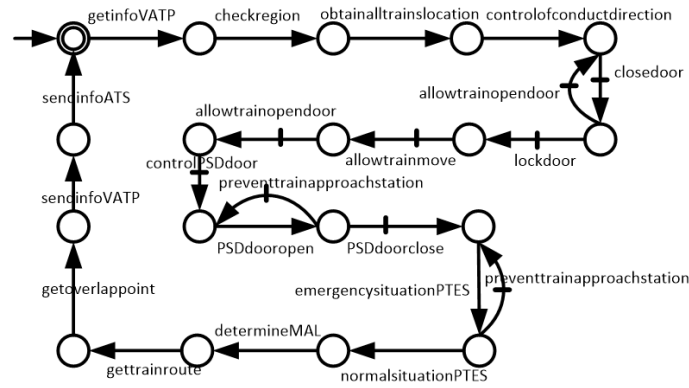
Şekil 91. RATP'nin kontrol edilmemiş düşük seviye modeli

Şekil 10, RATP için tanımlanan spesifikasyonları ($D_{1RATP}^0, D_{2RATP}^0, D_{3RATP}^0$) göstermektedir. Spesifikasyonların senkronizasyonu paralel birleşim işlemi $D_{RATP}^0 = D_{1RATP}^0 || D_{2RATP}^0 || D_{3RATP}^0$ ile yapılmıştır.



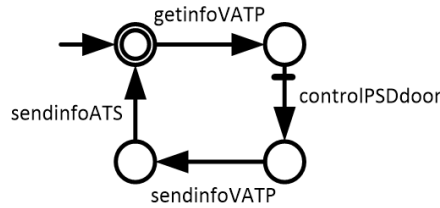
Şekil 10. RATP için tanımlanmış spesifikasyonlar

RATP alt sisteminin düşük seviyeli denetimsel gözetleyicisi ($G_{RATP}^{(0),c} = L(S_{RATP}^0 / G_{RATP}^0) = \kappa_{L(G_{RATP}^0)}(D_{RATP}^0)$) işlemi elde edilmiştir. Düşük seviyeli RATP alt sisteminin denetimsel gözetleyici modeli Şekil 11'de görülebilir.



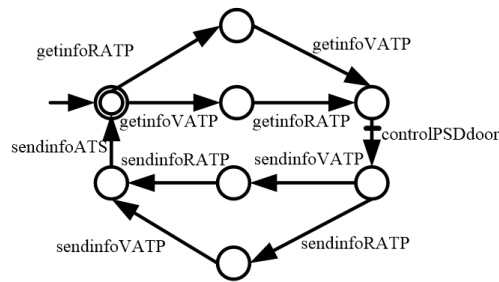
Şekil 11. RATP'nin denetimsel gözetleyici modeli

Paylaşılan olaylar, yüksek seviyeli bir RATP alt sistemine sahip olmak için $\Sigma_{RATP}^1 = \{\text{getinfoRATP}, \text{sendinfoRATP}, \text{sendinfoATS}, \text{controlPSDdoor}\}$ ve $\Sigma_{RATP}^1 \subseteq \Sigma_{RATP}^0$ olacak şekilde belirlenmiştir. Belirlenen paylaşılan olaylarla doğal izdüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir ve RATP alt sisteminin üst düzey modeli ($G_{RATP}^{(1),c}$) Şekil 12'deki gibi elde edilmiştir.



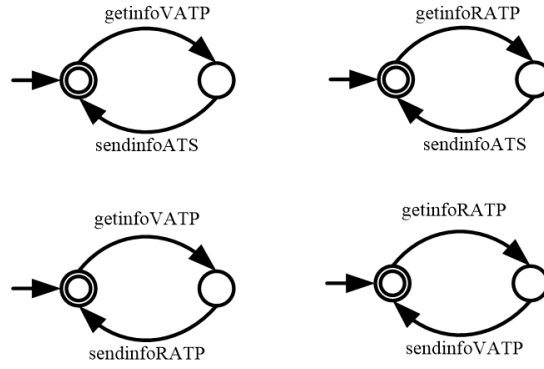
Şekil 12. Yüksek seviye RATP modeli

Alt sistemlerin senkronizasyonu için yüksek seviyeli VATP ve RATP modelleri kullanılmıştır. Bu modellere, paralel birleşim ($G_{ATP}^1 = G_{VATP}^1 || G_{RATP}^1$) işlemi uygulanarak VATP ve RATP'yi içeren ATP sisteminin yüksek seviye modeli elde edilmiştir. Şekil 13, yüksek seviyeli ATP sisteminin modelini (G_{ATP}^1) göstermektedir.



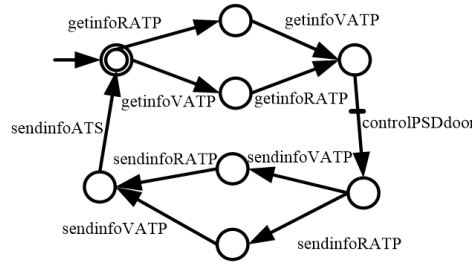
Şekil 13. RATP ve VATP'nin paralel bileşimi modeli ATP

Senkronize edilmiş yüksek seviyeli RATP ve VATP modeli yani ATP modeli için spesifikasyonlar sırasıyla $D_{1ATP}^1, D_{2ATP}^1, D_{3ATP}^1, D_{4ATP}^1$ olarak tanımlanmıştır. Şekil 14'te spesifikasyona ait modeller görülmektedir. Dört spesifikasyonun senkronizasyonu paralel birleşim $D_{ATP}^1 = D_{1ATP}^1 || D_{2ATP}^1 || D_{3ATP}^1 || D_{4ATP}^1$ işlemi ile elde edilmiştir.



Şekil 14. ATP için tanımlanmış spesifikasyonlar

Senkron üst düzey sistemin denetimsel gözetleyicisi ise $(G_{ATP}^{(1),c}) = L(S_{ATP}^1/G_{ATP}^1) = \kappa_{L(G_{ATP}^1)}(D_{ATP}^1)$ ile hesaplanmıştır. ATP modeline ait spesifikasyonları sağlayan denetimsel gözetleyici modeli Şekil 15'te görülmektedir. Diğer yandan Şekil 13 ve Şekil 15 incelendiğinde her iki modelinde aynı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni tanımlanmış olan spesifikasyonlardır.



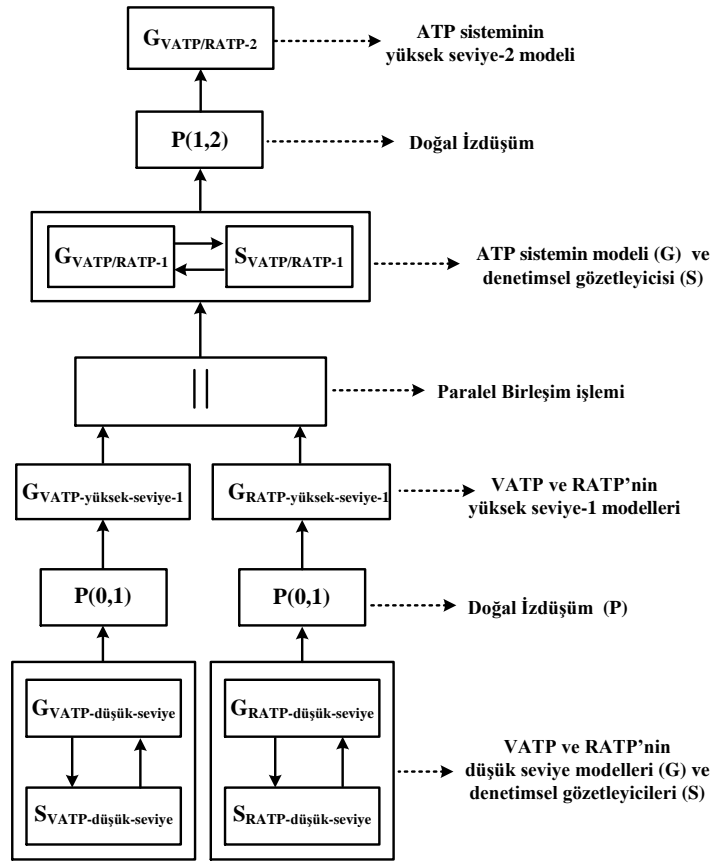
Şekil 15. ATP'nin denetimsel gözetleyici modeli

Tanımlanan paylaşılan olay $\Sigma_{ATP}^2 = \{\text{sendinfoATS}\}$ ve $\Sigma_{RATP}^2 \subseteq \Sigma_{RATP}^1$, doğal izdüşüm ile Şekil 16'daki model $(G_{ATP}^{(2),c})$ elde edilmiştir. Bu model hiyerarşinin en tepesindeki modeldir.



Şekil 16. ATP'nin yüksek seviyeli modeli

Sonuçta oluşturulan modeller ve sentezlenen denetimsel gözetleyiciler ile dağıtılmış ve hiyerarşik yapı inşa edilmiştir. ATP sisteminin dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi Şekil 17'de görülebilir.



Şekil 17. ATP sisteminin dağıtılmış ve hiyerarşik kontrol mimarisi

Burada, denetimsel gözetleyicileri $S_{(VATP-düşük-seviye)}$ ve $S_{(RATP-düşük-seviye)}$ alt düzey $G_{(VATP-düşük-seviye)}$ ve $G_{(RATP-düşük-seviye)}$ modelleri ve spesifikasyonları kullanılarak sentezlenmiştir. P harfi doğal izdüşüm işlemini ifade etmektedir. Doğal izdüşüm işlemi ile $G_{(VATP-yüksek-seviye-1)}$ ve $G_{(RATP-yüksek-seviye-1)}$ modelleri elde edilmiştir. Ayrıca üst düzey modellerin birlikte çalışabilirliğini sağlamak için paralel birleştirme işlemi (||) gerçekleştirilmiş ve $G_{(VATP-RATP-1)}$ modeli elde edilmiştir. Aynı işlemler en yüksek seviyedeki $G_{(VATP-RATP-2)}$ modeli elde edilene kadar tekrarlanmıştır. Böylelikle, VATP ve RATP alt sistemlerinin denetimsel gözetleyicileri ve üst düzey denetimsel gözetleyiciler başarıyla elde edilmiştir. Denetimsel gözetleyici ile ATP sistemi güvenli bir şekilde çalışmakta ve güvenlik gereksinimlerini karşılamaktadır. Diğer yandan oluşturulan modeller ve sentezlenen denetimsel gözetleyiciler ile seviye bazında ve seviyeler arasındaki tutarlılık koşulu sağlanmaktadır ve modeller kilitlenmesiz olarak çalışma şartını sağlamaktadır.

Tablo 2. Otomat modellerindeki olayların açıklanması

| Olaylar | Açıklaması | Olaylar | Açıklaması |
|------------------------|---|-------------|---|
| adjusttrainspeed | Trenin hızının ayarlanması olayı | checkdoor | Trenin kapılarının açık olup olmadığının kontrol edilmesi olayı |
| allowtrainmove | Trene hareket etme izni verilmesi olayı | checkregion | Ayrılmış sanal blokların kontrol edilmesi olayı |
| allowtrainopendoor | Trene kapısını açma izninin verilmesi olayı | checkspeed | Trenin güvenli hızının kontrol edilmesi olayı |
| appliespeedrestriction | Tren hızının limit kısıtlarının uygulanması olayı | closedoor | Tren kapılarını kapatma olayı |

| | | | |
|-----------------------------|---|-------------------------|---|
| brake | Trenin fren yapması olayı | controlPSDdoor | Platformla ayrılmış kapıların kontrol edilme olayı |
| calculatesafedistance | Trenin çarpışmasını önlemek için güvenli mesafeni ayarlanması olayı | determineMAL | Hareket yetki sınırının belirlenmesi olayı |
| emergencysituationPTES | Acil durum olması olayı | lockdoor | Tren kapılarının kilitlenmesi olayı |
| getinfoRATP | RATP'den tren ve bölge bilgilerinin alınması olayı | normalsituationPTES | Acil durum olmaması olayı |
| getinfoVATP | VATP'den tren bilgisinin alınması olayı | obtainalltrainslocation | Ray hattındaki trenlerin yerlerinin öğreilmesi olayı |
| keepsafedistance | Trenin güvenli mesafesini koruması olayı | opendoor | Tren kapılarının açılması olayı |
| overspeed | Trenin hız sınırını aşması olayı | sendinfoATS | ATS'ye tren ve ray bilgilerinin gönderilmesi olayı |
| PSDdoorclose | Platformla ayrılmış kapıların kapanması olayı | sendinfoRATP | Bölge ve tren bilgilerinin RATP'ye gönderilmesi olayı |
| PSDdooropen | Platformla ayrılmış kapıların açılması olayı | sendinfoVATP | Tren bilgilerinin VATP'ye gönderilmesi olayı |
| preventopendoor | Tren kapısının açılmasının önlenmesi olayı | trainpassstation | Trenin istasyonda durmaması olayı |
| preventtrainapproachstation | Trenin tren istasyonuna girmesinin önlenmesi olayı | trainwait | Trenin çalışır halde bekletilmesi olayı |

4. Sonuç

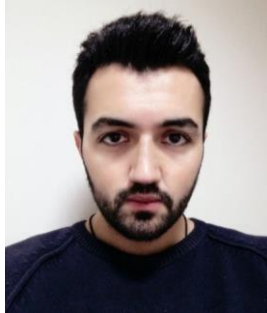
Bu çalışmada oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan CBTC sisteminin alt sistemi ATP, hem yekpare yaklaşımla hem de önerilen yaklaşım ile modellenmiştir. Önerilen modelde her düşük seviyeli model ve yüksek seviyeli model için bireysel denetimsel gözetleyiciler tasarlanmıştır. Yekpare yaklaşımla ATP modelinin durum sayısı 87 olarak hesaplanmıştır. Vurgulamak gerekir ki yekpare yaklaşımla modellemeye CBTC'nin diğer alt sistemleri ATO ve ATS'de dahil edildiğinde durum-uzayı patlaması kaçınılmazdır, bunun sonucunda modellerdeki durumların izlenmesi oldukça zor bir hal alırken, modele ait denetimsel gözetleyici tasarımı oldukça karmaşık bir hal almakta ve denetimsel gözetleyicilerin sentezlenmesi için geçen süre oldukça uzun olmaktadır veya denetimsel gözetleyici sentezlenmemektedir. Bu çalışmada dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisi ile durum uzayının patlamasının önüne geçilmiştir, sistem modeli daha basit hale getirilmiştir. Uygulanan yaklaşımla ATP modelinin durum sayısı 48'e indirilmiş ve ayrıca denetimsel gözetleyicilerin modelleri daha basit hale getirilmiştir. Son olarak, dağıtılmış hiyerarşik kontrol mimarisindeki seviyeler arasındaki hiyerarşik tutarlılık ve tüm seviyedeki sistem modellerinin kilitlenmesiz olma özelliği sağlanmıştır.

Kaynakça

- [1] H. Sömbül , A. Bogrek ve A. Tunçer , "Demiryolu ulaşım güvenliği için makinist uyarım sistemi kavramsal tasarımı ve simülasyonu", *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 14, ss. 1-13, Temmuz, 2021, doi:10.47072/demiryolu.832113
- [2] R. Pascoe, T.Eichorn, "What is communication-based train control?," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 4, no. 4, pp. 16-21, Aralık, 2009, doi: 10.1109/MVT.2009.934665
- [3] T. Yüksel, Z. Öztürk, "A study on communications based train control (CBTC) system and its benefits," in *4th International Symposium on Railway System Engineering-ISERSE*, Karabük, Türkiye 2018.

- [4] S. Jiang, R. Kumar, "Decentralized control of discrete event systems with specializations to local control and concurrent systems," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part B*, vol. 30, no. 5, pp. 653-660, Ekim, 2000, doi: 10.1109/3477.875442
- [5] A.E.C. da Cunda, J.E.R. Cury, B.H. Krogh, "An assume-guarantee reasoning for hierarchical coordination of discrete event systems," in *6th International Workshop on Discrete Event Systems*, Zaragoza, İspanya, 2002.
- [6] K.C. Wong, W.M. Wonham, "Hierarchical control of discrete event systems," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 241-273, Temmuz, 1996, doi: 10.1007/BF01797154.
- [7] K. Schmidt, J. Reger, T. Moor, "A hierarchical architecture for nonblocking control of decentralized discrete event systems," in *IEEE International Federation of Automatic Control Workshop Discrete Event Systems*, Reims, France, 2004.
- [8] K. Schmidt, T. Moor, S. Perk, "Hierarchical control for structural decentralized des," in *7th International Symposium on Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control*, Limasol, Kıbrıs, 2005.
- [9] X. Wang, T. Tang, S. Liu, "Study on modeling and verification of CBTC interlocking system," in *5th International Conference on Wireless Mobile and Multimedia Networks*, Beijing, Çin, 2013.
- [10] O. Kaymakci, V.G. Anik, I. Ustoglu, "A local modular supervisory controller for a real railway station," in *5th International Conference on System Safety*, Manchester, İngiltere, 2010.
- [11] A.E. Haxthausen, J. Peleska, "Formal development and verification of a distributed railway control system," *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 26, no. 8, pp. 687-701, Ağustos, 2000, doi: 10.1109/32.879808
- [12] L.H. Vu, A.E. Haxthausen, J. Peleska, "Formal modelling and verification of interlocking systems featuring sequential release," *Science of Computer Programming*, vol. 133, no. 2, pp. 91-115, Mayıs, 2017, doi: 10.1016/j.scico.2016.05.010
- [13] J. Qian, J. Liu, X. Chen, J. Sun, "Modeling and verification of zone controller: The SCADE experience in China's railway systems," in *International Workshop on Complex Faults and Failures in Large Software Systems*, Floransa, İtalya, 2015.
- [14] J. Farooq and J. Soler, "Radio communication for communications-based train control (CBTC): A Tutorial and Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1377-1402, Ocak, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2661384.
- [15] C. G. Cassandras, S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, USA: LLC/ Springer Science +Business Media, 2008
- [16] S.H. Lee, K.C. Wong "Structural decentralized control of concurrent discrete event systems," *European Journal of Control*, vol. 8, no. 5, pp. 477-491, Aralık, 2002, doi: 10.3166/ejc.8.477-491
- [17] H. Zhong, W.M. Wonham "On the consistency of hierarchical supervision in discrete event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 35, no. 10, pp. 1125-1134, Ekim, 1990, doi: 10.1109/9.58555

Özgeçmiş



Cem ATILGAN

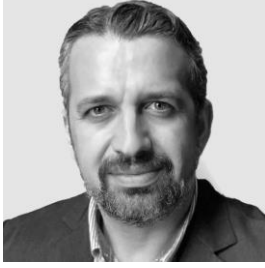
1989 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Erciyes Üniversitesinde, yüksek lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır, doktora Yıldız Teknik Üniversitesinde devam etmektedir. Kırklareli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliğinde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları; ayırık olaylı sistemler, yapay zeka ve görüntü işleme konularıdır.

E-Posta: cematilgan@klu.edu.tr

**Özgür Turay KAYMAKÇI**

1976 tarihinde doğmuştur. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Hali hazırda Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Doçent olarak görev yapmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları; raylı sistemler ve sinyalizasyon, fonksiyonel güvenlik ve endüstriyel otomasyondur.

E-Posta: okaymakci@comu.edu.tr

**Tarık Veli MUMCU**

1980 tarihinde doğmuştur. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Hali hazırda İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesinde bulunan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Doktor Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları; bilgi sistemleri, haberleşme ve kontrol mühendisliğidir.

E-Posta: tarik.mumcu@iuc.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Cem ATILGAN: Literatür taraması, Analiz ve sistem modellemesi. Özgür Turay KAYMAKÇI: Fikrin oluşmasına, Analizlerin ve sonuçların kontrol edilmesi. Tarık Veli MUMCU: Sonucun kontrol edilmesi, Makalenin yazım ve içerik yönünden kontrol edilmesi.

**En Kısa Yol Optimizasyonlarında Floyd-Warshall Algoritması: Lojistik Merkezler Örneği**Bekir KESKİN^{*1}, Evrencan ÖZCAN²¹ TCDD Genel Müdürlüğü, Strateji Geliştirme Dairesi Başk., İç Kontrol ve Organizasyon Şube Müd., Ankara, Türkiye² Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

*bekirkeskin55@gmail.com

(Alınış/Received: 12.10.2022, Kabul/Accepted: 03.11.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Lojistik merkezler taşımacılık, depolama, elleçleme, dağıtım, gümrükleme, ayrıştırma, ithalat, ihracat ve transit işlemler, sigorta ve bankacılık, altyapı hizmetleri, danışmanlık ve üretim vb. faaliyetlerin birbiriyle uyumlu bir şekilde yürütülmesine ve olası taşıma yöntemlerinin bir arada sunulmasına hizmet eden önemli tesislerdir. Yük talebinin sürekli olması nedeniyle yük taşımacılığının da kesintisiz, en kısa yoldan, yakıt tüketimi ve taşıma süresi açısından da optimal bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada yük trenlerinin lojistik merkezler en kısa yoldan ulaşması problemi ele alınmıştır. Literatürde lojistik köylerle ilgili yazın taraması yapıldığında; lojistik merkezlerin, lojistik sektöre yapmış olduğu katkılar incelenmiş, güçlü ve zayıf yönleri ortaya konmaya çalışılmış, etkin ve verimli çalışması hakkında önerilerle ilgili çalışmalar gözlemlenmiştir. Fakat bu çalışmada; konuya mühendislik uygulamaları yaklaşımıyla, ülke genelinde faaliyet gösteren on iki lojistik merkezin yanı sıra yapım ve ihale aşamasında yer alan yedi adet lojistik merkez de çalışma kapsamına dâhil edilerek, lojistik merkezler arasında güzergâh seçimi için en uygun sonuç elde etme amacı güdülmüştür. En kısa yol problemlerinin uygulama alanı genellikle bir şebekede/ağda yer alan noktalar arasında en kısa mesafenin belirlenmesi olup, çalışmada şebekedeki herhangi iki düğüm arasındaki en kısa yolun belirlenmesi açısından Floyd-Warshall Algoritması tercih edilmiştir. Bu amaçla ulusal demiryolu ağı için toplam 33 düğümden oluşan bir çizge oluşturulmuş ve en kısa yolun hesaplanması için Floyd-Warshall algoritması Python programlama dilinde kodlanarak çözülmüştür ve toplam on dokuz adet lojistik merkez arasında en kısa yol/yollar tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu taşımacılığı, En kısa yol, Lojistik merkez, Floyd-Warshall**Floyd-Warshall Algorithm in Shortest Path Optimizations: Example of Logistics Centers**

Abstract: Logistics centers are important facilities which served possible transportation methods together and carried out activities in harmony with each other such as transportation, storage, handling, distribution, consolidation, customs clearance, sorting, import, export and transit transactions, insurance and banking, infrastructure services, consultancy and production, etc. Due to the continuous demand for freight, freight transportation must be realized uninterrupted, in the shortest way, and optimal in terms of fuel consumption and transportation time. In this study, the problem of transportation of freight trains to logistics centers by the shortest route is discussed. When the literature on logistics villages is scanned; The contributions of logistics centers to the logistics sector have been examined, their strengths and weaknesses have been tried to be revealed, and studies on suggestions for effective and efficient operation have been observed. But in this study; with an engineering applications approach to the subject, it is aimed to obtain the most appropriate result for the route selection among the logistics centers by including twelve logistics centers operating throughout the country as well as seven logistics centers that are in the construction and tender stages, in the scope of the study. In generally the application area of the shortest path problems is to determine the shortest distance between the points in a network, the Floyd-Warshall Algorithm is preferred in this study in terms of determining the shortest path between any two nodes in the network. For this purpose, a graph consisting of a total of 33 nodes was created for the national railway network and the Floyd-Warshall algorithm was coded in the Python programming language to calculate the shortest route and the shortest route were determined between a total of nineteen logistics centers.

Atıf için/Cite as: B. Keskin, E. Özcan, "En kısa yol optimizasyonlarında Floyd-Warshall algoritması: lojistik merkezler örneği," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 82-92, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1187884

Keywords: Railway transportation, Shortest path, Logistics center, Floyd-Warshall

1. Giriş

Türkiye, coğrafi konumunun avantajı sayesinde lojistik üs haline gelme potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, Türkiye'den uluslararası taşıma koridorlarının geçmesi de bu potansiyeli güçlendirmektedir. Avrupa'da ve Türkiye'de örnekleri bulunan bu merkezlerinde katkısıyla lojistik faaliyetler tek merkezden, bütünleşmiş bir şekilde düzenli olarak yapılmaktadır. Lojistik merkezler (köy ya da üsler), bir bölgedeki taşımacılık, depolama, elleçleme, dağıtım, gümrükleme, ayrıştırma, ithalat, ihracat ve transit işlemler, sigorta ve bankacılık, altyapı hizmetleri, danışmanlık ve üretim vb. faaliyetlerin birbiriyle uyumlu bir şekilde olası taşıma yöntemlerinin bir arada kullanılarak gerçekleştirildiği özel alanlardır. Lojistik merkez kavramının başlangıç aşamasında karşımıza ilk olarak deniz ve havalimanları çıkmaktadır. Dünya'daki ilk lojistik merkez kavramı endüstrileşme hareketlerinin etkisiyle birlikte Intermodal Logistics Center (ILC) adı altında Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'de ortaya çıkmıştır. Avrupa'da ise ilk olarak Fransa'da kurulmuştur [1].

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü (TCDD) tarafından 2005 yılında çalışmalarına başlanan lojistik merkezlerin faaliyete geçmesiyle Türk lojistik sektörüne yıllık yaklaşık 35.596 bin ton ilave taşıma imkânı 12.799 bin metrekarelik, açık alan, stok alanı, konteyner stok ve elleçleme sahası kazandırılması düşünülmüştür [2]. Ülkemizde faaliyet gösteren on iki adet lojistik merkezle toplam 5,1 milyon m² alan ve 13,6 milyon ton kapasite oluşturulmuştur. Ayrıca yapım ve ihale aşamasında yer alan yedi adet lojistik merkezle toplam 7,8 milyon m² alan ve 14,3 milyon ton kapasite oluşturulmuştur. Bu kapsamda batıda Avrupa üzerinden gelen ve giden yükler için Çerkezköy ve Halkalı'ya, kuzeyde Rusya üzerinden gelen ve giden yükler için Samsun'a, doğuda yine Rusya, Gürcistan, Kazakistan, Çin üzerinden gelen ve giden yükler için Kars'a, İran üzerinden gelen ve giden yükler için Tatvan'a, Suriye üzerinden gelen ve giden yükler için Kahramanmaraş'a, güneyde denizyolu üzerinden gelen ve giden yükler için Mersin'e, batıda denizyolu üzerinden gelen ve giden yükler için İzmir'e lojistik merkez yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile trenlerin bir lojistik merkezinden diğer lojistik merkezine ulaşımının nasıl olacağına cevap verilmesi, bu problem için de algoritma yapısına herhangi iki merkez arasında en kısa mesafeyi vermesi uygunluğu nedeni ile Floyd Warshall algoritmasının kullanılması, Floyd-Warshall Algoritmasının lojistik merkezler arası şebeke çalışması kapsamında Python programlama dilinde yazılarak uygulama kolaylığı sağlaması yönlerinden bir ilk gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında ikinci bölümde en kısa yol problemine dair incelenen literatüre, üçüncü bölümde yöntem metot bilgisine, dördüncü bölümde bulgulara ve beşinci bölümde ise sonuç kısmına yer verilmiştir.

2. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Yapılan çalışmada on dokuz lojistik merkez arasında işletilecek trenlerin en kısa yoldan lojistik merkezlere ulaşımının sağlanması amaçlanmıştır. Bilimsel yazın taraması yapıldığında bu problem literatürde en kısa yol problemleri olarak yer almaktadır. Bu problemlerde Floyd-Warshall, Dijkstra, Prim algoritması gibi birçok yöntem ile çözümler bulunmuştur. En kısa yol problemlerinin uygulama alanı genellikle bir şebekede/ağda yer alan noktalar arasında en kısa mesafenin kat edilmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada şebekedeki herhangi iki düğüm arasındaki en kısa yolun belirlemesi açısından Floyd-Warshall Algoritması tercih edilmiştir. En kısa yol problemlerinin çözümünde kullanılan Floyd-Warshall Algoritması literatürde ulaştırma, telekomünikasyon, enerji hatları, bilgisayar ağları ve sağlık başta olmak üzere birçok alanda karşımıza çıkmaktadır.

Demiryolu alanında; Wang ve Lu, Romanya - Polonya arasındaki demiryolu taşımacılığının optimize edilmesi için istasyonların teknik özelliklerini dikkate alarak doğrusal programlama

modelini kullanmışlardır [3]. Pandey ve Dixit ise yaptıkları çalışmada demiryollarında daha güvenilir, daha yeşil ve daha sürdürülebilir ulaşım sağlamak hedefiyle istasyonlar arası mesafenin optimize edilmesi uygulamasının çözümünde Dijkstra algoritmasını kullanmışlardır [4]. Liu ve Xia, üç boyutlu bilgisayar modelleme sistemlerini en kısa yol algoritmaları aracılığıyla kullanarak demiryolu ulaştırmasında rota seçimi yapmışlar ve görselleştirmişlerdir [5]. Wang ve diğ. ise yaptıkları çalışmada yüksek hızlı demiryolu hattı inşası için yol sayısını maksimum düzeyde tutma, seyahat süresini en aza indirme ve uygun duraklar belirleme amaçlarıyla doğrusal programlama ve genetik algoritma yöntemini kullanmışlardır [6]. Zhang ve diğ. demiryolu ile tehlikeli madde taşımada en uygun güzergâhın belirlenmesi amacıyla inşaat maliyeti ve güvenlik faktörlerini göz önüne alarak sezgisel tabanlı bir rota algoritması olan A* algoritmasını kullanmışlardır [7]. Kosjier ve diğ., İndija ve Novi Sad şehirleri arası demiryolun güzergâhında rota planlaması için maliyet, kapasite, fiziksel etkiler, gelişim ve yaşam ortamı üzerindeki etki kriterleri altında dört adet alternatif için çok kriterli karar verme yöntemlerinden VIKOR yöntemini kullanmışlardır [8]. Kankavi çalışmasında, büyük projeleri de dikkate alarak Türkiye geçişinde maliyet, süre, yük potansiyeli, güvenlik riski kriterlerini ele almış ve AHP yöntemi kullanarak en uygun güzergâhı belirlemiştir [9]. Saat ve Serrano ise yine çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanarak Malezya'da yüksek hızlı trenlerin güzergâh seçim problemi için 3 kriter ve 11 alternatif ile yapmış oldukları çalışmada ELECTRE yönteminden faydalanmışlardır [10]. Özdemir çalışmasında en kısa yol algoritmalarını bir arada kullanarak Çin-Avrupa arasında yapılacak yük taşınması için demiryolunda şebeke optimizasyonu yapmış, çalışmasında en kısa yol algoritmalarını Python programlama dili ile kodlayarak optimal güzergâhı hesaplamıştır [11]. Dermawan ise çalışmasında bir tren yolculuğunda en iyi yolu bulmada en kısa yol algoritmalarından Dijkstra ve Floyd-Warshall algoritmalarının karşılaştırmasını yapmıştır [12]. Özdemir ve diğ. yine demiryolu alanında yapılan bu çalışmada ise ipek yolu koridorunda Pekin'den Londra'ya ulaşan demiryolu ağı için toplam 26 düğümden oluşan bir çizge üzerinde en kısa yolun hesaplanması için Dijkstra algoritması Python programlama dilinde kodlayarak çözmüşlerdir [13]. Karayolu alanında ise; Pradhan ve Mahinthakumar karayolunda yaptıkları çalışmada büyük ölçekli bir ulaşım ağında değişen trafik koşullarını dikkate alarak tüm çiftlerin en kısa yolunu bulmak için kullanılan ve iki önemli algoritma olan Floyd-Warshall ve Dijkstra yöntemlerinin performans analizini yapmışlardır [14]. Hamurcu ve Eren ise yine karayolunda yaptıkları çalışmada ÇKKV yöntemlerini kullanarak Ankara'da yeni bir ulaştırma seçeneği olan monoray sistemi için güzergâh seçimini yapmışlardır. Belirlenen sekiz alternatif monoray güzergâhı arasından en uygun güzergâhı ANP ve TOPSIS yöntemi kullanarak tespit etmişlerdir [15]. Hanzl vd. ise en kısa yol bulma yöntemlerini tercih etmişler ve Çek Cumhuriyeti'nin Güney Bohemian bölgesinde on altı düğümlü ulaşım ağının trafik modelinin belirlenmesi konulu çalışmada Floyd algoritmasını kullanmışlardır [16]. Yanwei vd. ise yine en kısa yol bulma yöntemlerini tercih etmişler ve yaşanan ulaşım sorunlarından dolayı optimal bir çözüm yolu bulmak için Floyd algoritmasını kullanarak probleme çözüm getirmişlerdir [17]. Pandika, vd. etkili seyahat planlaması için bir bölgedeki tıkanıklığın ulaşımda aksamalara neden olmasından dolayı karayolu üzerinde oluşan tıkanıklığı önlemek için en uygun rotayı oluşturabilen bir uygulama geliştirmişlerdir [18]. Risald vd. Dijkstra ve Floyd-Warshall algoritmasının kombine edilmesi ile trafik kazalarındaki kazazedelerin en yakın hastaneye en kısa sürede ulaştırılabilmesi için güzergâh optimizasyonu geliştirmişlerdir [19]. Triana ve Syahputri ihtiyaca göre gerekli en yakın garajı bulmak için medya bilgilerinden yararlanılan ve Floyd-Warshall yöntemini kullanan bir uygulama ile en yakın garaj konumunu bulmuşlardır [20]. Tang vd. yeniden üretime dayalı entegre (ileri ve tersine) lojistikte optimal yolun belirlenmesi için Floyd tabanlı bir çözüm sunarak lojistik alanında optimizasyon çalışması yapmışlardır [21]. Danışan vd. ise bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak Floyd-Warshall algoritmasını C tabanlı bir kod yardımıyla çözümlenerek, Türkiye'deki elektrik enerjisi talebinin yaklaşık %31,9'unu karşılayan on iki Hidroelektrik Santral (HES)'lerin bakımında görevlendirilen ekiplerin santrallara en kısa yoldan ulaşmaları için Floyd-Warshall algoritmasını kullanarak optimal sonuç veren en kısa yolları bulmuşlardır [22]. Ramadhan ve diğ. ise Floyd-Warshall ve Prim algoritmalarının kıyaslamasını sunarak en kısa yol problemini ele almışlardır [23]. Çakır vd. çalışmalarında katı atıkları toplama

sistemine ait yol ağları, çalışma alanının demografik yapısı ve bölgede ortaya çıkan atık toplama ve taşıma operasyonlarında, CBS tabanlı rota ve güzergâh optimizasyonu ile şebekeye (on mahalle) ait optimum güzergâh tespiti yapılmasında dijkstra algoritmasını kullanmışlardır [24]. Sungkwan vd. otomatik yönlendirmeli araçların enerji tüketiminin en aza indirilmesini ve en kısa yoldan çalışma süresinin iyileştirilmesi amacıyla yaptıkları çalışmada 12 düğümden oluşan şebekede dijkstra algoritmasını kullanmışlardır [25]. Ekmen, en kısa yol probleminde kullanılan algoritmalarından Dijkstra, Bellman-Ford, Johnson ve Floyd-Warshall algoritmalarının en kısa yolu bulma performansları için kıyaslama yapmıştır [26]. Magzhan ve Jani en kısa yolun hesaplanmasında en yaygın kullanılan algoritmalarından olan Dijkstra, Floyd-Warshall, Bellman-Ford ve Genetik algoritmasını değerlendirmiştir. Algoritmaları java yazılım diliyle kodlamış ve bu şekilde hesaplamıştır. Çalışmada en kısa yolun hesaplanmasında, daha iyi sonuca ulaşmak adına yapay zekâ, bulanık mantık ve sinir ağları gibi tekniklerin de kullanılabilmesi söylenmiştir [27]. Tamimi ve Abu-Ryash ise Dijkstra algoritması, Bellman-Ford algoritması, Floyd-Warshall algoritması ve Johnson algoritması gibi en kısa yol algoritmalarını incelemişlerdir [28]. Golden, yaptığı çalışmada Dijkstra ve Bellman-Ford algoritmalarını 50-1000 düğüm arası şebeke probleminde çalışma zamanları verilerine göre değerlendirmiştir [29]. Aydın ve Alkan, çalışmalarında 3 farklı güzergâh için yol bulma algoritması test edilmiş ve elde edilen sonuçlar Dijkstra, Bellman-Ford, Floyd-Warshall, A* algoritmasında karşılaştırmışlardır [30]. Karyono ve Djojo çalışmalarında Dijkstra algoritması, A* algoritması ve Floyd-Warshall'ı süre, bellek ve hesaplama sonucu kriterleri altında karşılaştırmışlardır [31]. Wang, en kısa yol algoritmalarından Dijkstra, Bellman-Ford ve Floyd Warshall algoritmalarının temel uygulama alanlarını ile çalışma prensiplerini anlatmıştır [32]. Çam ve Sezen, Türkiye’de şehirlerarası yolcu taşıyan bir firmanın işlerinin daha iyi yönetilmesi amacıyla oluşturulan uygulamada, araçların bekleme sürelerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır [33]. Timor, taşıma modlarında hat uzunluğu ve erişilebilirlik hedefleri doğrultusunda maliyetlerin minimize edilmesini sağlayan bir model geliştirmişlerdir [34]. Söyler ve Fendoğlu, çalışmalarında ARP ve Çinli Postacı Problemi (ÇPP) tanıtılmış, Malatya Büyükşehir Belediyesi ilaçlama araçlarının optimal rotaları, Hierholzer & Floyd Warshall algoritmaları ve Excel-Solver ile hesaplanmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır [35]. Nuriyeva ve Kızılateş, gezgin satıcı problemi için n adet şehir ele alınmış “en kısa yol” ve “ekleme sezgiseli” algoritmaları kullanılarak bulunan devre tüm şehirlerden geçecek şekilde genişletilmiştir [36]. Saçar, çalışmasında Hicaz demiryolu ile Bağdat demiryolu hattını analiz etmiştir [37]. Özdemir ve diğ., lojistik merkez yatırım projesi önceliklendirme problemi için yatırım aşamasındaki 6 adet lojistik merkezi arasından seçim yapmışlar, uygulamada AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır [38].

3. Metot

Floyd-Warshall algoritması, ağırlıklı bir çizgede bulunan tüm düğüm çiftleri için en kısa yolun hesaplanmasında kullanılan bir algoritmadır. Algoritma, döngü içermeyen bir çizgede, negatif veya pozitif ağırlıklı olmasına bakılmaksızın optimal sonuç vermektedir. En kısa yolun bulunmasında problem daha küçük alt problemlere bölerek, dinamik programlama yaklaşımını kullanmaktadır [39]. En kısa yol problemlerinin çözümünde Floyd-Warshall Algoritmasının yanı sıra Bellman-Ford, Dijkstra ve Johnson Algoritmaları sıklıkla kullanılanlar arasındadır. Bu algoritmalar arasından da Floyd-Warshall Algoritması ile Dijkstra algoritması ön plana çıkmaktadır. Dijkstra Algoritması, bir çizge üzerinde başlangıç ve amaç düğümleri arasında en kısa mesafenin bulunmasını sağlamak üzere sadece pozitif ağırlıklı değerlerine sahip çizgelerde kullanılabilen Floyd-Warshall Algoritması döngü içermeyen bir çizgede, negatif veya pozitif ağırlıklı olmasına bakılmaksızın, çizgede bulunan tüm düğüm çiftleri için en kısa yolun hesaplanmasında kullanılan bir algoritma olmasından dolayı Floyd Warshall algoritması tercih edilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise en kısa yol problemi çözümü için 33 düğümlü sabit bir yapı ele alınmış olup, çizgede bulunan tüm düğüm çiftleri için en kısa yolun hesaplanmasında optimal sonuçlar sunması nedeniyle sadece Floyd Warshall algoritması kullanılmıştır.

Floyd algoritması Dijkstra algoritmasından daha geneldir. Çünkü şebekedeki herhangi iki düğüm arasındaki en kısa yolu belirler. Algoritma, n düğümlü şebekeyi n satırlı ve n sütunlu karar matrisi olarak gösterir. Matrisin (i,j) elemanı, i.düğümünden j.düğüme olan d_{ij} sonlu yoksa sonsuzdur.

0.Adım: Aşağıdaki gibi D^0 uzaklık matrisini hazırlanır. Bu matrisin çapraz elemanları sıfır olup, birbirine bağlantısı olmayan düğümler (sonsuz) işareti ile gösterilir.

$$D^0 = \begin{matrix} & - & d_{12} & d_{13} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & & & & & \\ d_{31} & & & & & i \\ \dots & & & & & \\ d_{n1} & .. & .. & .. & .. & \end{matrix} \quad (1)$$

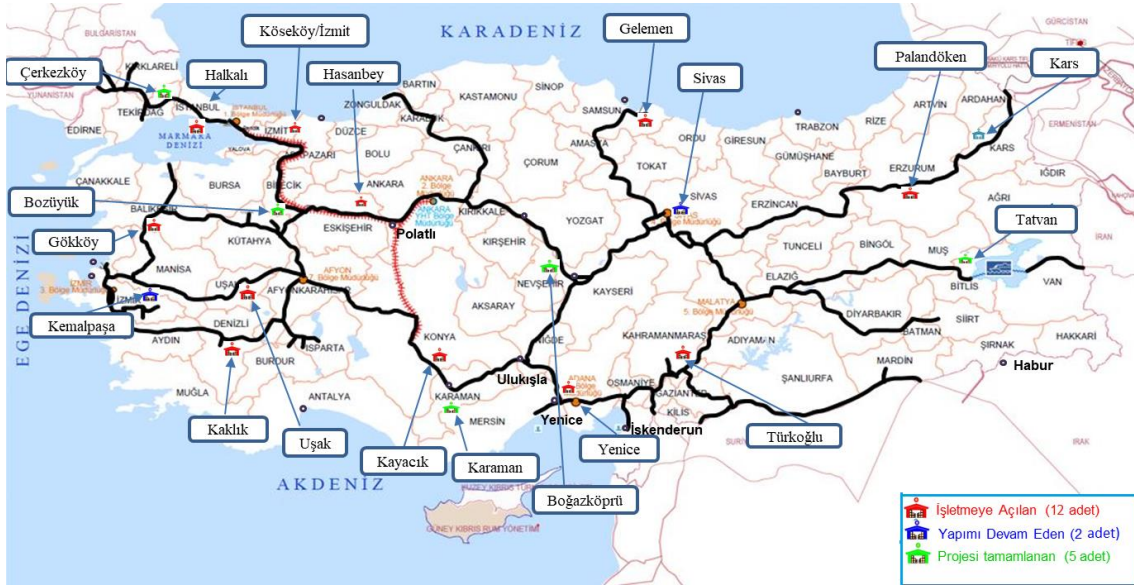
k.genel adım: k. satırı ve k. sütunu anahtar satır ve anahtar sütun olarak tanımlanır. D_k matrisine anahtar satır ve sütundaki değerleri yazılır. D_k matrisindeki diğer elemanları aşağıdaki bağıntıya göre belirlenir:

$$D_k(i, j) = \min\{D_{k-1}(i, j), D_{k-1}(i, k) + D_{k-1}(k, j)\} \quad (2)$$

Denklem 2 işlemleri tüm düğümler için tekrarlanır.

4. Bulgular

Ulaşım koridorlarının merkezinde olan ülkemizi, bölgesinin lojistik üssü haline getirmek ve sanayicilerimizin yükünü demiryolu ile taşıyarak rekabet gücünü artırmak amacıyla yirmi beş adet lojistik merkezde toplam 14,8 milyon m² alanda 60,6 milyon ton taşıma kapasitesi oluşturulması planlanmıştır. Hizmete alınan on iki adet lojistik merkezle toplam 5,1 milyon m² alan ve 13,6 milyon ton kapasite oluşturulmuştur. Uygulamada lojistik merkezlerin birbirleri arasında etkinliğini arttırmak için işletmecilik yapılan on iki adet lojistik merkezi ile yapım aşamasında olan yedi adet lojistik merkez de çalışmaya dahil edilmiş olup, söz konusu merkezler arasında yapılacak yük taşımaları için en kısa yollar belirlenmiştir. Güzergâhın belirlenmesinde ulusal demiryolu ağı haritasından faydalanılmıştır. Trenlerin/yüklerin bulunduğu yerden talep edilen yere kesintisiz ve güvenilir bir şekilde taşınması gerekliliği dikkate alındığında demiryolu hatlarında yaşanan kazalardan, arızalardan ya da zorunlu bakım uygulamalarından dolayı yolun kapanması ve ulaşımın durdurulması söz konusu olmaktadır. Bazen bir kazanın kaldırılması, donanım arızasının giderilmesi ya da bakımının yapılması o trenin/ekipmanın bulunduğu hattı da kapatmayı gerektirebildiği gibi demiryolunda aynı hat üzerinde çalışan diğer trenlerin de eş zamanda durdurulmasını gerektirebilmektedir. Bu nedenle demiryolu hatlarında yapılacak taşımaların daha fazla duruşa/gecikmeye neden olmadan en kısa yoldan gerçekleştirilmesi için alternatif rotaların oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada, birbirinden bağımsız on iki lojistik merkez ile yapım aşamasında olan yedi lojistik merkez entegre olarak ele alınmış olup, bir demiryolu tren işletmecisi için söz konusu on dokuz lojistik merkez ve bu merkezler arasında çalışacak yük treninin çıkış noktasından varış noktasına en kısa yoldan ulaşması için optimum çözüm sunulmuştur. Trenlerin buldukları merkezden diğer merkezlere en kısa yoldan ulaşımı için işletmecilerin hangi güzergâhı tercih etmesi gerektiği sorusuna çözüm getirilmiştir.



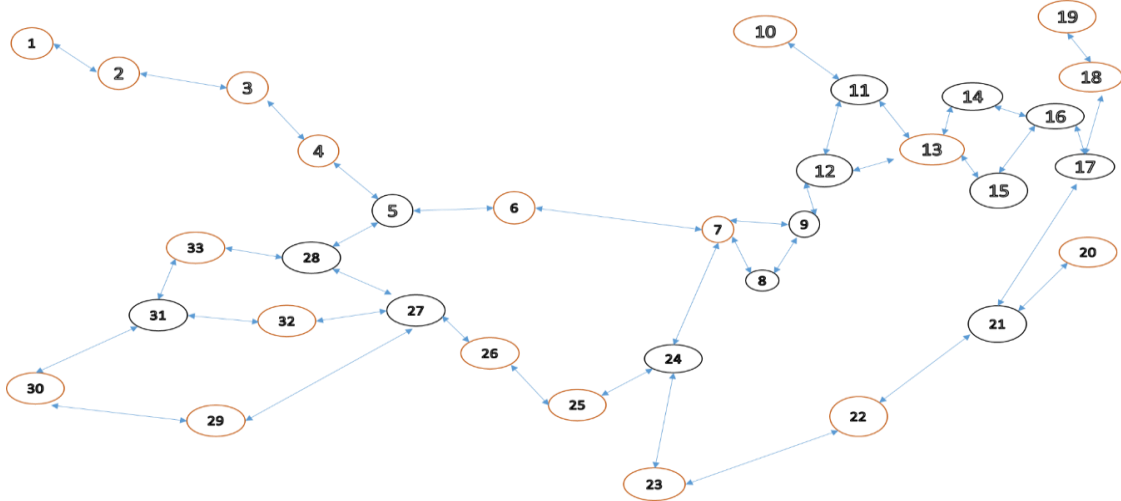
Şekil 1. Lojistik merkezlerin konumları

Uygulamada ele alınan demiryolu haritasının kavşak noktaları şebekenin düğümlerini göstermektedir. Kavşak noktaları önemli demiryolu istasyonlarından oluşan şebeke toplam 33 düğümden oluşmaktadır. Düğümlerin şebeke üzerinde gösterilmesi ve kodlamada kullanım kolaylığı sağlaması amacıyla Tablo 1’de gösterildiği gibi nümerik olarak numaralandırma yöntemi seçilmiştir.

Tablo 1. Şebekenin düğümleri

| Düğüm | İstasyon | Düğüm | İstasyon | Düğüm | İstasyon |
|-------|------------|-------|------------|-------|-----------|
| 1 | Çerkezköy | 13 | Sivas | 25 | Karaman |
| 2 | Halkalı | 14 | Karagöl | 26 | Kayacık |
| 3 | Köseköy | 15 | Kandoğan | 27 | Afyon |
| 4 | Bozüyük | 16 | Kangal | 28 | Alayın |
| 5 | Eskişehir | 17 | Çetinkaya | 29 | Kaklık |
| 6 | Hasanbey | 18 | Palandöken | 30 | Kemalpaşa |
| 7 | Boğazköprü | 19 | Kars | 31 | Manisa |
| 8 | Kayseri | 20 | Tatvan | 32 | Uşak |
| 9 | Gömeç | 21 | Malatya | 33 | Gökköy |
| 10 | Gelemem | 22 | Türkoğlu | | |
| 11 | Kalın | 23 | Yenice | | |
| 12 | Hanlı | 24 | Ulukışla | | |

Düğümler arası ilişkiler Şekil 1’de verilen ulusal demiryolu haritası dikkate alınarak oluşturulmuştur. Her bir düğümü ifade eden geçiş düğümlerinin istasyonlar arasındaki mesafe ise kilometre cinsinden hesaplanmıştır. Mesafe hesaplamada kaynak olarak küresel seyahat planlama hizmeti sunan bir firmanın demiryolu mesafe hesaplama aracı kullanılmıştır [40].



Şekil 2. Problem kapsamında düğümler arasındaki şebeke ağı

Temelini Şekil 1’deki demiryolu haritasının oluşturduğu şebeke düğümlerinin birbirleriyle olan bağlantıları çizge üzerinde gösterilmiş ve Şekil 2’de verilmiştir.

4.2. Floyd-Warshall algoritması pseudo (sözde) kod

Python, ilk sürümü Guido Van Rossum tarafından 1991’de ortaya konulmuş genel amaçlı bir programlama dili olarak bilinmekte olup, yorumlanan ve dinamik bir dil olan Python, esas olarak prosedürel ve nesne tabanlı programlama yaklaşımlarını ve belli bir oranda da fonksiyonel programlamayı desteklemektedir. Kullanıcılar python kodlama dilini özgün, kolay kullanılabilir, etkileşimli, nesne yönelimli, popüler ve kütüphanesinin geniş olması ön plana çıkarmıştır [41]. Floyd-Warshall algoritması problemin karakteristik özelliklerine uygun olmasından dolayı elde edilen gerçek verilere göre Python programlama dili 3.8.5 sürümünde kodlanmıştır.

Pseudo (sözde) kod:

```

for i = 1 to N
  for j = 1 to N
    if there is an edge from i to j
      dist[0][i][j] = the length of the edge from i to j
    else
      dist[0][i][j] = INFINITY
  for k = 1 to N
    for i = 1 to N
      for j = 1 to N
        dist[k][i][j] = min(dist[k-1][i][j], dist[k-1][i][k] + dist[k-1][k][j])

```

Python programlama dilinde Floyd-Marshall algoritması kodları yazılmış olup problemin çözümü aşağıda verilmiştir.

Şebekede bazı lojistik merkezlere direkt olarak ulaşım sağlanabilirken bazılarında bir veya birkaç ara istasyondan geçerek ulaşım sağlanabilmektedir. Mesafelerin belirlenmesinden sonra Python programlama dili ile oluşturulan kod yardımıyla problem çözülmüştür. Yapılan çözüm sonunda ulaşılan D ve S matrislerinin büyüklüğü nedeniyle çalışmaya sadece matrislerin başlangıç bölümlerine Tablo 2 ve Tablo 3’de yer verilmiştir.

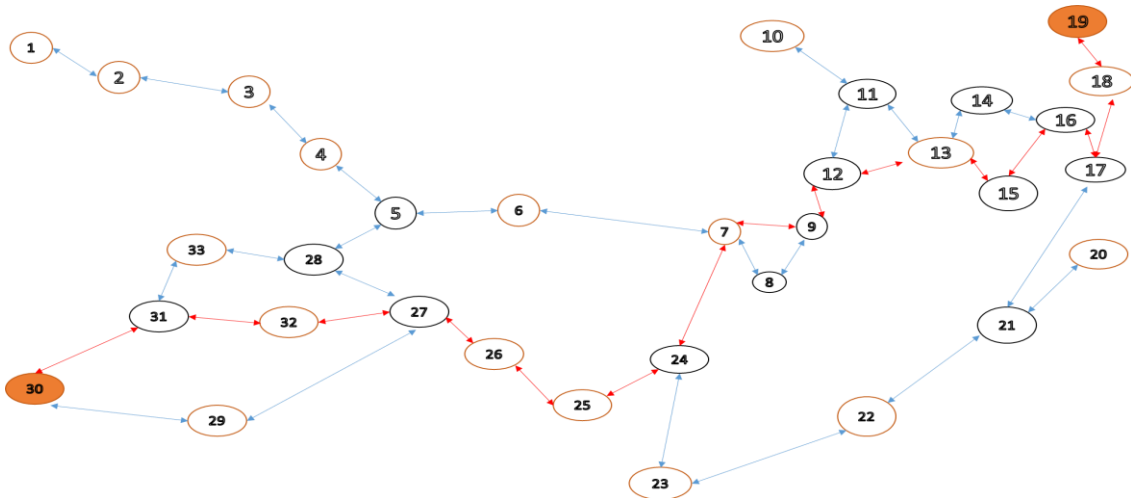
Tablo 2. Çözüm sonucu elde edilen uzaklık D matrisi

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0 | 88 | 214 | 386 | 436 | 445 | 1055 | 1070 | 1086 | 1653 |
| 2 | 88 | 0 | 126 | 298 | 348 | 357 | 967 | 982 | 998 | 1565 |
| 3 | 214 | 126 | 0 | 172 | 222 | 231 | 841 | 856 | 872 | 1439 |
| 4 | 386 | 298 | 172 | 0 | 50 | 59 | 669 | 684 | 700 | 1267 |
| 5 | 436 | 348 | 222 | 50 | 0 | 9 | 619 | 634 | 650 | 1217 |
| 6 | 445 | 357 | 231 | 59 | 9 | 0 | 610 | 625 | 641 | 1208 |
| 7 | 1055 | 967 | 841 | 669 | 619 | 610 | 0 | 15 | 31 | 598 |
| 8 | 1070 | 982 | 856 | 684 | 634 | 625 | 15 | 0 | 20 | 587 |
| 9 | 1086 | 998 | 872 | 700 | 650 | 641 | 31 | 20 | 0 | 567 |
| 10 | 1653 | 1565 | 1439 | 1267 | 1217 | 1208 | 598 | 587 | 567 | 0 |

Tablo 3. Çözüm sonucu elde edilen uzaklık S matrisi

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|------------------|
| 1 | 1,1 | 1,2 | 1,2,3 | 1,2,3,4 | 1,2,3,4,5 |
| 2 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3,4 | 2,3,4,5 |
| 3 | 3,2,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,4,5 |
| 4 | 4,3,2,1 | 4,3,2 | 4,3 | 4,4 | 4,5 |
| 5 | 5,4,3,2,1 | 5,4,3,2 | 5,4,3 | 5,4 | 5,5 |
| 6 | 6,5,4,3,2,1 | 6,5,4,3,2 | 6,5,4,3 | 6,5,4 | 6,5 |
| 7 | 7,6,5,4,3,2,1 | 7,6,5,4,3,2 | 7,6,5,4,3 | 7,6,5,4 | 7,6,5 |
| 8 | 8,7,6,5,4,3,2,1 | 8,7,6,5,4,3,2 | 8,7,6,5,4,3 | 8,7,6,5,4 | 8,7,6,5 |
| 9 | 9,7,6,5,4,3,2,1 | 9,7,6,5,4,3,2 | 9,7,6,5,4,3 | 9,7,6,5,4 | 9,7,6,5 |
| 10 | 10,11,12,9,7,6,5,4,3,2,1 | 10,11,12,9,7,6,5,4,3,2 | 10,11,12,9,7,6,5,4,3 | 10,11,12,9,7,6,5,4 | 10,11,12,9,7,6,5 |

Yapılan çözüme göre kaynak düğüm olarak alınan 19 (Kars) numaralı lojistik merkezden 30 (İzmir) numaralı batak düğümü için sonuçlar incelenmiştir. On dokuz lojistik merkez arasında yapılacak taşımalar için kaynak düğümü on dokuz (Kars) alınmış olup şebeke ağındaki ulaşım yollarına Şekil 3'te yer yerilmiştir.

**Şekil 3.** Trenlerin merkezlere ulaşım yolları

Elde edilen bu sonuca göre on dokuz numaralı kaynak düğümünden çıkan bir yük treninin otuz numaralı merkeze hangi düğümlerden geçerek en kısa yoldan nasıl ulaşacağı gösterilmiştir. Burada gerek Tablo 2 ve Tablo 3'te gerekse Şekil 3'te gözlemleneceği gibi orta koridor üzerinden gelen yük trenleri 19,18,17,16,15,13,12,9,7,24,25,26,27,32,31,30 numaralı düğümlerden geçerek en kısa yoldan varış noktası olan İzmir'e ulaşmış olacaktır. Yine aynı şekilde İzmir'den Kars'a ve oradan da Gürcistan, Türkmenistan, Kazakistan ve Çin yönlü yükler için de; 30,31,32,27,26,25,24,7,9,12,13,15,16,17,18,19 numaralı düğümler aracılığı ile en kısa yoldan trenler yüklerini taşımış olacaktır. Yani Kars Lojistik Merkezi ve İzmir Lojistik Merkezleri arasında taşıma durumunda trenler Kars-Erzurum-Çetinkaya-Kangal-Candoğan-Sivas-Hanlı-Gömeç-Boğazköprü-Ulukışla-Karaman-Kayacık-Afyon-Uşak-Manisa-İzmir hattını takip etmelidir. Buradan yola çıkarak İzmir-Kars arası çalışacak bir tren ile İzmir, Uşak, Kayacık, Karaman, Sivas, Erzurum ve Kars lojistik merkezinin yükleri konsolide edilerek tren ve hat kapasitesi dahilinde güzergah üzerindeki merkezlerin yükleri de aynı tren ile en kısa yoldan taşınabilmesine olanak sağlanmış olacaktır.

5. Sonuç

Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı 11. Kalkınma Planı Lojistik ve Enerji bölümünde, Türkiye'nin ihracat, büyüme ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında, son yıllarda hızlı bir gelişme gösteren lojistiğin büyüme potansiyelimize katkısının artırılması ve 2018 yılında yayımlanan lojistik performans endeksinde 160 ülke arasında 47. sırada yer alan ülkemizin 2023 yılı hedeflerine göre ilk 25 ülke arasına girmesi amaçlanmaktadır [42]. Lojistik merkezler ülke genelindeki ithalat, ihracat ve yurtiçi yük taşımacılığı için önemli kapasiteye sahip önde gelen alanlardır. Bu itibarla çalışmada; ülkemizin ihracat, büyüme ve kalkınma hedeflerine ulaşmasında lojistik faaliyetlerin katkısının artırılması amacıyla, ülke genelinde demiryolu bağlantılı faaliyet gösteren 13,6 milyon ton kapasiteye sahip on iki adet lojistik merkezle, proje aşamasında yer alan 14,3 milyon ton kapasiteye sahip diğer yedi adet lojistik merkez üzerinde çalışma yapılmıştır. Çalışmada taşıma için yola çıkan trenlerin en kısa sürede en kısa yoldan lojistik merkezlere ulaşımını sağlamak amaçlanmıştır. Problem Floyd-Warshall algoritması kullanılarak Python programlama dilinde yazılarak çözülmüştür. Elde edilen çözümler sonucunda trenlerin lojistik merkezlere ulaşımında optimal sonuç veren en kısa yollar bulunmuştur.

Özellikle Türkiye'nin lojistikteki uluslararası konumunun güçlendirilmesi, sanayi ürünlerinin toplam maliyeti içindeki lojistik maliyetin yükünün azaltılması, nihai ürünlerin tüketim pazarlarına ulaşım süresinin kısaltılması, lojistik maliyetlerin düşürülmesi ve işlem sürelerinin kısaltılması için trenlerin buldukları merkezden diğer merkezlere ulaşımında hangi güzergahın tercih edilmesi gerektiği sorusuna çözüm getirilmiştir. İlerleyen çalışmalarda oluşan ihtiyaçlara göre kurulan şebeke ağı genişletilebilir.

Kaynakça

- [1] Ş. Demiroğlu, "Küresel lojistik köyleri ve bu kapsamda Türkiye'de lojistik köyleri üzerine bölgesel bir inceleme," Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kütahya, 2013.
- [2] T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, *Ulaşan ve Erişen Türkiye*, Türkiye, 2017.
- [3] Y. Wang and C. Lu, "Railway route optimisation from Romania to Poland based on an analysis of China's 'one belt and one road' initiative," *International Journal of Internet Manufacturing and Services*, vol. 6, no. 1, pp. 1–18, 2019.
- [4] S.D. Pandey, "Railway route optimization system using dijkstra method," *Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun.*, vol. 2, no.3, pp. 435–440, 2014.
- [5] L.Liu, Y. Xia and Y. Han, "Research on three-dimensional modelling of railway route in railway route selection," *Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng.* no. 1, pp. 2907–2911, 2010.
- [6] L. Wang *et al.*, "A two-layer optimization model for high-speed railway line planning," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 12, no. 12, pp. 902–912, 2011.

- [7] H. Zhang et al., "A risk assessment based optimization method for route selection of hazardous liquid railway network," *Railway safety*, vol. 110, pp. 217–229, 2018.
- [8] M. Kosijer et al., "Multicriteria decision-making in railway route planning and design," *Građevinar*, vol. 64, pp. 195–205, 2012.
- [9] M.Y. Kankavi, "Demir ipekyolunda Türkiye geçişi için en uygun güzergâh seçimi," Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, 2019.
- [10] M.R Saat and J.A. Serrano, "Multicriteria high-speed rail route selection: application to Malaysia's high-speed rail corridor prioritization," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 38, no. 2, pp. 200–213, 2015.
- [11] S. Özdemir, "Modern ipek yolu koridorlarında rota optimizasyonu için hibrit model önerisi," Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2021.
- [12] T.S. Dermawan, "Comparison of dijkstra dan floyd-warshall algorithm to determine the best route of train," *IJID (International Journal on Informatics for Development)*, vol. 7, no. 2, pp.54-58, 2019.
- [13] S. Özdemir, Ö. Sacar and E. Özcan, "Dijkstra algoritması kullanılarak ipek yolu koridorları arasında en kısa ulaştırma güzergâhının belirlenmesi" *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 13, pp. 97-105, 2021.
- [14] A. Pradhan and G. Mahinthakumar, "Finding all-pairs shortest path for a large-scale transportation network using parallel Floyd-Warshall and parallel Dijkstra algorithms," *Journal of computing in civil engineering*, vol. 27, no. 3, pp. 263-273, 2013.
- [15] M. Hamurcu and T. Eren, "An Application of multicriteria decision-making for the evaluation of alternative monorail routes," *Mathematics*, vol. 7 no.1, pp. 16, 2019.
- [16] J. Hanzl et al., "Application of floyd's algorithm on transport network of south bohemian region," *Komunikacie: Communications (Scientific Letters of the University of Žilina)*, vol. 18, no. 2, 2016.
- [17] Z. Yanwei et al., "Optimal coordination path selecting method for conduction transformation based on floyd algorithm," *Procedia Computer Science*, vol.162, pp.227-234, 2019.
- [18] D. Pandika, B. Irawan and C. Setianingsih, "Application of optimization heavy traffic path with floyd-warshall algorithm," *In 2018 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, pp. 57-62, 2018.
- [19] A.S. Risald, "Best routes selection using dijkstra and floyd-warshall algorithm," *11th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS)*, Indonesia, 2017.
- [20] Y.S. Triana and I. Syahputri, "Implementation floyd-warshall algorithm for the shortest path of garage," *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol.3, no. 2, 871-878, 2018.
- [21] K. Tang, C. Pan and M. Qian, "Manufacturing/remanufacturing logistics network optimization based on floyd algorithm," *In Journal Of Physics: Conference Series*, 2019.
- [22] T. Danişan, E.Özcan and T. Eren, "Bakım ekiplerinin en kısa yoldan santrallara ulaşımı: hidroelektrik santral örneği," *Journal of Turkish Operations Management*,. pp. 576-587, 2021.
- [23] Z. Ramadhan, A.P.U. Siahaan and M. Mesran, "Prim and floyd-warshall comparative algorithms in shortest path problem," *In Proceedings Of The Joint Workshop Ko2pi And The 1st International Conference On Advance & Scientific Innovation*, pp. 47-58, 2018.
- [24] M.E. Çakır et al., "Katı atıklar için optimum güzergâh tespiti ve alansal dağılım haritalarının cbs ortamında oluşturulması: Suruç (Şanlıurfa) örneği," *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi BEU Journal of Science*, vol. 8, no. 2, pp. 595-603, 2019.
- [25] K. Sungkwan et al., "Optimal path planning of automated guided vehicle using dijkstra algorithm under dynamic conditions," *1th International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications (RiTA) Robot Intelligence Technology and Applications Robot Intelligence Technology and Applications*, Daejeon, Korea, 2019.
- [26] E .D. Ekmen, "A Study on performance evaluation of optimization algorithms in the shortest path problem," Yüksek Lisans Tezi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, 2020.
- [27] K. Magzhan and H. Jani, "A review and evaluations of shortest path algorithms," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 99–104, 2013.
- [28] A. A. Tamimi, "Comparison studies for different shortest path algorithms," *Int. J. Comput. Technol.*, vol. 14, no. 8, pp. 5979–5986, 2015.
- [29] B. Golden, "Shortest-path algorithms: a comparison," *Operations Research*, vol. 24, no. 6, 1976.
- [30] M. Alkan and M. Aydin, "Simulation and comparison of pathfinding algorithms using real Turkey data." *Int. Conf. Artif. Intell. Data Process*, 2019.
- [31] M. A. Djojo and A. Karyono, "Computational load analysis of dijkstra, A*, and floyd-warshall algorithms in mesh network," *Proc. 2013 Int. Conf. Robot. Biomimetics, Intell. Comput. Syst*, 2013.
- [32] X. Z. Wang, "The comparison of three algorithms in shortest path issue," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1087, no. 2, 2018.

- [33] Ö. N. Çam and H. K. Sezen, "Toplam bekleme süresini enküçükleme amaçlı bir araç rotalama problemi," *International Journal of Social Inquiry*, vol. 11, no. 2, pp. 47–60, 2018.
- [34] M. Timör, "Medyan en kısa yol problemi: maliyet erişilebilirlik hedeflerine yönelik bir çok amaçlı taşımacılık problemi uygulaması," *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, Cilt: 34, no: 2, pp. 31–56, 2005.
- [35] E. Fendoğlu and H. Söyler, "Route optimization of Malatya metropolitan municipality pesticide vehicles," *Alphanumeric J.*, vol. 6, no. 1, 2017.
- [36] F. Nuriyeva and G. Kizilates, "Gezgin satıcı problemi için merkezden kenarlara hipersezgisel yöntem," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 20, no. 2, pp. 319–323, 2016.
- [37] Ö. Saçar. "İpek yolu güzergahında yapılan lojistik etkinliklerin günümüz lojistik faaliyetleri ile Karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, 2018.
- [38] S. Özdemir et al., "Türkiye'deki lojistik merkezleri yatırım önceliklerinin değerlendirilmesinde çok kriterli karar modeli önerisi," *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, no. 12, pp. 83–94, 2020.
- [39] E.R. Zieyel, "Operations research: applications and algorithms." *Technometrics*, vol. 30, no. 3, pp. 361–362, 1988.
- [40] TCDD "2016-2020 İstatistik Yıllığı" pp.18-19, 2021. [Online]. Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/istrapor/20162020ist.pdf> [Accessed Oct 21, 2022].
- [41] Rome2Rio, "Railway Map", [Online]. Available: <https://www.rome2rio.com/map/>. [Accessed Sep 13, 2022].
- [42] Türkiye Cumhuriyeti Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2019). "On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)". Available: <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/OnbirinciKalkinmaPlani.pdf> [Accessed Sep 21, 2021].

Özgeçmiş



Bekir KESKİN

1986 yılında Samsun'da doğmuştur. 2010 yılında İstanbul Üniversitesi "Ulaştırma ve Lojistik" ve ayrıca 2018 yılında Hoca Ahmet Yesevi Üniversitesi "Endüstri Mühendisliği" bölümlerinde lisans eğitimlerini tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimine Kırıkkale Üniversitesi "Endüstri Mühendisliği" bölümünde devam etmektedir. 2011 yılından beri TCDD Genel Müdürlüğü "Lojistik Dairesi Başkanlığı" (2011-2016) ve "Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı"nda (2016-) iş hayatına devam etmektedir.

E-Posta: bekirkeskkin55@gmail.com



Evrencan ÖZCAN

Aslen Kırşehirli olan Özcan 1980 Ankara doğumludur. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora derecelerini sırasıyla 2003, 2007 ve 2013 yıllarında Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden almıştır. Özel sektörde 7 yıl devam eden mühendislik tecrübesinin ardından, 2010 yılında Elektrik Üretim A.Ş.' ye atanan Özcan, Ocak 2018'den bu yana Kırıkkale Üniversitesi' nde Doç. Dr. Öğretim Üyesi unvanı ile meslek hayatına devam etmektedir.

E-Posta: evrencan.ozcan@kku.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Assessing Railway Transportation Performance of European Countries with CRITIC and ROV Techniques

Karahan KARA*¹, Galip Cihan YALÇIN²

¹ Artvin Çoruh University, Vocational School of Hopa, Artvin, Turkey

² Kırıkkale University, Graduate School, Kırıkkale, Turkey

*karahan.kara@artvin.edu.tr

(Alınış/Received: 15.09.2022, Kabul/Accepted: 03.11.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2023)

Abstract: Rail transport is among the modes of transport that provides safe and reliable logistics services for the transport of passengers, goods, and dangerous goods. The decrease in railway transport volumes in recent years reveals the necessity of examining the railway transport performance. In this research, it is aimed to determine the railway transport performance of European countries in 2020. Sixteen railway performance criteria have been determined. Three of these criteria are cost-based and thirteen criteria are benefit-based. The criterion weights have been calculated by the Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) technique. The railway transport performance of twenty-three European countries is presented using the Range of Value (ROV) technique. The data set has been obtained from the Eurostat database. According to the research findings, the three criteria with the highest weight are determined as rail accidents victims, rail accidents, accidents involving transport of dangerous goods. The three countries with the highest railway transport performance are Germany, Italy, and Sweden. Suggestions for increasing the railway transportation performance levels of the countries are presented.

Keywords: Railway transport performance, Multi criteria decision making, CRITIC, ROV

Avrupa Ülkelerinin Demiryolu Taşımacılığı Performansının CRITIC ve ROV Teknikleriyle Değerlendirilmesi

Öz: Demiryolu taşımacılığı yolcuların, malların ve tehlikeli maddelerin taşınmasında emniyetli ve güvenilir lojistik hizmet sunan ulaştırma modları arasında yer almaktadır. Son yıllarda demiryolu taşıma hacimlerinde düşüşlerin yaşanması demiryolu taşımacılık performansının incelenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada Avrupa ülkelerinin 2020 yılı demiryolu taşımacılık performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırmada on altı demiryolu performans kriteri belirlenmiştir. Bu kriterlerin üç tanesi maliyet esaslı on üç tanesi fayda esaslı kriterlerdir. Kriter ağırlıkları kriterler arası korelasyon yoluyla kriterlerin önem tespiti (CRITIC) tekniğiyle tespit edilmiştir. Yirmi üç adet Avrupa ülkesinin demiryolu taşımacılık performansı değer aralığı (ROV) tekniğiyle hesaplanmıştır. Veri seti Eurostat'den elde edilmiştir. Araştırma bulgularına göre performans kriter ağırlığı en yüksek olan üç kriter demiryolu kaza kurbanları, demiryolu kazaları, tehlikeli madde taşımacılığındaki kazalar olarak belirlenmiştir. Demiryolu taşımacılık performansı en yüksek olan üç ülke ise Almanya, İtalya ve İsveç'tir. Ülkelerin demiryolu taşımacılık performans düzeylerinin artırılmasına yönelik öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Demiryolu taşımacılık performansı, Çok kriterli karar verme, CRITIC, ROV

1. Introduction

Railway transport is an environmentally friendly type of transportation used to transport passengers and goods [1]. Although railway infrastructure installation costs are high, railway transport is among the safe transportation modes. The decrease in rail transportation demands in recent years has made it essential to consider rail transport in terms of performance, efficiency, and effectiveness [2]. The main factors that determine the performance of railway transport are infrastructure, equipment/train qualities and numbers, transportation volumes, safety, and

Atıf için/Cite as: K. Kara, G.C. Yalçın, "Assessing railway transportation performance of european countries with CRITIC and ROV techniques," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 93-106, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1175529

security. In terms of sustainable performance, maintenance activities are decisive. Carrying out maintenance activities based on long-term strategies provides both cost and performance benefits [3]. With the increasing number of railway entrepreneurs, the need for the reorganization of the market structure and the fair distribution of capacity allocations arise. Thus, the trend towards deregulation in railway services can be prevented [4]. Reducing deregulation contributes to minimizing accidents/incidents by providing safe and reliable rail transport.

Railway transport network structure is realized with strategic decisions and long-term planning. At the same time, following the technological developments in the railway transport sector closely supports the correct strategic decisions. Past statistics and performance indicators of rail transport also shed light on making future-oriented decisions. For this reason, macro level decision makers and governments should be informed about rail transport performance levels. The main purpose of this research is to determine and compare the railway transport performances (RTP) of European countries in 2020. For this purpose, the research questions determined within the scope of the research are as follows:

- *Research question 1:* Is it possible to obtain information about railway performances of countries based on railway statistical data?
- *Research question 2:* Is the multi-criteria decision-making technique among the applicable methods in terms of railway performance determination?
- *Research question 3:* As a result of this research, can the performance evaluations of the countries help their national railway planning by providing information to the countries in terms of criteria?

It is aimed primarily to determine RTP criteria and to use multi-criteria decision making (MCDM) techniques. It is planned to use the Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) technique in determining the criterion weights, and the Range of Value (ROV) technique in determining the country performances. Thanks to the results obtained, European countries will have information about their rail transport performance. In addition, determining the importance levels of the criteria will also play an active role in the decision makers' strategies.

This article, which is handled with the aim of determining the RTP of European countries in 2020, consists of five parts. In the second part, an in-depth literature review has been made. In the third part, the criteria and the sampling used in the research are presented. Also, CRITIC and ROV techniques are explained in this part. In the fourth part, the rail transport performances of European countries are determined. In the fifth part, the criteria weights and country performances are evaluated, and suggestions are presented.

2. Literature Review

There are studies on the relationship between railway performance metrics and logistics and supply chain metrics [5], [6]. But in this research, the railway transport success of countries has been pointed out. RTP basically points to the railway transport success of countries. In the literature, there are studies dealing with railway transportation performance, railway network performance, railway safety performance and trying to develop an index. At the same time, it is seen that performance determination approaches differ in research. In this literature review, studies on railway performance are included. Besides, the railway performance criteria used in the research are also presented.

Stenström et al. [7] divide railway infrastructure performance indicators into two main groups. These are managerial and condition indicators. Under the Managerial indicator, there are technical, organizational, economic, health, safety, and environment sub-criteria. Under the

condition indicator, there are substructure, superstructure, rail yards, electrification, signaling, information and communication technology sub-criteria. Research on railway stations performance affecting railway transportation performance Harris et al. [8] explained the factors affecting performance as “train stopping position, dispatch delay, staff position relative to the critical door, excess customer service, passenger door forcing, and knock-on delays”. Kyriakidis et al. [9] examined 479 railway accidents and incidents. As a result of the examination, 12 criteria that affect the railway performance the most were determined. These criteria are “Safety culture, System design, Fatigue, Communication, Distraction, Quality of procedures, Perception, Training, Expectation, Quality of information Supervision, Workload”.

The 2012 European Railway Performance Index was created by The Boston Consulting Group. In this index, “Intensity of use, Quality of service and Safety” were used as the main criteria. Passenger and goods volumes were considered under the main criterion of Intensity of use. Quality of service sub-criteria are Punctuality of regional trains, Punctuality of long-distance trains, Percentage of high-speed rail, Average fare in euros. Accidents and Fatalities are evaluated within the scope of Safety [10]. Kyriakidis et al. [11] developed the Human Performance Railway Operational Index. In this index, opinions of 52 employees belonging to different railway operations were taken. Åhrén and Parida [12] compared the national railway management performances of Banverket and Jernbanverket using maintenance performance indicators. According to the research findings, they concluded that each railway infrastructure has different locations and constraints, and maintenance performance indicators are suitable for comparison.

Yang et al. [13] argued that railway subsidence, which affects rail transport performance, should be measured regularly. They developed Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar to measure and predict railway subsidence. Autoregression Moving Average (ARMA), artificial neural network and gray models were used in the research. Ranjan et al. [14] used DEMATEL and VIKOR techniques to determine the performance of sixteen Indian Railway zones. Nine criteria were used in the research. These criteria are “Route distance, Total number of locomotives, Number of passengers carried, Number of total staffs, Number of major stations, Number of accidents/derailments, Number of persons injured/deceased, Expenditure, Operating cost ratio”. Bhanot et al. [15] determined the performances of Indian Railway container business and select private players with data envelopment analysis (DEA). In the research, “handling terminals, employees, yard equipments, freight wagons, containers, freight kilometer net profit” variables were accepted as criteria. Tahir [16] presented the performance of Pakistan railways with DEA by comparing with Chinese and Indian railways. According to the research findings, it has been determined that a steady public investment and managerial autonomy are required for the railway performance to be sustainable.

Jitsuzumi and Nakamura [17], investigating the causes of railway underperformance in Japan, applied DEA analysis with the data of fifty-three Japanese railway operators. In the research, it was determined that six Japanese railway operators were at full efficiency level. Also Fixed assets, Employee, Operating expenditure is used as input variables. Passenger-km, The Externality index is used as output variables. Transportation density is used as Uncontrollable variable. Considering the 2002 data of twenty railways, Yu, and Lin [18] have simultaneously estimated the technical efficiency, service effectiveness and technical effectiveness of the passengers and freighters. In addition, it has been determined that there is a significant correlation between technical effectiveness and technical efficiency and service effectiveness.

Stoilova et al. [19] calculated the rail network performance of The Orient–East Med (OEM) corridor countries (Germany, Czech Republic, Austria, Slovakia, Hungary, Romania, Bulgaria, Greece) using Sequential Interactive Modeling for Urban Systems (SIMUS) technique. Infrastructural, economic, and technological main criteria and twenty-two sub-criteria were used in the research. In addition, clustering analysis was made, and OEM countries were clustered.

Sangiorgio et al. [20] applied the AHP technique in the index developed to predict the safety performance of railway transportation systems. “Signals passed at danger, Broken wheels, Broken axles, Broken rails, Track buckle, Wrong-side signaling failures” criteria were used in the research. In addition, considering the maintenance costs, increasing the level of reliability, safety and usability is among the performance targets of railway transportation ([3]).

As a result of the literature review, it has been clearly seen that MCDM techniques are used in performance determination studies. However, there are limited studies in the literature on the determination of railway performance. It has been observed that AHP, DEMATEL, VIKOR, ARMA, DEA and SIMUS techniques are used in these studies. In this study, the CRITIC technique was preferred to determine the criterion weights. The reason for this preference is the creation of a data set based on data collected from secondary data sources, namely international organizations. The CRITIC technique allows the criterion weights to be determined at this point. It was decided to apply the ROV technique in the performance rankings of the alternatives. The reason for this is the performance value ranking of the countries. Considering the order of values, this technique was preferred. In addition, as a result of the application of these techniques, European countries can observe their performance compared to other countries by obtaining the railway performance evaluation ranking.

3. Methodology

In this part, the methodology of the research is given. Previously, information is given about the criteria used in the research and the sample area. Then, the techniques used in the research are explained. The application for determining the performance rankings of European countries is discussed in the next part.

3.1. Criteria and sampling

Rail transport performance can be considered both at the country level and at the national level. Efficiency analyzes are carried out with the criteria of railway transportation performance at the national level ([21]). In this study, performance comparisons between countries are discussed. In this context, the rail transport performances of European countries were determined by considering 16 criteria. These criteria are *Length of tracks* (C1), *Electrified railway tracks* (C2), *Non-electrified railway tracks* (C3), *Length of lines* (C4), *Locomotives* (C5), *Wagons* (C6), *Railway enterprises* (C7), *Goods trains train movements* (C8), *Passenger trains train movements* (C9), *Rail accidents victims* (C10), *Rail accidents* (C11), *Accidents involving transport of dangerous goods* (C12), *Passengers transported* (C13), *Goods transported* (C14), *Transported of dangerous goods* (C15), and *Volume of containers transported* (C16).

A railway track consists of the rails, fasteners, ties, ballast, and underlying subgrade. The length of the railway track that the countries have shown the level of preparation for railway transportation as infrastructure. Countries with a high railway track length are in a more advantageous position in terms of railway transportation. For this reason, the “Length of tracks” criterion is among the benefit criteria. Developing technologies have triggered the development of systems based on electricity and signal systems in rail transportation. Electrical systems, which provide great advantages in energy consumption and are environmentally friendly, are more reliable. The lengths of the electrified railway tracks of the countries indicate the modernized railway infrastructure. At this point, “Electrified railway tracks” has been determined as the second criterion. Non-electrified railway tracks infrastructure allows the use of diesel-powered trains and hydrogen fuel cells trains. Hydrogen fuel cells trains consume more environmentally friendly fuel than Diesel-powered trains. But it does not provide economic advantage. Currently, most of the country's railway infrastructures are non-electrified railway tracks. “The length of non-electrified railway tracks” is considered as one of the basic criteria for the railway transport

performance. Rail lines are railway routes for train transport service. “The length of the rail lines” is another criterion that expresses the railway transportation capacity of the countries. Length of lines supports countries to be more successful in terms of railway infrastructure performance. In the literature, there are studies that accept rail and line lengths as criteria ([22]). For this reason, it has been accepted among the research criteria.

“Locomotives” demonstrate the power of rail transport. The locomotive power and numbers of the countries show the railway performance. In this study, the existing numbers of locomotives were evaluated as criteria, regardless of their power. Likewise, “Wagons” also refer to railway carrying capacity. Considering the linear relationship between the number of wagons and the rail transport service, the number of wagons is among the benefit criteria. The development of the rail transport sector depends on entrepreneurial initiatives. The number of “railway enterprises” owned by the countries explains the size of the investments. For this reason, Railway enterprises have been accepted as a benefit criterion.

The mobility of goods trains and passenger trains explains the vitality of rail transport. Goods trains train movements of countries show national and international shipments of goods. It also indicates the preference of rail transport for shipments of goods. For this reason, “goods trains train movements” are among the railway performance criteria. In the same way, passenger trains train movements of countries are among the factors that affect people's turn to railway transportation among transportation modes. In our research, passenger trains train movements were accepted as the benefit criterion. In addition, “Passengers transported”, “Goods transported”, “Transport of dangerous goods” and “Volume of containers transported” amounts also reflect the preference level of rail transport. The level of preference also affects rail transport performance. In addition, the amount of railway passengers is accepted as the key performance criteria ([23]). For this reason, these criteria are among the research criteria.

RTP success depends on the level of infrastructure, equipment, goods, and people mobility, as well as the low level of accidents and incidents. The low number of accidents and incidents in railway transport makes railway transport more reliable. As a natural consequence of this, transportation performance also increases. There are three main criteria that reflect the railway safety performance of countries. These are “Rail accidents”, “Rail accidents victims” and “Accidents involving transport of dangerous goods”. Especially risk factors such as radiation accidents and hazardous chemical leakage are among the risk factors in dangerous goods transportation ([24]). These criteria have been accepted as cost criteria, that is, criteria that reduce performance.

The European Union provides data on economic, political, industrial, and similar performance indicators of the European Union and candidate countries through Eurostat. The data of the 2020 railway transport performance criteria are also published by Eurostat in this context. The dataset of this research was prepared by using railway transport data of twenty-three European countries published by Eurostat ([25]). The criteria and information about the sample area are presented in the Table 1.

Table 1. Criteria and sampling

| Criteria | Units | Benefit/Cost | Countries |
|------------------------------------|--------|--------------|--------------------------|
| C1- Length of tracks | km | Benefit | Bulgaria (BG), Czechia |
| C2- Electrified railway tracks | km | Benefit | (CZ), Germany (DE), |
| C3- Non-electrified railway tracks | km | Benefit | Estonia (EE), Greece |
| C4- Length of lines | km | Benefit | (GR), Spain (ES), |
| C5- Locomotives | number | Benefit | France (FR), Croatia |
| C6- Wagons | number | Benefit | (HR), Italy (IT), Latvia |
| C7- Railway enterprises | number | Benefit | (LV), Lithuania (LT), |

| | | | |
|---|----------------|---------|------------------------|
| C8- Goods trains Train movements | Thousand-km | Benefit | Luxembourg (LU), |
| C9- Passenger trains Train movements | Thousand-km | Benefit | Hungary (HU), Poland |
| C10- Rail accidents victims | number | Cost | (PL), Portugal (PT), |
| C11- Rail accidents | number | Cost | Romania (RO), Slovenia |
| C12- Accidents involving transport of dangerous goods | number | Cost | (SI), Slovakia (SK), |
| C13- Passengers transported | Thousand | Benefit | Finland (FI), Sweden |
| C14- Goods transported | Thousand tones | Benefit | (SE), Montenegro (ME), |
| C15- Transport of dangerous goods | Thousand tones | Benefit | North Macedonia (MK), |
| C16- Volume of containers transported | TEU | Benefit | Turkey (TR) |

3.2. Criteria importance through intercriteria correlation technique (CRITIC)

It is a method developed by Diakoulaki et al. [26] to determine criterion weights in multi-criteria decision making (MCDM) methods. In this method, it is aimed to calculate the weights of the criteria with the correlation between the criteria. The most important reason for preferring this method can be seen as avoiding subjectivity. Three basic steps are applied in this technique ([26], [27], [28], [29]). These steps are as follows:

Step 1-1: *Creating the decision matrix*: The decision matrix consisting of m alternatives and n criteria is shown in Equation 1.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

x_{ij} presents the performance value of i^{th} alternative on j^{th} criterion. x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)

Step 1-2: *Normalizing the decision matrix*: The decision matrix is normalized using Equation 2. for the benefit criterion and Equation 3. for the cost criterion.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}, i = 1, 2, \dots, m \text{ and } j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$x_{ij}^* = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}, i = 1, 2, \dots, m \text{ and } j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Step 1-3: *Determining the importance weights of the criteria*: Here, C_j represents the amount of information contained in the j^{th} criterion and is calculated by Equation 4. The importance weights of the criteria are calculated by Equation 5.

$$C_j = \sigma_j \sum_{j'=1}^n (1 - r_{jj'}) \quad (4)$$

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (5)$$

σ_j represents the standard deviation (Standard deviation describes dispersion of a set of values,

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n-1}}$$

) of the j^{th} criterion in the normalized decision matrix obtained by Eq. 2 and Eq. 3, and $r_{jj'}$ represents the correlation coefficient of the two criteria (Correlation coefficient describes the statistical relationship between two variables, $r_{jj'} = \frac{\sum(x_j x_{j'}) - (\sum x_j)(\sum x_{j'})/n}{\sqrt{(\sum x_j^2 - (\sum x_j)^2/n)(\sum x_{j'}^2 - (\sum x_{j'})^2/n)}}$).

3.3. Range of value technique (ROV)

The ROV method is a MCDM method performed in three simple steps ([30]). The ranking of the alternatives is made by obtaining the best and worst utility values for each alternative ([31], [32]). Three basic steps are applied in this technique ([30], [33]). These steps are as follows:

Step 2-1: *Creating the decision matrix*: The decision matrix is formed by Equation 1.

Step 2-2: *Normalizing the Decision Matrix*: The normalized decision matrix is formed by Equation 2. and Equation 3.

Step 2-3: *Calculating u_i^+ , u_i^- and u_i values and determining the best alternative*: Equation 6. calculates the best utility function and Equation 7. calculates the worst utility function. The utility functions for the best utility function and the cost functions for the worst utility functions are considered. Alternative ranking is made according to the total score values u_i calculated by Equation 8.

$$u_i^+ = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} w_j \quad (6)$$

$$u_i^- = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} w_j \quad (7)$$

$$u_i = \frac{u_i^+ + u_i^-}{2} \quad (8)$$

All the steps of the CRITIC and ROV techniques described above are applied in the next part. As a result of the application, the railway performance rankings of the European countries will be obtained.

4. Application of Railway Transport Performance of European Countries

In this application, railway transport performances of European countries were calculated by considering the performance criteria. To determine the performances of European countries, 23 alternatives (m) and 16 criteria (n) were determined. In the application, the weights of the criteria were calculated with the CRITIC technique. Then, the alternatives were listed with the ROV technique. The application was carried out with the steps presented in the methodology section.

Step 1-1: *Creating the decision matrix*: The data from Eurostat has been transformed into a decision matrix with Equation 1. The decision matrix is shown in Table 2.

Table 2. The decision matrix

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |
|----|--------|-------|-------|-------|---------|--------|-------|---------|
| BG | 5464 | 3729 | 1735 | 4029 | 458 | 9907 | 12 | 8432 |
| CZ | 15360 | 6917 | 8443 | 9542 | 1999 | 30219 | 67 | 29525 |
| DE | 67400 | 42333 | 25067 | 38394 | 4571 | 103991 | 400 | 259799 |
| EE | 2143 | 138 | 2005 | 1167 | 188 | 22852 | 8 | 1247 |
| GR | 3039 | 1355 | 1684 | 2345 | 72 | 715 | 4 | 7500 |
| ES | 22274 | 16528 | 5746 | 16135 | 464 | 13458 | 18 | 22067 |
| FR | 53382 | 38269 | 15113 | 26838 | 3225 | 68099 | 64 | 53940 |
| HR | 3950 | 1635 | 2315 | 2617 | 306 | 5197 | 12 | 5786 |
| IT | 24515 | 19720 | 4794 | 16782 | 2490 | 25665 | 50 | 47239 |
| LV | 2216 | 502 | 1714 | 1859 | 201 | 6107 | 11 | 4795 |
| LT | 2346 | 318 | 2029 | 1911 | 214 | 7514 | 4 | 9535 |
| LU | 628 | 596 | 32 | 271 | 75 | 3154 | 2 | 399 |
| HU | 11393 | 5560 | 5833 | 7787 | 1154 | 8640 | 80 | 15612 |
| PL | 37269 | 25145 | 12124 | 19383 | 3671 | 83011 | 91 | 65351 |
| PT | 3224 | 2394 | 831 | 2526 | 132 | 2719 | 5 | 5874 |
| RO | 20071 | 8528 | 11543 | 10769 | 2205 | 39573 | 0 | 20269 |
| SI | 2178 | 1465 | 713 | 1209 | 150 | 2762 | 1 | 8340 |
| SK | 3631 | 1586 | 2045 | 3627 | 901 | 12967 | 24 | 12075 |
| FI | 8599 | 5180 | 3419 | 5918 | 390 | 8763 | 6 | 13921 |
| SE | 15557 | 12166 | 3391 | 10909 | 620 | 20000 | 27 | 35051 |
| ME | 328 | 303 | 25 | 250 | 30 | 561 | 3 | 288 |
| MK | 907 | 327 | 580 | 683 | 43 | 1238 | 2 | 561 |
| TR | 12472 | 5753 | 6719 | 10378 | 690 | 21210 | 4 | 25263 |
| | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 |
| BG | 19702 | 22 | 33 | 1 | 16808 | 16374 | 4118 | 79814 |
| CZ | 137515 | 34 | 90 | 0 | 129308 | 90902 | 12839 | 1679221 |
| DE | 790000 | 137 | 294 | 6 | 1752198 | 325303 | 72862 | 7087674 |
| EE | 5329 | 2 | 5 | 0 | 5984 | 15801 | 10390 | 44957 |
| GR | 7403 | 2 | 9 | 0 | 10220 | 1328 | 67 | 164492 |
| ES | 136103 | 13 | 51 | 7 | 333397 | 22254 | 2109 | 616793 |
| FR | 375000 | 44 | 104 | 14 | 723852 | 83143 | 13974 | 4000000 |
| HR | 12781 | 10 | 22 | 0 | 13100 | 14992 | 1399 | 162740 |
| IT | 272268 | 43 | 89 | 0 | 389883 | 90529 | 6359 | 3092077 |
| LV | 5921 | 6 | 9 | 0 | 12862 | 24056 | 8276 | 65345 |
| LT | 6067 | 6 | 9 | 0 | 3238 | 53430 | 9078 | 149779 |
| LU | 7530 | 0 | 1 | 0 | 14527 | 3627 | 407 | 69384 |
| HU | 83620 | 31 | 98 | 0 | 146010 | 51892 | 8166 | 293051 |
| PL | 156834 | 148 | 179 | 1 | 295394 | 218381 | 28682 | 2349161 |
| PT | 27474 | 27 | 43 | 0 | 102247 | 8426 | 469 | 421691 |
| RO | 57377 | 79 | 102 | 0 | 50559 | 49670 | 6171 | 296830 |
| SI | 7611 | 2 | 5 | 0 | 7924 | 19398 | 1714 | 519643 |
| SK | 34099 | 27 | 52 | 0 | 49421 | 41572 | 5080 | 579307 |
| FI | 33804 | 4 | 12 | 3 | 59550 | 38406 | 4211 | 54004 |
| SE | 116302 | 4 | 31 | 1 | 169163 | 69805 | 3536 | 703568 |
| ME | 806 | 5 | 43 | 0 | 473 | 1154 | 119 | 4400 |
| MK | 885 | 6 | 97 | 0 | 253 | 1765 | 111 | 2 |
| TR | 13327 | 32 | 66 | 7 | 99470 | 34374 | 2810 | 1140980 |

Step 1-2: *Normalizing the decision matrix*: The decision matrix is normalized with Equation 2. and Equation 3. The normalized decision matrix is shown in Table 3.

Table 3. The normalized decision matrix

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| BG | 0,08 | 0,09 | 0,07 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,03 | 0,03 |
| CZ | 0,22 | 0,16 | 0,34 | 0,24 | 0,43 | 0,29 | 0,17 | 0,11 |
| DE | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| EE | 0,03 | 0,00 | 0,08 | 0,02 | 0,03 | 0,22 | 0,02 | 0,00 |
| GR | 0,04 | 0,03 | 0,07 | 0,05 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,03 |
| ES | 0,33 | 0,39 | 0,23 | 0,42 | 0,10 | 0,12 | 0,05 | 0,08 |
| FR | 0,79 | 0,90 | 0,60 | 0,70 | 0,70 | 0,65 | 0,16 | 0,21 |
| HR | 0,05 | 0,04 | 0,09 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,02 |
| IT | 0,36 | 0,46 | 0,19 | 0,43 | 0,54 | 0,24 | 0,13 | 0,18 |
| LV | 0,03 | 0,01 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,03 | 0,02 |
| LT | 0,03 | 0,00 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,01 | 0,04 |
| LU | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,00 |
| HU | 0,16 | 0,13 | 0,23 | 0,20 | 0,25 | 0,08 | 0,20 | 0,06 |
| PL | 0,55 | 0,59 | 0,48 | 0,50 | 0,80 | 0,80 | 0,23 | 0,25 |
| PT | 0,04 | 0,05 | 0,03 | 0,06 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| RO | 0,29 | 0,20 | 0,46 | 0,28 | 0,48 | 0,38 | 0,00 | 0,08 |
| SI | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,03 |
| SK | 0,05 | 0,03 | 0,08 | 0,09 | 0,19 | 0,12 | 0,06 | 0,05 |
| FI | 0,12 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,08 | 0,08 | 0,02 | 0,05 |
| SE | 0,23 | 0,29 | 0,13 | 0,28 | 0,13 | 0,19 | 0,07 | 0,13 |
| ME | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| MK | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| TR | 0,18 | 0,13 | 0,27 | 0,27 | 0,15 | 0,20 | 0,01 | 0,10 |
| | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 |
| BG | 0,02 | 0,85 | 0,89 | 0,93 | 0,01 | 0,05 | 0,06 | 0,01 |
| CZ | 0,17 | 0,77 | 0,70 | 1,00 | 0,07 | 0,28 | 0,18 | 0,24 |
| DE | 1,00 | 0,07 | 0,00 | 0,57 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| EE | 0,01 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 0,00 | 0,05 | 0,14 | 0,01 |
| GR | 0,01 | 0,99 | 0,97 | 1,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| ES | 0,17 | 0,91 | 0,83 | 0,50 | 0,19 | 0,07 | 0,03 | 0,09 |
| FR | 0,47 | 0,70 | 0,65 | 0,00 | 0,41 | 0,25 | 0,19 | 0,56 |
| HR | 0,02 | 0,93 | 0,93 | 1,00 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| IT | 0,34 | 0,71 | 0,70 | 1,00 | 0,22 | 0,28 | 0,09 | 0,44 |
| LV | 0,01 | 0,96 | 0,97 | 1,00 | 0,01 | 0,07 | 0,11 | 0,01 |
| LT | 0,01 | 0,96 | 0,97 | 1,00 | 0,00 | 0,16 | 0,12 | 0,02 |
| LU | 0,01 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| HU | 0,10 | 0,79 | 0,67 | 1,00 | 0,08 | 0,16 | 0,11 | 0,04 |
| PL | 0,20 | 0,00 | 0,39 | 0,93 | 0,17 | 0,67 | 0,39 | 0,33 |
| PT | 0,03 | 0,82 | 0,86 | 1,00 | 0,06 | 0,02 | 0,01 | 0,06 |
| RO | 0,07 | 0,47 | 0,66 | 1,00 | 0,03 | 0,15 | 0,08 | 0,04 |
| SI | 0,01 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 0,00 | 0,06 | 0,02 | 0,07 |
| SK | 0,04 | 0,82 | 0,83 | 1,00 | 0,03 | 0,12 | 0,07 | 0,08 |
| FI | 0,04 | 0,97 | 0,96 | 0,79 | 0,03 | 0,11 | 0,06 | 0,01 |
| SE | 0,15 | 0,97 | 0,90 | 0,93 | 0,10 | 0,21 | 0,05 | 0,10 |
| ME | 0,00 | 0,97 | 0,86 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| MK | 0,00 | 0,96 | 0,67 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| TR | 0,02 | 0,78 | 0,78 | 0,50 | 0,06 | 0,10 | 0,04 | 0,16 |

Step 1-3: *Determining the importance weights of the criteria:* Equation 4. and Equation 5. determined the weights of the criteria. The criteria weights are presented in Table 4.

Table 4. The criteria weight

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| w_j | 0,0446 | 0,0506 | 0,0415 | 0,0431 | 0,0523 | 0,0473 | 0,0361 | 0,0342 |
| | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 |

| | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| w_j | 0,0365 | 0,1723 | 0,1507 | 0,1387 | 0,0360 | 0,0400 | 0,0367 | 0,0394 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|

Step 2-1: *Creating the decision matrix*: The data from Eurostat has been transformed into a decision matrix with Equation 1. The decision matrix is shown in Table 2.

| Criteria | Units | Benefit/Cost | Countries |
|---|----------------|--------------|--------------------------|
| C1- Length of tracks | km | Benefit | Bulgaria (BG), Czechia |
| C2- Electrified railway tracks | km | Benefit | (CZ), Germany (DE), |
| C3- Non-electrified railway tracks | km | Benefit | Estonia (EE), Greece |
| C4- Length of lines | km | Benefit | (GR), Spain (ES), |
| C5- Locomotives | number | Benefit | France (FR), Croatia |
| C6- Wagons | number | Benefit | (HR), Italy (IT), Latvia |
| C7- Railway enterprises | number | Benefit | (LV), Lithuania (LT), |
| C8- Goods trains Train movements | Thousand-km | Benefit | Luxembourg (LU), |
| C9- Passenger trains Train movements | Thousand-km | Benefit | Hungary (HU), Poland |
| C10- Rail accidents victims | number | Cost | (PL), Portugal (PT), |
| C11- Rail accidents | number | Cost | Romania (RO), Slovenia |
| C12- Accidents involving transport of dangerous goods | number | Cost | (SI), Slovakia (SK), |
| C13- Passengers transported | Thousand | Benefit | Finland (FI), Sweden |
| C14- Goods transported | Thousand tones | Benefit | (SE), Montenegro (ME), |
| C15- Transport of dangerous goods | Thousand tones | Benefit | North Macedonia (MK), |
| C16- Volume of containers transported | TEU | Benefit | Turkey (TR) |

Step 2-2: *Normalizing the Decision Matrix*: The decision matrix is normalized with Equation 2 and Equation 3. The normalized decision matrix is shown in Table 3.

Step 2-3: *Calculating u_i^+ , u_i^- and u_i values and determining the best alternative*: Using Equation 6, Equation 7, and Equation 8, u_i^+ , u_i^- and u_i were calculated. Table 5. shows the u_i^+ , u_i^- and u_i values and the rankings of the alternatives.

Table 5. The u_i^+ , u_i^- and u_i values and the rankings of the alternatives

| Countries | u_i^+ | u_i^- | u_i | Rank |
|-----------------|---------|---------|--------|------|
| Bulgaria | 0,0318 | 0,4097 | 0,2207 | 18 |
| Czechia | 0,1245 | 0,3763 | 0,2504 | 5 |
| Germany | 0,5383 | 0,0920 | 0,3152 | 1 |
| Estonia | 0,0260 | 0,4573 | 0,2416 | 6 |
| Greece | 0,0117 | 0,4553 | 0,2335 | 10 |
| Spain | 0,0972 | 0,3515 | 0,2244 | 15 |
| France | 0,2881 | 0,2188 | 0,2535 | 4 |
| Croatia | 0,0219 | 0,4392 | 0,2306 | 13 |
| Italy | 0,1686 | 0,3664 | 0,2675 | 2 |
| Latvia | 0,0202 | 0,4506 | 0,2354 | 9 |
| Lithuania | 0,0258 | 0,4506 | 0,2382 | 7 |
| Luxembourg | 0,0041 | 0,4617 | 0,2329 | 11 |
| Hungary | 0,0767 | 0,3757 | 0,2262 | 14 |
| Poland | 0,2602 | 0,1879 | 0,2241 | 16 |
| Portugal | 0,0187 | 0,4087 | 0,2137 | 21 |
| Romania | 0,1140 | 0,3178 | 0,2159 | 20 |
| Slovenia | 0,0150 | 0,4573 | 0,2362 | 8 |
| Slovakia | 0,0438 | 0,4040 | 0,2239 | 17 |
| Finland | 0,0435 | 0,4217 | 0,2326 | 12 |
| Sweden | 0,0878 | 0,4317 | 0,2598 | 3 |
| Montenegro | 0,0005 | 0,4343 | 0,2174 | 19 |
| North Macedonia | 0,0028 | 0,4053 | 0,2041 | 22 |
| Turkey | 0,0725 | 0,3217 | 0,1971 | 23 |

By applying both CRITIC and ROV techniques above, findings regarding criterion weights and alternative rankings were obtained. The conclusions and implications for these findings are presented in the next part.

5. Results and Conclusion

Despite the high infrastructure installation costs of railway transportation, it provides advantages in transporting heavy and bulky loads at low cost in transportation services. In addition to the transportation of passengers and goods in railway transportation, it is also used effectively in the transportation of dangerous goods. At the macro level, railway transport is preferred as an alternative mode of transport by directly contributing to the logistics activities of countries. In this research, the railway transportation performances of European countries in 2020 were determined. In this context, 16 performance-determining criteria were determined. CRITIC technique was applied to determine the weights of the criteria. The criterion with the highest level of importance is *Rail accidents victims* (17.23%). The least important criterion is *goods trains train movements* (3.42%). Weights of other criteria are *rail accidents* (15.07%), *accidents involving transport of dangerous goods* (13.87%), *locomotives* (5.23%), *electrified railway tracks* (5.06%), *wagons* (4.73%), *length of tracks* (4.46%), *length of lines* (4.31%), *non-electrified railway tracks* (4.15%), *goods transported* (4.00%), *volume of containers transported* (3.94%), *transport of dangerous goods* (3.67%), *passenger trains are train movements* (3.65%), *railway enterprises* (3.61%), *passengers transported* (3.60%).

According to the criteria weights, the most important criterion contributing to the railway performance of European countries is the number of people and goods damaged in railway accidents. This criterion is a cost-based criterion. The target point to be reached in rail transport performance is to realize zero accident and loss. Victims in accidents reduce rail transport performance. The second important criterion is Rail accidents. Safe and secure transportation of passengers and goods indicates the superior success of rail transport services. The third important criterion is the accidents that occur during the transportation of dangerous goods. This criterion is a cost-based criterion. In other words, the fact that trains carrying dangerous goods have an accident and adversely affect the environment reduces the performance of the railway. Considering the damage caused by dangerous substances to people and the environment, it provides a high effect compared to other criteria. Other criteria are benefit-based criteria. It is also seen that the criterion weights are very close to each other.

Railway transportation performances of European countries were determined by ROV technique. The country with the highest rail transport performance was determined as Germany ($u_i=0.3152$). In particular, the low rate of "Rail accidents victims, rail accidents, accidents involving transport of dangerous goods", which are cost criteria, makes a great contribution to Germany's ranking in the first place in railway transportation performance. In addition, it is seen that Germany is superior to other countries in terms of benefit criteria. Italy ($u_i=0.2675$) ranks second in rail transport performance. Italy is superior to other countries in terms of railway infrastructure, number of equipment and transport volumes. Considering the number of accidents and incidents in railway transportation, the number is higher than in other countries. However, it is understood that accidents and incidents are low when compared to total transport volumes. Sweden ($u_i=0.2598$) is third in the rail transport performance ranking. France ($u_i=0.2535$) is fourth and Czechia ($u_i=0.2504$) is fifth. When comparing the rail transport performances of Sweden, France, and Czechia, it is observed that there are very few differences. The three countries with the lowest performance rankings are Portugal ($u_i=0.2137$), North Macedonia ($u_i=0.2041$) and Turkey ($u_i=0.1971$).

The recommendations for European countries to improve their rail transport performance are as follows. (i) A culture of safety needs to be established to minimize train accidents. (ii) Legal procedures should be strictly applied to prevent trains carrying dangerous goods. (iii) Investment should be made in railway infrastructure projects. (iv) Railway equipment should be modernized, and maintenance plans should be made correctly, and the plans should be strictly followed. (v) Passenger and goods train movements should be determined according to need. (vi) Railway transport initiatives should be supported by governments. (vii) Strategic level programs should be established by developing a safety-based national rail transport vision. Suggestions for researchers are as follows. (i) The results obtained by determining the railway performance criteria with different MCDM techniques can be compared with these research findings. (ii) Railway transport performances of countries in different regions can be applied with the same methodology. (iii) A worldwide rail transport index could be developed. (iv) Comparisons between years can be made by making European railway performance rankings based on different years. In fact, with the panel data set and data envelopment analysis, it is possible to research the change trends over the years. The limitations of the research are as follows. (i) The findings were determined according to 16 performance criteria. (ii) The sample area was determined as 23 European countries. (iii) Safety-based criteria are accepted as cost criteria and other criteria as benefit criteria.

References

- [1] M. Song, G. Zhang, W. Zeng, J. Liu, and K. Fang, "Railway transportation and environmental efficiency in China", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 48, pp. 488-498, 2016, doi: 10.1016/j.trd.2015.07.003
- [2] O. P. Hilmola, "European railway freight transportation and adaptation to demand decline: Efficiency and partial productivity analysis from period of 1980-2003", *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 56, no. 3, pp. 205-225, 2007, doi: 10.1108/17410400710731428
- [3] Y. K. Al-Douri, P. Tretten, and R. Karim, "Improvement of railway performance: a study of Swedish railway infrastructure", *Journal of Modern Transportation*, vol. 24, no. 1, pp. 22-37, 2016, doi: 10.1007/s40534-015-0092-0
- [4] A. Ait Ali, & J. Eliasson, "European railway deregulation: an overview of market organization and capacity allocation", *Transportmetrica A: Transport Science*, vol. 18, no. 3, pp. 594-618, 2022, doi: 10.1080/23249935.2021.1885521
- [5] H. Zeybek, "Uluslararası Ticarete Demiryolunun Lojistik Performansa Etkisi", *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 9, pp. 79-90, 2019.
- [6] K.Yildiz, & M. T. Ahi, "Demiryolu Lojistiğinde Tedarik Zinciri Performans Metrikleri", *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 11, pp. 14-25, 2020.
- [7] C. Stenström, A. Parida, and D. Galar, "Performance indicators of railway infrastructure" *The international Journal of railway technology*, vol. 1, no. 3, pp. 1-18, 2012, doi: 10.4203/ijrt.1.3.1
- [8] N. G. Harris, C. S. Mjøsund, and H. Haugland, "Improving railway performance in Norway", *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 3, no. 4, pp. 172-180, 2013, doi: 10.1016/j.jrtpm.2014.02.002
- [9] M. Kyriakidis, A. Majumdar, and W. Y. Ochieng, "Data based framework to identify the most significant performance shaping factors in railway operations", *Safety science*, vol. 78, pp. 60-76, 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2015.04.010
- [10] S. Duranton, A. Audier, J. Hazan, M. P. Langhorn, and V. Gauche, "The 2012 European railway performance index", *The Boston Consulting Group*, 17, 2017.
- [11] M. Kyriakidis, A. Majumdar, and W. Y. Ochieng, "The human performance railway operational index—a novel approach to assess human performance for railway operations", *Reliability engineering & system safety*, vol. 170, pp. 226-243, 2018, doi: 10.1016/j.ress.2017.10.012

- [12] T. Åhrén, and A. Parida “Maintenance performance indicators (MPI) for benchmarking the railway infrastructure: a case study”, *Benchmarking: An International Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 247-258, 2009, doi: 10.1108/14635770910948240
- [13] Z. Yang, F. Schmid, and C. Roberts, “Assessment of railway performance by monitoring land subsidence”, In *6th IET conference on railway condition monitoring (RCM 2014)* (pp. 1-6). IET, September 2014.
- [14] R. Ranjan, P. Chatterjee, and S. Chakraborty, “Performance evaluation of Indian Railway zones using DEMATEL and VIKOR methods”, *Benchmarking An International Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 78, 2016, doi: 10.1108/BIJ-09-2014-0088
- [15] N. Bhanot, H. Singh, and R. S. Bhatti, “Benchmarking of Indian rail freight by DEA. In *Encyclopedia of Business Analytics and Optimization* (pp. 273-291)”, IGI Global, 2014.
- [16] N. Tahir, “Efficiency analysis of Pakistan railway in comparison with China and India”, *International Journal of Transport Economics*, vol. 40, no. 1, pp. 71-98, 2013.
- [17] T. Jitsuzumi, and A. Nakamura, “Causes of inefficiency in Japanese railways: Application of DEA for managers and policymakers”, *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 44, no. 3, pp. 161-173, 2010, doi: 10.1016/j.seps.2009.12.002
- [18] M. M. Yu, and E. T. Lin, “Efficiency and effectiveness in railway performance using a multi-activity network DEA model”, *Omega*, vol. 36, no. 6, pp. 1005-1017, 2008, doi: 10.1016/j.omega.2007.06.003
- [19] S. Stoilova, N. Munier, M. Kendra, & T. Skrucány, “Multi-criteria evaluation of railway network performance in countries of the TEN-T orient–east med corridor”, *Sustainability*, vol. 12, no. 4, pp. 1482, 2020, doi: 10.3390/su12041482
- [20] V. Sangiorgio, A. M. Mangini, and I. Precchiazzi, “A new index to evaluate the safety performance level of railway transportation systems”, *Safety science*, vol. 131, no. 104921, 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104921
- [21] M. G. Sharma, R. M. Debnath, R. Oloruntoba, & S. M. Sharma, “Benchmarking of rail transport service performance through DEA for Indian railways”, *International Journal of Logistics Management*, vol. 27, no. 3, pp. 629-649, 2006, doi: 10.1108/IJLM-08-2014-0122
- [22] I. Iyigun, “Evaluation of efficiency of rail transportation of black sea countries by using an integrated MCDM approach”, *Economy & Business Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 305-323, 2009.
- [23] A. Fraszczyk, T. Lamb, & M. Marinov, “Are railways really that bad? An evaluation of rail systems performance in Europe with a focus on passenger rail”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 94, pp. 573-591, 2016, doi: 10.1016/j.tra.2016.10.018
- [24] V. Simić, R. Soušek, Soušek, & S. Jovčić, “Picture Fuzzy MCDM Approach for Risk Assessment of Railway Infrastructure. *Mathematics*, vol. 8, no. 12, pp. 1-29, 2020
- [25] Eurostat, “Database”, Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [access date: 22.08.2022].
- [26] D. Diakoulaki, G. Mavrotas, and L. Papayannakis, “Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method”, *Computers & Operations Research*, vol. 22, no. 7, pp. 763-770, 1995.
- [27] M. Keshavarz Ghorabae, M. Amiri, E. Kazimieras Zavadskas, and J. Antuchevičienė, “Assessment of third-party logistics providers using a CRITIC–WASPAS approach with interval type-2 fuzzy sets”, *Transport*, vol. 32, no. 1, pp. 66-78, 2017 doi: 10.3846/16484142.2017.1282381
- [28] Ö. Akçakanat, E. Aksoy, and T. Teker, “CRITIC ve MDL Temelli EDAS yöntemi ile Tr-61 bölgesi bankalarının performans değerlendirilmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 1, no. 32, pp. 1-24, 2018.
- [29] M. Demircioğlu, and İ. T. Coşkun, “CRITIC-MOOSRA yöntemi ve UPS seçimi üzerine bir uygulama”, *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 27, no. 1, pp. 183-195, 2018.
- [30] D. S. Yakowitz, L. J. Lane, and F. Szidarovszky, “Multi-attribute decision making: dominance with respect to an importance order of the attributes”, *Applied Mathematics and Computation*, vol. 54, no. 2-3, pp. 167-181, 1993.

- [31]E. Çınaroğlu, “CRITIC Temelli CODAS ve ROV yöntemleri ile ab ülkeleri yaşam kalitesi analizi”, *Bingöl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 5, no. 1, pp. 337-364, 2021, doi: 10.33399/biibfad.868418
- [32]A. Mitra, “Grading of raw jute fibres using criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) and range of value (ROV) approach of multi-criteria decision making”, *Journal of Natural Fibers*, pp. 1-17, 2021, doi: 10.1080/15440478.2021.1951422
- [33]M. E. Mkhalef, S. Aziz, and R. Saidi “The application of Entropy-ROV methods to formulate global performance for selecting the automotive suppliers in Morocco”, *Journal of theoretical and applied information technology*, vol. 96, no. 16, pp. 5522-5536, 2018.

Resume



Karahan KARA

He was born on August 1, 1987, in Artvin. He graduated from Kara Harp Okulu, Department of Electrical and Electronics Engineering. He completed his master's at Okan University Department of Logistics Management and doctorate studies at Çanakkale Onsekiz Mart University, Department of Business Management. He works as an assistant professor in Artvin Çoruh University, Vocational School of Hopa, logistics Program and continues his academic studies in the same field.

E-Mail: karahan.kara@artvin.edu.tr



Galip Cihan YALÇIN

He was born on October 16, 1987, in Ankara. He graduated from Kara Harp Okulu, Department of Electrical and Electronics Engineering. He completed his master's at Kırıkkale University Department of Logistics Management. He continues doctorate studies at Kırıkkale University, Department of Mathematics. He works as an officer in Turkish Armed Forces and continues his academic studies in the same field.

E-Mail: pgcy2014@gmail.com

Ethics Statement:

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

Contribution of authors: Karahan KARA: Conceptualization, Literature review, Methodology, Writing- Reviewing and Editing. Galip Cihan YALÇIN Conceptualization, Literature review, Methodology, Analysis.



Investigation of Tribological Properties of Head, Web and Foot Sections of R260 Rail

Fatih BOZKURT 

Eskişehir Technical University, Vocational School of Transportation, Eskişehir, Turkey

fatihbozkurt@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 23.08.2022, Kabul/Accepted: 08.11.2022, Yayınlanma/Published: 31.01.2023)

Abstract: It is important to know tribological properties of rail and wheel for predicting the service life of both components. In railway, the tribological system is open and the harsh working condition can be seen as the contact stress between rail and wheel is extremely high. The behaviour of the tribological system varies depending on the chosen rail-wheel materials and also third body (water, humidity, lubricant, debris and combination of these elements). The coefficient of friction and wear resistance are strongly dominated by chosen material and its properties. Up to now, a number of researchers focused only on the tribological properties of the head of rail material. Recent experimental study has devoted to investigate the tribological properties of head, web and foot sections of R260 rail, as the mechanical properties of rail changes from the head to the foot of rail. Different sections of R260 rail have been evaluated in terms of microstructural, hardness, tribological and wear resistance properties. According to obtained results of the ball-on-disc wear tests, the highest wear resistance belongs the head of R260 rail as expected. The coefficients of friction of the web, head and foot of R260 have been found as 0.39, 0.35 and 0.38, respectively.

Keywords: Rail wear, Tribology, Rail material

R260 Rayının Mantar, Gövde ve Taban Kısımlarının Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması

Öz: Ray ve tekerleğin hizmet ömrünü tahmin etmek için her iki bileşenin tribolojik özelliklerini bilmek önemlidir. Demiryolunda tribolojik sistem açıktır ve ray ile tekerlek arasındaki temas gerilimi son derece yüksek olduğundan zorlu çalışma koşulları görülebilir. Tribolojik sistemin davranışı, seçilen ray-tekerlek malzemelerine ve ayrıca üçüncü cisme (su, nem, yağlayıcı, kalıntı ve bu elemanların kombinasyonu) bağlı olarak değişir. Sürtünme katsayısı ve aşınma direnci, seçilen malzeme ve özellikleri tarafından güçlü bir şekilde kontrol edilir. Bu zamana kadar, bir dizi araştırmacı sadece ray mantar malzemesinin tribolojik özelliklerine odaklanmıştır. Bu deneysel çalışma, rayın mekanik özellikleri rayın mantar kısmından tabanına doğru değiştiği için, R260 rayının mantar, gövde ve taban bölümlerinin tribolojik özelliklerinin araştırmasına adanmıştır. R260 rayının farklı bölümleri mikro yapısal, sertlik, tribolojik ve aşınma direnci özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Disk üzerinde bilye aşınma testlerinden elde edilen sonuçlarına göre, beklendiği gibi en yüksek aşınma direnci R260 rayının mantar kısmına aittir. R260 rayının mantar, gövde ve taban kısımlarının sürtünme katsayıları sırasıyla 0.39, 0.35 ve 0.38 olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Ray aşınması, Triboloji, Ray malzemesi

1. Introduction

The most critical element of the superstructure is rail. It has important roles such as supporting and guiding of wheels, ensuring adhesion force and transmitting longitudinal, horizontal and vertical forces. A contact patch between wheel and rail is very small (approximately 100 mm²) and carries rail vehicles. This contact patch is open system and works under harsh conditions as the normal stresses are very high [1]. Additionally, a rapid temperature increase (normally it is several hundred degrees Celsius but in extreme conditions over 1000 °C) can be seen because of the slip between rail and wheel [2]. Combination of high normal stress and temperature cause inevitable wear not only rail but also wheel. In order to extend the service life of rail and wheel, the tribological system has to be understood well. The behaviour of the tribological system varies

Atıf için/Cite as: 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

depending on the chosen rail-wheel materials and also third body (water, humidity, lubricant, debris and combination of these elements). For a non-lubricated 12 MGT railway line, the annual cost per meter of rail maintenance approximately is US\$ 54. Total cost is more than US \$ 1.5 Million for only 30 km railway line [3].

The friction between wheel and rail is an important parameter and plays a key role in wheel–rail interface. The wear resistance of rail – wheel materials and friction management has been studied extensively by numerous researchers. Bozkurt and Er studied two kind of boron steels as an alternative of R260 rail [4]. The wear tests were performed with twin disc configuration (roller on roller) under dry and wet (water lubricated) conditions. R260 rail steel, AISI 51B60H and 30MnB5 boron steels were tested against disc prepared from ER9 class wheel material (under 5.18% slip ratio, 1.5 GPa contact stress and 200 rpm). They reported that tested both boron steels have exhibited better wear resistance than R260 rail material and showed optimum coefficient of friction values under dry and wet conditions. Ay and Çelik investigated the friction coefficient of rail under different sliding speeds (5, 7.5, 10 and 12 cm/s.) applying 8N load [5]. The specimen is prepared from used rail section. As counterpart WC ball (Ø3 mm) was used. They presented that average coefficient of friction was found to be as 0.38 under dry condition and 0.15 under water lubricated condition. The wear rates of the rails were increased by increasing sliding speeds for both conditions. Çakır and Çelik assessed the wear resistance of rail steel (R350HT) by isothermal bainitic quenching [6]. Wear tests were performed by using ball-on-disc configuration (WC ball Ø3 mm, 10 N load). After completion of wear tests, worn profile was measured and wear resistance was compared. Upper and lower bainite were obtained by isothermal hardening. They expressed that the specimen which had lower bainite structure was the best wear resistant group.

Up to now, there is little published information on the tribological properties of the different sections of the rail material. Recent experimental study has documented the tribological properties of head, web and foot sections of R260 rail, as each region has different mechanical properties due to the production method. Different sections of R260 rail have been considered in terms of microstructural, hardness and tribological properties.

2. Material and Methods of Study

In this study, the samples prepared from virgin rail of R260 rail. The chemical composition of R260 rail is given in Table 1. In order to investigate the tribological properties of different sections of R260 rail, the specimens were cut out from the head, web and foot of the rail with suitable machining procedures. During the machining of the rail, the utmost care has been taken not to change of mechanical and microstructural properties. The dimensions of the prepared samples were 10 mm in diameter and 10 mm in depth. All sample was mounted, and the surfaces of the samples were ground with automatic grinding machine (with 320, 500, 800 and 1000 mesh number). At the final stage, all sample was polished with 3 µm diamond solution. The prepared samples were used for microstructural analysis, hardness tests, and wear tests. In order to reveal the microstructure of R260 rail, the polished samples were etched with a 2% Nital etchant.

Table 1. Chemical composition of R260 rail

| C | Mn | Si | P | S | Cr | Al | V |
|------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 0.72 | 1.054 | 0.27 | 0.014 | 0.031 | 0.04 | 0.001 | 0.001 |

In order to characterize the tribological properties of material, wear test is effective and simple method. In the literature, many test methods are proposed and conducted. The main aim of these methodologies is predicting the wear life of mechanical components or system and estimating the coefficient of friction (COF). In this study, adhesive wear test was chosen for investigating the

tribological properties of R260 rail. The test configuration was ball-on-disc and all test was completed under dry sliding conditions by using CSM tribometer as shown in Figure 1. The counter body was Wolfram Carbide ball ($\varnothing 3$ mm, $E=690$ GPa and hardness=91.2 HRA) whose sphericity and compositions were certified. Before the wear tests, the surface of the samples and WC ball were cleaned by alcohol. All adhesive wear test was performed under 10 N load, 2.5 mm wear radius and 40 m distance and 2.5 cm/s velocity. After the adhesion wear test, the profile of the worn area was measured by Mitutoyo SJ-400 profilometer. The measured profile data was imported to Origin Lab software. Finally, the wear volume was calculated by integrating the area of the wear scar. The specific wear rate (k , mm^3/Nm) of different sections of R260 rail was evaluated and compared considering the Archard equation $k=V/(XL)$ where V is the wear volume (mm^3), X is sliding distance (m) and L is the normal load (N). At least three measurements were performed to specify the specific wear rate.



Figure 1. CSM tribometer (right) and schematic illustration of the ball-on-disc adhesive wear test (left)

Hardness test of rail steel is standardized according to EN 13764-1:2011. In this standard, the locations of rail head specified and evaluated according to Brinell scale. In this study, the hardness of different sections of R260 rail was measured by FM310 microhardness tester. All measurement was evaluated according to ASTM E384 and all results were given in Hardness of Vickers (Hv) scale. All hardness measurement was converted to Brinell scale.

3. Results and Discussion

3.1. Microstructural Results

The microstructures of head, web and foot of R260 rail are captured by using light microscope at 500x magnification and shown in Figure 2. It is visible that all section of R260 rail has pearlitic microstructure. The directions of pearlite formed in different arrangement. The microstructure of pearlite is lamellar mixture of ferrite and cementite phases. The mechanical properties of rail steel (yield strength, tensile strength, hardness and wear resistance) strongly depend on the ferrite-pearlite ratio, thickness and interlamellar distance of cementite phase [7]. A decrease in the interlamellar distance of cementite results with increasing of hardness value. A higher hardness value increases the wear resistance of the rail steel. In this study, the foot of R260 rail has more ferrite phase in comparison to other sections. It is expected to have a lower hardness value and wear resistance.

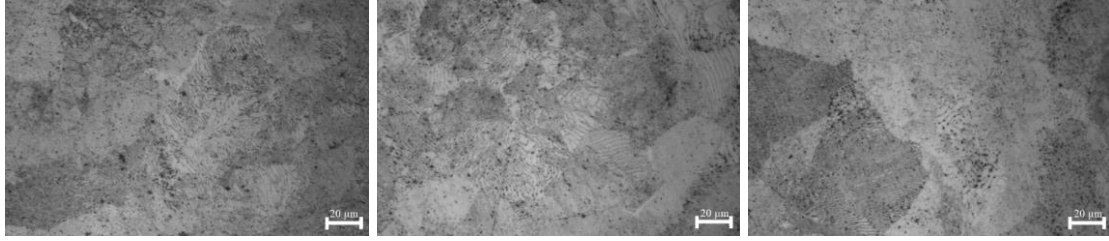


Figure 2. The microstructures of head (left), web (middle) and foot (right) of R260 rail

3.2. Hardness Results

Hardness test method is indication of strength, ductility and wear resistance of materials. Hardness is a measure of resistance to plastic deformation. The rail manufacturing process is complex and needs high technology equipment. The main steps for producing rail are blast furnace, steel making, continuous casting, rolling, straightening and final measurements. In order to increase the wear resistance, the rail is directly taking from rolling mill and transferred to hardening plant at a temperature higher than 800°C. The rail is turned upside down and dipped into the quenching medium resulting to a hardness increase in the entire rail head. After head-hardening process, the cross-sectional hardness distribution of rail should have this characteristic as show in Figure 3 [8]. The hardness of sections of R260 rail was measured at least three times from different locations in Vickers scale as shown in Table 2. The obtained values are converted to Brinell scale and mean values were considered for comparison. In this study, the average hardness value (in Brinell) of head, web and foot of R260 rail were found to be 353 HBW, 316 HBW and 278 HBW, respectively. According to EN 13764-1:2011 standard, the hardness values measured shall meet the requirements. For R260 rail steel grade, hardness value should be at least 260 – 300 HBW from specified locations. The hardness value of head section can be slightly higher 360 HBW as the wear resistance of the rail should be higher. With respect to measured hardness values are full accordance with literatures and between the values specified in the standard. The highest resistance of R260 rail section is expected to be head for adhesive wear test.

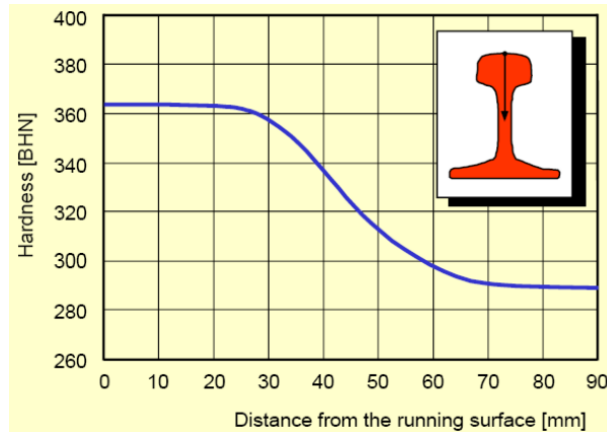


Figure 3. Hardness (in Brinell) distribution in rails as a function of distance from running surface [8]

Table 2. The hardness values of head, web and foot of R260 rail

| Number of measurements | Head | | | Web | | | Foot | | |
|-----------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Hardness in Hv | 372 | 374 | 375 | 334 | 336 | 330 | 290 | 296 | 293 |
| Hardness in Brinell | 352 | 354 | 355 | 317 | 319 | 313 | 275 | 281 | 278 |
| Average hardness in Brinell | 353 | | | 316 | | | 278 | | |

3.3. Tribological Results

Adhesive wear tests were performed by using a WC ball ($\varnothing 3$ mm) against different sections of R260 rail. Before the starting of the adhesive wear test, considering the literature and to obtain a stable coefficient of friction (COF), pre-tests were conducted to specify test parameters. Under real operating condition in railway, the maximum contact stress between rail and wheel varies from 600 MPa to 2700 MPa [1]. During conducting adhesive wear tests, to simulate extreme loading conditions, the normal load was selected as 10 N and the contact stress was generated as 2.903 GPa. The other adhesive wear test parameter specified as; wear radius 2.5 mm, wear distance 40 m and velocity 2.5 cm/s. All test was completed in dry conditions.

COF vs. distance plot of the different sections of R260 rail steel is shown in Figure 3. All COF vs. distance plot has exhibited two regimes: the running-in and steady state. The transitions from the running-in behaviour to steady state condition had smooth characteristics. In early stages of the wear test, fluctuations were observed for all sample. Approximately 10 m after of starting of the wear test, the steady state regime was observed. The head of R260 rail sample had stable friction curve until the end of the wear test. The web and the foot of R260 rail samples had completed the wear test with some fluctuations as can be seen in Figure 4. In railway, the estimation of friction between the wheel and rail has a critical role. Because it has direct influence on adhesion, wear process, noise generation and rolling contact fatigue. In the literature, COF value fluctuates between 0.5 and 0.7 for dry conditions. Under lubricated conditions, it varies between 0.05 and 0.3 condition. These values were obtained from track or full-scale test rig system. In this study, mean COF (considering stable friction curve) of the web, head and foot of R260 rail were found to be 0.39, 0.35 and 0.38, respectively. Using same methodology (adhesive ball-on-disc wear test) and tribo-couple (rail steel – WC ball), mean COF value was obtained as 0.38 by Ay and Çelik as 0.34 by Çakır and Çelik [5,6]. COF values obtained in this study are in good agreement with literature.

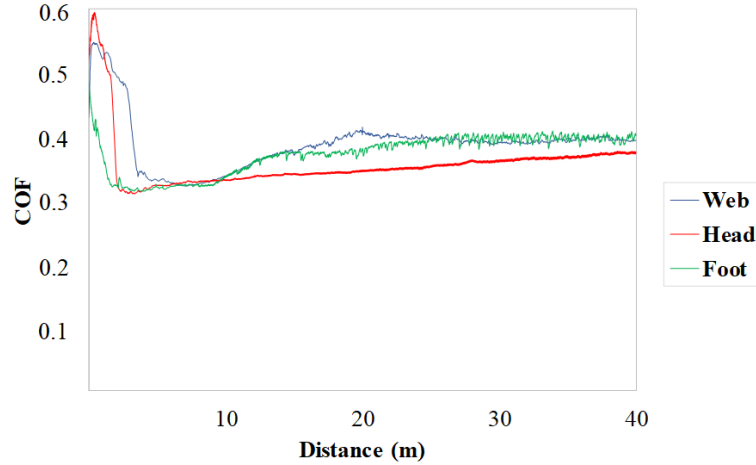
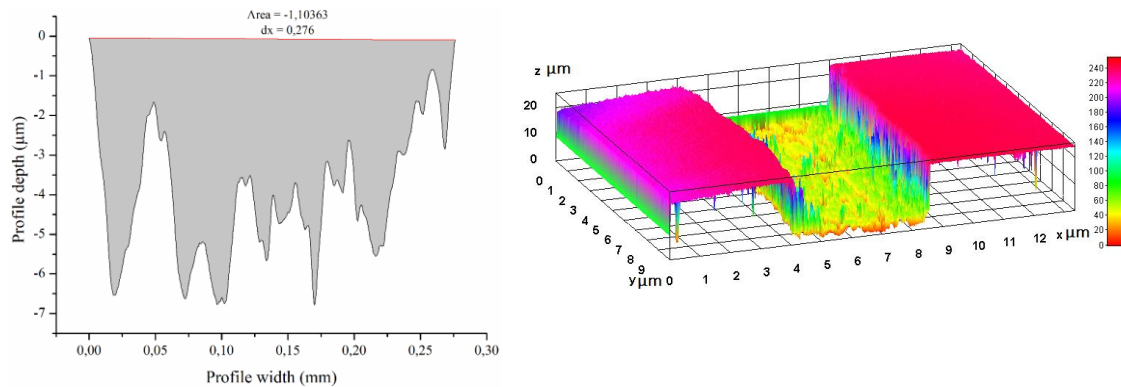


Figure 4. COF vs. distance plot of the different sections of R260 rail steel

After completion of adhesive wear tests, the profile of worn surfaces was measured by profilometer Mitutoyo SJ-400. The surface profiles were imported to Origin Lab software and the area of worn sections are calculated by integrating. Finally, the wear volume was calculated, and the results were compared considering the specific wear rate (k , mm^3/Nm) for all group sample. In addition to the surface profile of the worn area, 3D surface topography was created by using ImageJ software. Wear track was captured by Nikon Eclipse L150 microscope and imported to software.

In Figure 5, worn profiles and 3D surface topographies of different sections of R260 rail steel are shown. It was found that the minimum area and the volume of the worn sections of R260 rail steel was the head of the rail. This case was expected because the highest hardness value belonged to the head of the rail. It was apparent from Figure 5; the widest wear channel was found for the foot of the rail. The hardness values strongly dominated the worn area of the rail steel. In order to evaluate the results properly, the specific wear rate (k , mm^3/Nm) was also calculated and shown in Figure 6. The results of the specific wear rate were more universal and reliable in comparison to the wear volume loss. The specific wear rates were found to be 2.7591 , 4.812 and 7.3575 ($\times 10^{-6}$, mm^3/Nm) for the head, web and foot of R260 rail, respectively. In summary, the wear resistance was depending on hardness values and each section of rail steel has decreasing wear resistance from the head to the foot region. As a result, it can be said that the hardness values dominate the wear rates.

The most critical findings for this study are specific wear rate and coefficient of friction (COF). The specific wear rate is important in terms of useful economic life. The coefficient of friction dominates the wheel–rail interface and the dynamic of rail vehicles.



(a)

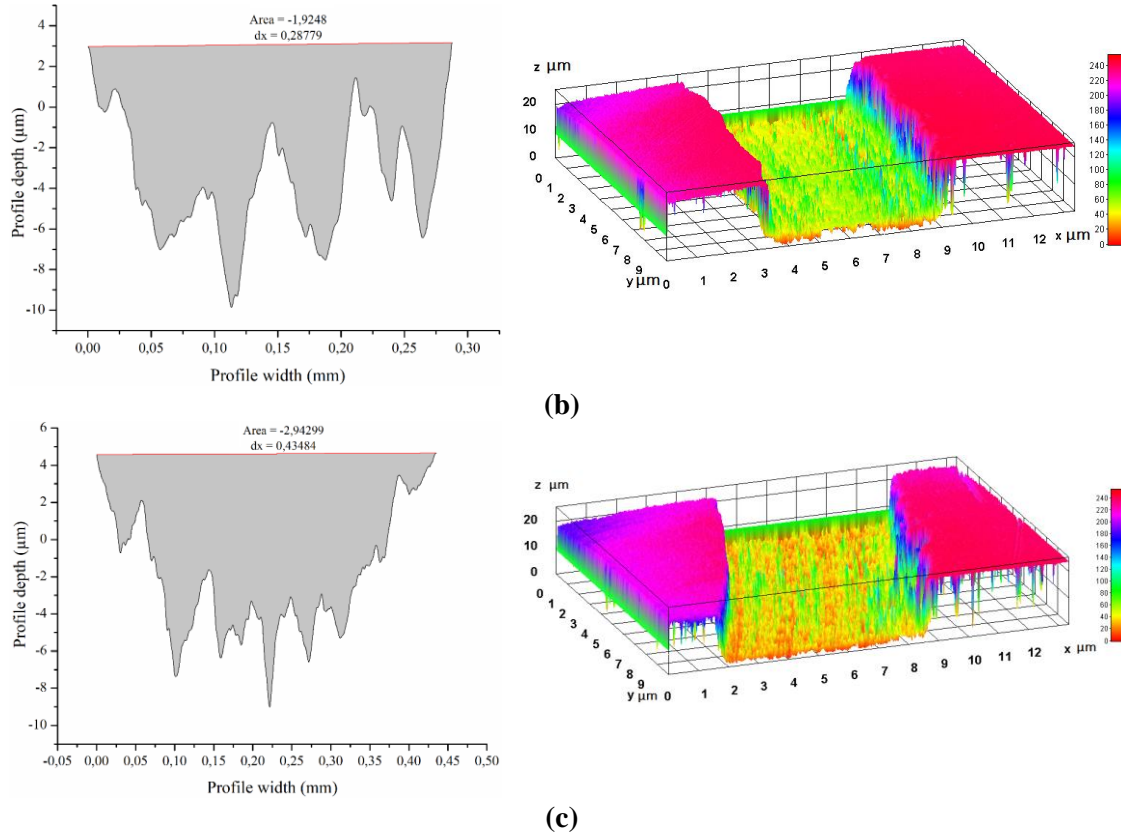


Figure 5. Profiles and 3D surface topographies of a) head, b) web and c) foot of R260 rail steel

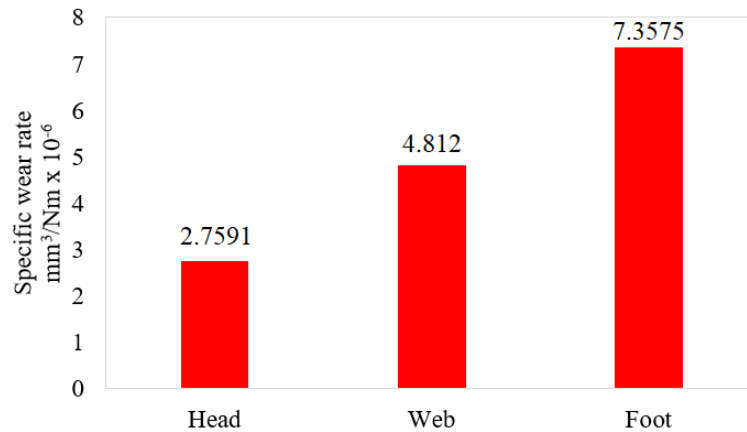


Figure 6. Specific wear rate of different sections of R260 rail steel

4. Conclusion

In conclusion, different sections of R260 rail have been evaluated in terms of microstructural, hardness, tribological and wear resistance properties. The main conclusions can be drawn:

- 1) The foot section of R260 rail has more ferrite phase in comparison to other regions.
- 2) The hardness values have decreasing characteristics from the head to the foot of cross sectional of R260 rail.
- 3) Mean COF of the web, head, and foot section of R260 rail have been close to each other and found to be as 0.39, 0.35 and 0.38, respectively.

- 4) The most wear resistant section belongs the head of R260 rail as it has the highest hardness value.
- 5) For future works, different rail-wheel materials can be studied considering various wear test parameters under dry and wet (water, oil and combination of water and oil) conditions.

Acknowledgement

The author acknowledges Eskişehir Technical University and Eskişehir Osmangazi University for providing an opportunity to conduct experiments and The Turkish State Railways (TCDD Taşımacılık) for material supply.

References

- [1] S. Iwnicki, *Handbook of railway vehicle dynamics*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006
- [2] J. P. Srivastava, P. K. Sarkar and V. Ranjan, “Effects of thermal load on wheel–rail contacts: A review,” *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 39, No. 11, pp. 1389–1418, 2016, doi: 10.1080/01495739.2016.1216060
- [3] J. F. Santa, A. Toro, and R. Lewis, “Correlations between rail wear rates and operating conditions in a commercial railroad,” *Tribology International*, Vol. 95, pp. 5–12, 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2015.11.003
- [4] F. Bozkurt and Ü. Er, “Investigation of Tribological Properties of Rail and Wheel Steels,” *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 62, pp. 405–414, 2020, doi: 10.1007/s11041-020-00575-4
- [5] G. M. Ay and O. N. Çelik, “Investigation of Tribological Properties of Rail and Wheel Steels,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 16, no. 2, pp. 89–95, 2013
- [6] F. H. Çakır and O. N. Çelik, “Effect of Isothermal Bainitic Quenching on Rail Steel Impact Strength and Wear Resistance,” *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 59, pp. 289–293, 2017, doi: 10.1007/s11041-017-0144-7
- [7] J. Herian and K. Aniotek, “Abrasive wear of railway sections of steel with a different pearlite morphology in railroad switches,” *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 43, no. 1, pp. 236–243, 2010
- [8] C. Esveld, *Modern Railway Track*. TU Delft, MRT Productions, 2001

Resume



Fatih BOZKURT

He graduated from Eskişehir Osmangazi University, Mechanical Engineering Department. He completed his masters’ studies at Eskişehir Osmangazi University, Mechanical Engineering Department and University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty. He got phd degree from University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty. He works as an assistant of professor in Eskişehir Technical University, Vocational School of Transportation.

E-mail: fatihbozkurt@eskisehir.edu.tr

Ethics Statement:

Author confirms that the article is original, there is no plagiarism issue.



YOLOv5 ile Topluluk Öğrenmesine Dayalı Olarak Ray Yüzeyindeki Kusurların Tespiti

Mehmet SEVİ¹, İlhan AYDIN², Erhan AKIN²

¹ Muş Alparslan Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Muş, Türkiye

² Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Elâzığ, Türkiye

*m.sevi@alpaslan.edu.tr

(Alınış/Received: 15.11.2022, Kabul/Accepted: 15.12.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Demiryolu ulaşımı son yıllarda demiryolu hat uzunluğunun artmasıyla beraber kapasitesini arttırmıştır. Hızlı trenlerin gelişmesi de bu duruma katkı sağlamıştır. Yolcu ve yük kapasitesinin artması güvenlik tedbirlerinin önemini daha da arttırmıştır. Demiryolu hatlarının güvenliğini sağlamak için hatların belirli aralıklarla denetlenmesi gerekmektedir. Demiryolu hattı bakımında ray üzerinde bulunan kusurların tespiti son derece önemlidir. Bu çalışmada demiryolu bakımının önemli bir parçası olan ray bileşeni üzerindeki kusurların tespitine odaklanılmıştır. Çalışmada ray üzerinde bulunan kusurları bir nesne tespiti yöntemi olan YOLO ile tespit etme yoluna gidilmiştir. Farklı YOLO modelleri için topluluk öğrenmesine dayalı bir yöntem önerilmiştir. Deneysel sonuçları, 8 farklı kusur içeren veri seti üzerinde bütün sınıfları içeren tespit oranının %80'in üzerinde olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Ray, Kusur tespiti, Bilgisayarlı görme, YOLO, Derin öğrenme algoritmaları

Detection of Rail Surface Defects Based on Ensemble Learning of YOLOv5

Abstract: Railway transportation has increased its capacity with the increase in railway line length in recent years. The development of high-speed trains also contributed to this situation. The increase in passenger and cargo capacity has further increased the importance of security measures. In order to ensure the safety of the railway line, it is necessary to inspect the line at certain intervals. Detection of defects on the rail is extremely important in the maintenance of the railway line. This study focuses on the detection of defects on the rail component, which is an important part of railway maintenance. In the study, it was tried to detect the defects on the rail with YOLO, which is an object detection method. In the study, it has been shown that model ensembling gives better results than YOLO models that validate alone. A method based on ensemble learning is proposed for different YOLO models. Experiment results showed that the detection rate including all classes on the data set containing 8 different defects was over 80%.

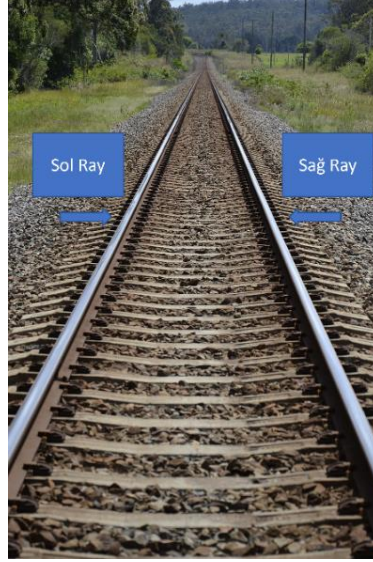
Keywords: Railway, Rail, Defect detection, Computer vision, YOLO, Deep learning algorithms

1. Giriş

Türkiye’de hızlı tren kullanımı demiryolu ulaşımına yapılan yatırımlarla beraber artmıştır. Ulaşımın yanı sıra demiryolu hatları yük taşımacılığında da yüksen oranda kullanılmaktadır. Maddi ve manevi hasarları minimuma indirmek için demiryolu hatlarının güvenliği son derece önemlidir. Bu yüzden demiryolu hatları düzenli bir şekilde izlenmeli, demiryolu hattında oluşabilecek kusurlar hızlı bir şekilde tespit edilmelidir. Günümüzde kullanılan demiryolu kusur tespit sistemleri manuel şekilde yapılmaktadır. Güncel sistemlerde demiryolu hattının izlenmesi ve denetimi bir uzman tarafından gözle gerçekleştirilmektedir [1]. Bu yöntemde demiryolu hattının kontrolü uzmanın görme kapasitesi ile sınırlıdır. Bu sebeple denetim ve izleme işleminde bir standart yakalamak mümkün değildir. Günümüzde kullanılan bir diğer yöntem ise demiryolu hattı ile temas sağlayarak yapılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı ise demiryolu hattında temastan kaynaklı kusurlar oluşabilmektedir. Ayrıca bu işlem sırasında demiryolu trafiği sekteye uğramaktadır. Bu yöntemler zaman, para ve iş gücü kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle

Atıf için/Cite as: M. Sevi, İ. Aydın, E. Akın, “Detection of rail surface defects based on ensemble learning of YOLOv5,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 115-132, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1205483

demiryolu ulaşımının güvenliği sekteye uğrayabilir. Demiryolu ulaşımı, tüm dünyadaki en güvenli ulaşım türlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Demiryolu bileşenlerinin kalitesi, trenin çalışma güvenliği için önemlidir. Demiryolu ulaşımının güvenle devam edebilmesi için demiryolu hattını oluşturan bileşenlerin bakımı düzenli bir şekilde yapılmalıdır. Demiryolu taşımacılığında araçların (tren, vagon) tekerlekleri ile üzerinde hareket ettikleri paralel biçimde yerleştirilmiş metal çubuklara ise ray denilmektedir. Bir demiryolu hattında sol ve sağ ray olmak üzere toplam iki adet ray vardır. Şekil 1'de sağlıklı sol ve sağ ray görülmektedir.



Şekil 1. Sol ve sağ ray bileşeni

Rayların sağlık durumu demiryolu operasyonlarının güvenliğini doğrudan etkilemektedir [2]. Sol ve sağ raylar genellikle hasarlı, kırık veya eksik gibi kusurlar içermektedir [3]. Demiryolu ulaşımında güvenliği sağlamak için akademik literatürde birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle görüntü işleme tabanlı uygulamalardır. Yapay zekâ alanının alt dallarından biri olan derin öğrenme yöntemleri, görüntülerden nesne tespiti yapma alanında kullanılan görüntü işleme algoritmaları birlikte kullanılmaktadır. Derin öğrenme sadece demiryolu alanında değil inşaat, sağlık gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [4]. Literatürdeki derin öğrenme ağlarını kullanan çözümler demiryollarındaki kusurları tespit etmek için video ve resimlerden oluşan veri kümelerine ihtiyaç duymaktadır. Demiryolu hattındaki kusurları tespit eden yeni sistemler genellikle yeni teknolojilerin sunduğu hız, yüksek doğruluk ve maliyet gibi avantajlardan faydalanmaktadırlar. Feng ve ark. demiryolu hattındaki eksik bağlantı elemanlarını tespit etmek için otomatik bir görsel inceleme sistemi önermişlerdir. Önerdikleri sistemde bir tren vagonunun altına yerleştirilmiş, her iki rayı da kayıt altına alan iki kamera ile görüntüler toplanmıştır. Bu görüntüleri kullanarak önce bağlantı elemanları tespit edilmiş sonra ise geliştirdikleri STM modeli sayesinde bağlantı elemanlarını %98 oranında ayırt edebilmişlerdir [5]. Guo ve ark. YOLOv4-hibrit modelini kullanarak demiryolu bileşenlerini tespit etmişlerdir. Çalışmada herkese açık bir veri seti kullanmışlardır. Özelleştirilmiş YOLOv4-hibrit modeli ile 94,4 ortalama hassasiyet (mAP) ve saniyede 78,7 kare (FPS) performansı yakalamıştır [6]. Derin öğrenme tabanlı bir diğer çalışmada ray ve bağlantı elemanları YOLOv5 modeli ile tespit edilmiştir. Zheng ve ark. yaptıkları çalışmada ray yüzeyindeki ve bağlantı elemanlarındaki kusurları araştırmışlardır. Çalışma için RSDD veri setini etiketlenmiştir. Daha sonra derin öğrenme ağı ile demiryolu bileşenlerinin görüntü üzerindeki konumunu saptamışlardır. Son olarak ray ve bağlantı elemanları üzerindeki kusurları Mask R-CNN ve ResNet ağı ile tespit etmişlerdir [7]. Bir diğer çalışmada Adaboost tabanlı kırık bağlantı elemanlarını tespit eden bir yöntem önerilmiştir. Öncelikle demiryolu görüntüsünden bağlantı elemanlarının pozisyonları tespit edilmiştir. Tespit edilen bağlantı elemanı görsel olarak dört parçaya bölünerek Adaboost algoritması tarafından

tanınmıştır [8]. Fan ve ark. düşük aydınlatma şartlarında bağlantı elemanlarını başarıyla tespit eden ve hangi tür kusur içerdiğini belirleyen bir yöntem önermişlerdir [9]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ray üzerindeki kusurları tespit etme ve içerdiği kusura göre sınıflandırmada yapay zekâ ve görüntü işleme tabanlı yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür [10-11]. Yanan ve ark. bu doğrultuda rayların içerdikleri kusurları YOLOv3 modelini kullanarak tespit etmişlerdir [12]. Bu çalışmada, rayların içerdikleri kusurlar derin öğrenme yoluyla saptanmıştır. Demiryolu ulaşımı güvenliği için yüksek doğruluk oranıyla bu işlemin yapılması esastır. Bu işlemi geleneksel yöntemlerle gerçekleştirmek zaman ve maliyet açısından son derece dezavantajlıdır. Bu nedenle, demiryolu ulaşımı güvenliği için bu verilerin otomatik analizi daha verimlidir. Bu çalışmada sahadan toplanan demiryolu görüntülerini kullanarak rayların içerdiği kusurları tespit eden YOLOv4, YOLOv5 ve YOLOv6 tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Makalenin ikinci kısmında önerilen yöntemden, veri setinden ve ön işleme adımlardan bahsedilmiştir. Üçüncü kısımda ise deneysel sonuçlara değinilmiştir. Son kısımda ise önerilen yöntemin sonuçlarına değinilmiştir.

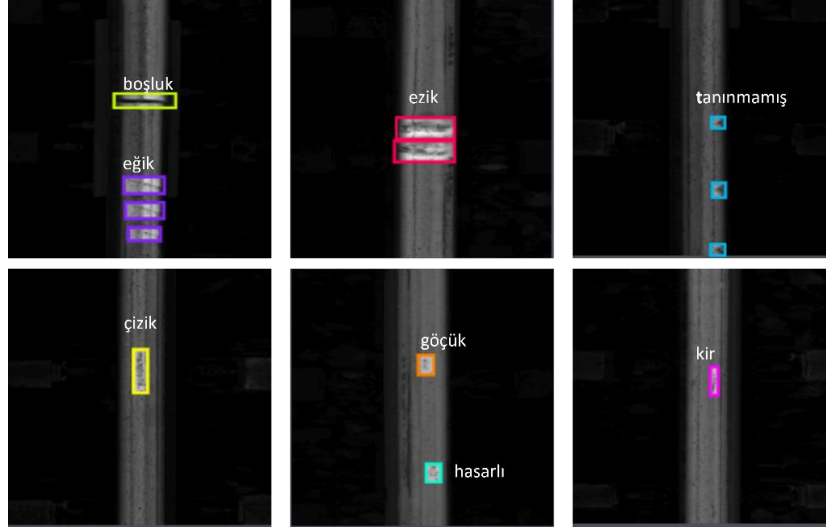
2. Metot

Önerilen yöntemde, ray üzerindeki kusurların tespiti için YOLOv4, YOLOv5 ve YOLOv6 modelleri uygulanmıştır. Şekil 2'deki görüntüde görüldüğü üzere ray üzerindeki kusurlar farklı kusur çeşitlerini içermektedir. Aynı zamanda tek görüntüde birden fazla kusur bulunabilmektedir. YOLO tabanlı modellerin tercih edilmesinin sebebi hızlı tahminler yaparken aynı zamanda da çok iyi sonuçlar verebilmeleridir. Örneğin R-CNN gibi bölge bazlı nesne tespit algoritmaları önce muhtemel alanları belirleyip ardından ayrı ayrı evrimsel sinir ağı (CNN) sınıflandırıcıları yürütmektedir. Bu yöntem her ne kadar iyi sonuçlar verse de bir görüntü iki ayrı işleme tabi tutulduğu için görüntü üzerindeki işlem sayısı artar ve düşük bir FPS (saniye başına kare) alınmasına sebep olmaktadır.

Çalışmada kullanılan veri seti 399 adet görüntüden oluşmaktadır [13]. Kusurlu demiryolu ray görüntüleri görüntü artırım teknikleriyle 939'a artırılmıştır. Bu görüntü artırım teknikleri görüntü çevirme, parlaklık ve gürültüdür [14]. Görüntü çevirme, x eksenini veya y eksenini boyunca görüntünün çevrilmesiyle yeni bir görüntü elde eder. Gürültü ekleme işlemi, orijinal görüntüden farklı güçlendirilmiş bir görüntü elde etmek için orijinal görüntünün her pikseline rastgele ek bilgiler eklenerek görüntünün gürültü artırmasını amaçlar. Bir görüntünün parlaklık değişimi, görüntü örneğinin her pikseli üzerinde doğrudan bir doğrusal dönüşüm işlemidir. Görüntü parlaklığı dönüşüm faktörü olarak λ kullanılarak, parlaklık değişimiyle genişletilen görüntü örneği, $I=\lambda I$ olarak ifade edilebilir. Burada $0 < \lambda < 1$ koyulaştırmayı ve $\lambda > 1$ parlaklaştırmayı temsil eder. Veri setinde 810 görüntü eğitim, 90 görüntü değerlendirme ve 39 görüntüde test için ayrılmıştır. Veri setinde toplam 8 çeşit ray kusuru bulunmaktadır. Bunlar:

- Çizik, ray kafasının yan düzlemlerinde küçük/hafif çizik,
- Ezik, demiryolunun yanal düzlemlerinin büyük/şiddetli aşınması,
- Kir, rayın yüzeyini kaplayan boya veya çamur,
- Boşluk, bir demiryolu hattında birbirini takip eden raylar arasında kalan boşluklardır,
- Tanınmamış, tanımlanamayan kusurlar,
- Hasarlı, zarar görmüş ray yüzeyi,
- Eğik, yatay pozisyonda aşağıya doğru eğimli kusurlar,
- Göçük, ray yüzeyindeki oyuklar. Yatay veya uzunlamasına değil daha küçük oval kusurlardır.

Şekil 2'de veri setinden örnek kusurlar görülmektedir.

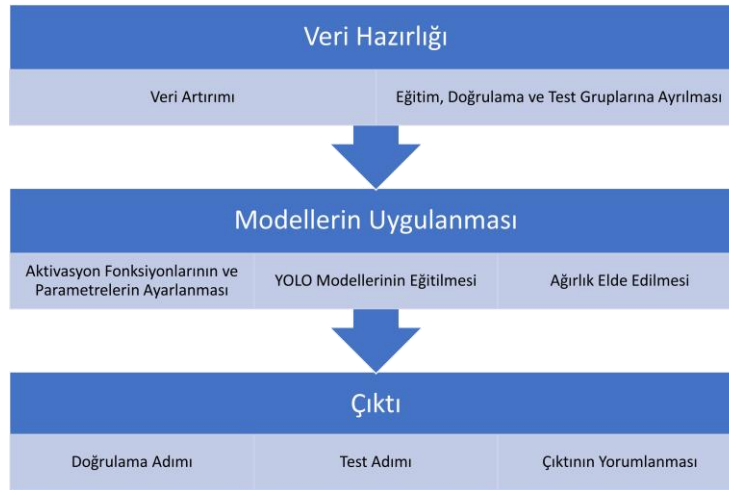


Şekil 2. Veri setinden örnekler

Eğitim aşaması tüm modellerde Google Colab aracılığıyla yapılmıştır. Deney ortamı Tesla P100-PCIE-16GB grafik işlemci birimi (GPU) ve Intel(R) Xeon(R) merkezi işlem birimi (CPU) @ 2.20GHz CPU sisteminden oluşmaktadır. Etiketlenmiş veri seti Roboflow uygulamasına yüklenmiştir. Var olan 399 görüntüye görüntü çevirme, parlaklık ve gürültü ekleme işlemleri uygulandıktan sonra 939 adet görüntü Google Colab'a aktarılmıştır. Daha sonra adım adım YOLO algoritmalarının kodları çalıştırılarak eğitim, doğrulama ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tüm modellerde kullanılan eğitim parametreleri ayarları:

- Girdi görüntü boyutu: 416
- Döngü sayısı: 200
- Bir iterasyon içerisinde her aşamada incelenen görüntü sayısı: 32

Önerilen modelin akış diyagramı Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3. Önerilen modelin akış diyagramı

2.1. YOLO

YOLO (Sadece Bir Kez Bak), sınırlayıcı kutuları ve sınıf olasılıklarını tahmin etmek için tek bir sinir ağı kullanan, GoogLeNet'ten ilham alan bir derin evrimsel sinir ağıdır. Bu, görüntünün sadece bir kez ağ içinden geçip algılama görevini tamamladığı anlamına gelir. Literatürdeki en

hızlı genel amaçlı nesne algılama mimarisidir. Ayrıca, rapor edilen ilk gerçek zamanlı evrişimsel sinir ağı tabanlı nesne algılama modelidir. Tüm algılama hattı tek bir ağda olduğundan doğrudan algılama performansı diğer sinir ağı mimarilerinin çoğundan yüksektir [15]. Şekil 4'te YOLO'nun tespit sistemi görülmektedir.

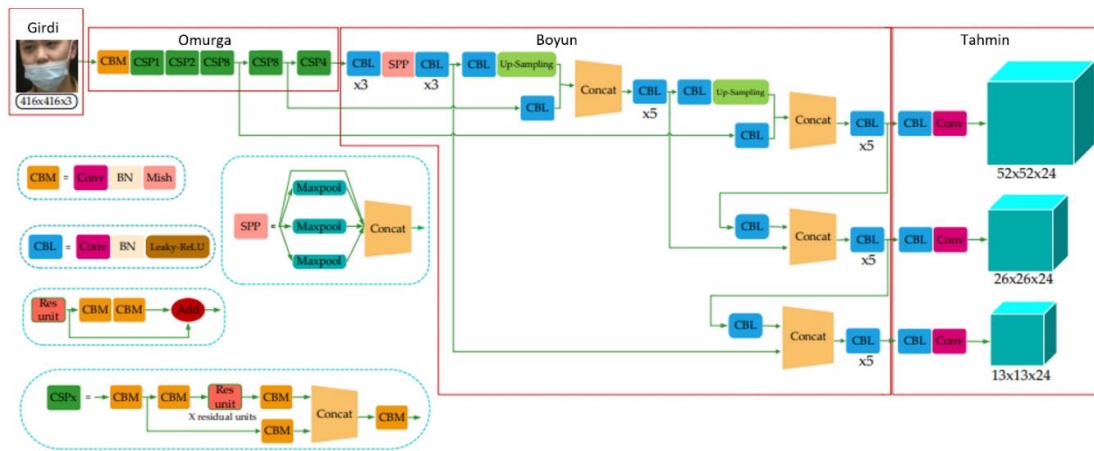


Şekil 4. Nesne tespitinden sorumlu YOLO tespit sistemi [16]

YOLO mimarisi, resim sınıflandırması için GoogLeNet modelinden esinlenmiştir. YOLO sinir ağı modeli 24 evrişim katmanına ve ardından 2 tamamen bağlı katmana sahiptir. Ağın, başlangıçtaki evrişim katmanları görüntünün özelliklerini çıkartırken, tamamen bağlantılı katmanlar çıkış olasılıklarını ve koordinatları öngörürler. YOLO, C ve CUDA ile yazılmış açık kaynaklı bir sinir ağı uygulama çatısı olan "Darknet" üzerinde uygulanmaktadır. YOLO bu şekilde uygulanarak, gerçek zamanlı video akışını işlemek için GPU işlem gücünden yararlanmaktadır.

2.2. YOLOv4

YOLOv4, Nisan 2020'de yayınlanan ve COCO veri setinde üzerinde iyi bir performansla ulaşan gerçek zamanlı bir nesne algılama modelidir. YOLOv4 modeli YOLOv3'e dayalı optimize edilmiş bir modeldir. Şekil 5'te görüldüğü üzere üç kısımdan oluşmaktadır; omurga, boyun ve tahmin. Omurga kısmında CSPDarknet53 ağı kullanılmıştır. Omurga kısmında ayrıca BoF (Bag of Freebies) ve BoS (Bag of Specials) adlı iki bölüm daha bulunmaktadır. Bu bölümler veri setini zenginleştirmek için kullanılmaktadır [17]. Boyun, nesnelere farklı ölçeklerde algılamak için kullanılır. Kafa bölümünü besleyen bilgileri zenginleştirmek için aşağıdan-yukarı, yukarıdan-aşağı akıştan gelen özellik haritaları kafa bölümünü beslemeden önce eleman bazında veya birleştirilerek birbirine eklenir [17]. Boyun yapısı Uzamsal Piramit Havuzu (SPP) ve Yol Toplama Ağı (PANet) yöntemlerinden oluşmaktadır. Kafa bölümü ise tahmin katmanıdır.

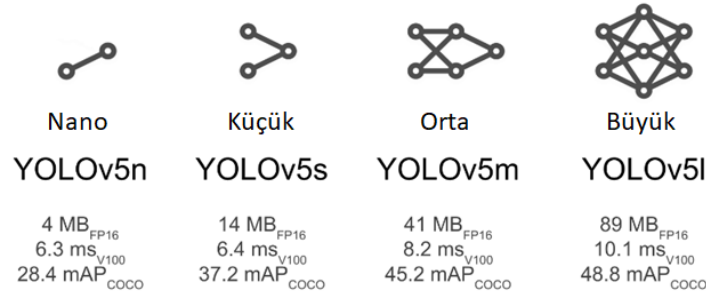


Şekil 5. YOLOv4 mimarisi [18]

2.3. YOLOv5

YOLOv4'ün yayınlanmasından kısa bir süre sonra Glenn ve ekibi tarafından mimarinin yeni sürümü olan YOLOv5 yayınlanmıştır. Mimarinin önceki sürümlerine göre işlem süresini önemli ölçüde düşürmesiyle birlikte YOLOv5, Pytorch'ta yeni bir eğitim ortamı altında derlenerek eğitim sürecini Darknet'ten daha kolay bir hale getirmiştir. Bu ağ modelinin algılama doğruluğu ve hızı önceki sürümlere kıyasla oldukça yüksektir. Buna ek olarak, YOLOv5'in ağ modelinin ağırlık dosyasının boyutları da önceki sürüm olan YOLOv4'ten yaklaşık %90 oranla daha küçüktür.

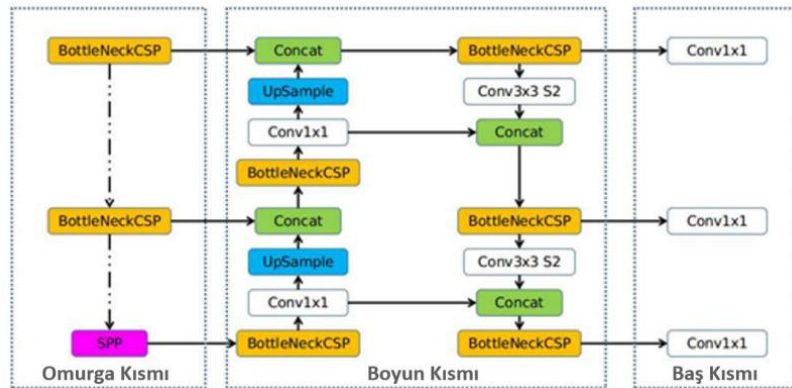
Bütün bu avantajlar YOLOv5 modelinin gerçek zamanlı tespit uygulamaları için gömülü cihazlar üzerinde çalışması için uygun olduğunu göstermektedir. YOLOv5 mimarisi boyut ve model parametrelerinin miktarına göre artan dört alt mimariyi içermektedir. Bunlar; YOLOv5s, YOLOv5n, YOLOv5m ve YOLOv5l mimarileridir. Bu mimariler sinir ağının belirli bir yerindeki özellik çıkarma modüllerinin ve evrişim çekirdek miktarlarının farklı olmasıyla birbirinden ayrılırlar. Model boyutları ve parametre sayısı da sırayla artmaktadır. Bu artış Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. YOLOv5 mimarisinin alt mimarileri [19]

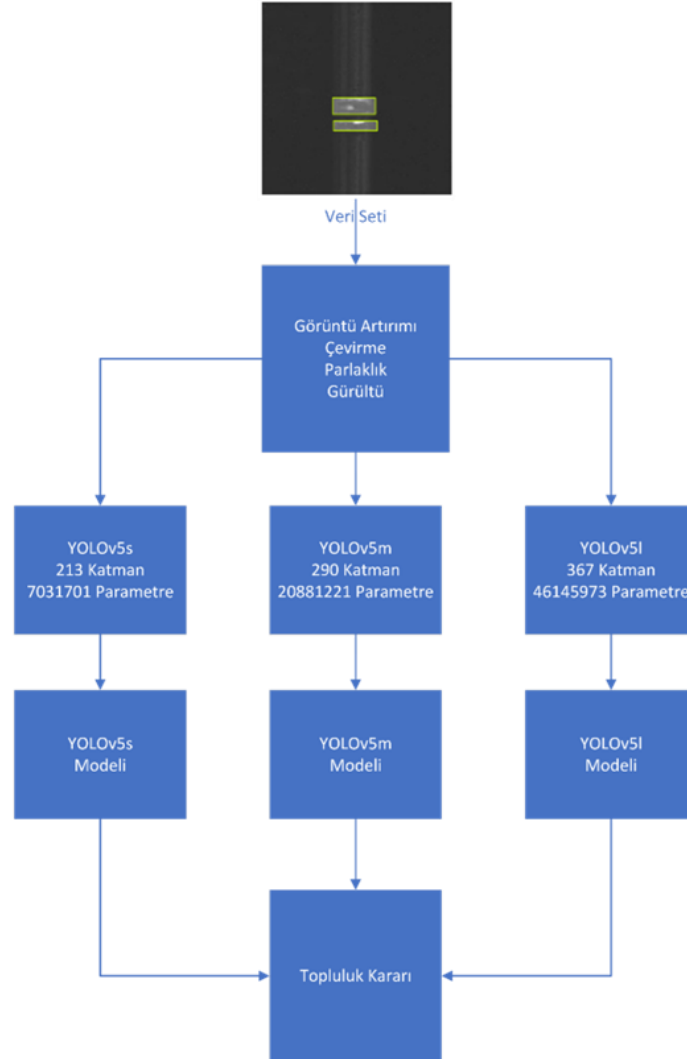
Bu çalışma kapsamında geliştirilen sürücü asistan sistemi uygulamaları gömülü platform üzerinde gerçek zamanlı olarak çalışacağından ve sistemin minimum kaynak kullanımı ile maksimum performansa ulaşması istendiğinden ağı eğitimi YOLOv5s [20] ile gerçekleştirilmiştir. Genel yapısı Şekil 7'de verilen YOLOv5 ağ mimarisi omurga, boyun ve baş kısmı olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır.

Omurga kısmında CSPDarknet [20], boyun kısmında PANet [20] ve baş kısmında ise YOLO katmanı kullanılmaktadır. Özetle, veriler özellik çıkarımı için ilk olarak CSPDarknet'den geçirilerek özellik birleştirme için PANet'e verilir. Bunun sonucunda da YOLO katmanı sınıf, skor, konum ve boyut bilgisi gibi çıktıları vermektedir.



Şekil 7. YOLOv5 mimarisinin genel yapısı [21]

Bu çalışmada ayrıca YOLOv5 ile eğitilmiş ağırlıkları kullanarak topluluk modellemesi yöntemi kullanılmıştır. Topluluk modelleme işleminin mAP.5 ve geri çağırma değerleri üzerinde pozitif etki yaptığı saptanmıştır. Topluluk modellemesi birçok farklı modelleme algoritması kullanarak ya da farklı eğitim veri setleri kullanarak bir sonucu tahmin etmek için çok çeşitli modellerin oluşturulduğu bir süreçtir. Topluluk modeli her bir temel modelin tahminini toplar ve görünmeyen veriler için nihai bir tahminle sonuçlanır. Topluluk modellerini kullanma amacı, tahminin genelleme hatasını azaltmaktır. Temel modeller çeşitli ve bağımsız olduğu sürece, topluluk yaklaşımı kullanıldığında modelin tahmin hatası azalmaktadır. Şekil 8’de önerilen topluluk modeli görülmektedir. Önerilen yapıda bireysel olarak YOLOv5 alt mimarilerin eğitimi gerçekleştirilmiştir. Topluluk öğrenimi, tüm sonuçları tahmin etmek ve entegre etmek için birden fazla model kullanır. Topluluk modelinde görüntüler, yalnızca bir modelin sınırlandırılmasını önlemek için farklı modellerden elde edilen sonuçları birleştirebilen ray üzerindeki kusurları algılamak için çeşitli parametre ayarları ile eğitilmiş birden çok modele gönderilir. Ardından ardışık düzen sınırlayıcı kutunun tahminlerinin ortalamasını alır ve tüm modellerin kategori tahminlerini oylar. Topluluk modeli, model içinde birden fazla temel modele sahip olsa da tek bir model olarak hareket eder ve çalışır [22]. Çalışmada YOLOv5’in alt mimarileri olan YOLOv5s, YOLOv5n, YOLOv5m, YOLOv5l kullanılarak veri seti eğitilmiştir. Eğitim sonucu oluşan ağırlıklar kullanarak topluluk modellemesi yapılmıştır.



Şekil 8. Önerilen topluluk modeli

2.4. YOLOv6

YOLOv6 modeli Haziran 2022'de Meituan tarafından piyasaya sürülmüştür. COCO veri kümesi karşılaştırmasında iyi sonuçlar vermiştir. YOLOv6, modeli YOLO mimarisi temelinde inşa edilmiş ve YOLO ailesinin diğer modellerine göre çeşitli iyileştirmeler ve yeni yöntemler sunmuştur. YOLOv6, PyTorch'ta yazılmıştır. YOLOv6'nın üç önemli güncellemesi var: donanım dostu omurga, boyun tasarımı ve verimlilik için ayrılmış baş ve etkili eğitim stratejileri. YOLOv6'nın nesne algılama performansının, algoritmanın aşamalı sürümleriyle hem hız hem de doğruluk iyileştirmeleri ile diğer CNN tabanlı algoritmalarla karşılaştırılabilir olduğu gösterilmiştir [23]. Çalışmada farklı görüntü boyutlarının YOLOv6 alt mimarilerinin performanslarına etkisi gösterilmiştir. Çalışmada YOLOv6 modeli için kullanılan veri seti 416x416 ve 640x640 boyutlarında iki versiyona türetilmiştir.

2.5. Metrikler

Model eğitimi tamamlandıktan sonra modelin test edilmesi için eğitilen ağırlıklar kullanılır ve model birçok yönden değerlendirilir. Ray kusurlarını içeren veri setimiz için test sonuçları üç kategoride sınıflandırılabilir: TP (gerçek pozitif), test setindeki kategorilerin test sonuçlarıyla aynı olduğu anlamına gelir; FP (yanlış pozitif), tespit edilen nesne kategorisindeki örneklerin sayısının gerçek nesne kategorisiyle tutarsız olduğu anlamına gelir ve FN (yanlış negatif), gerçek numunenin ters sonuç olarak veya tespit edilmeyen kategoride tespit edildiğini gösterir. Model tarafından değerlendirilen tüm pozitif vakalar için sayı (TP + FP), bu nedenle gerçek vakaların (TP) oranına kesinlik oranı denir ve bu, pozitif vakalardaki gerçek vaka örneklerinin, tarafından tespit edilen numuneler arasındaki oranını temsil eder. Denklem 1'de gösterilmiştir.

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

Test setindeki tüm pozitif örnekler için sayı (TP + FN)'dir. Bu nedenle, Denklem 2'de gösterildiği gibi, geri çağırma oranı, modelin test setindeki gerçek durumları tespit etme yeteneğini ölçmek için kullanılır [24].

$$Geri \text{ Çağırma} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Modelin kesinliğini karakterize etmek için bu makale, Denklem 3 ve Denklem 4'te gösterildiği gibi modelin doğruluğunu değerlendirmek için AP (ortalama kesinlik) ve mAP (ortalama kesinlik değerlerinin ortalaması) göstergelerini tanıtmaktadır [24]. Denklem 3 ve 4'te bulunan P, R, N değerleri sırasıyla tüm kategorilerdeki kesinliği, geri çağırma oranını ve toplam nesne sayısını temsil etmektedir [24].

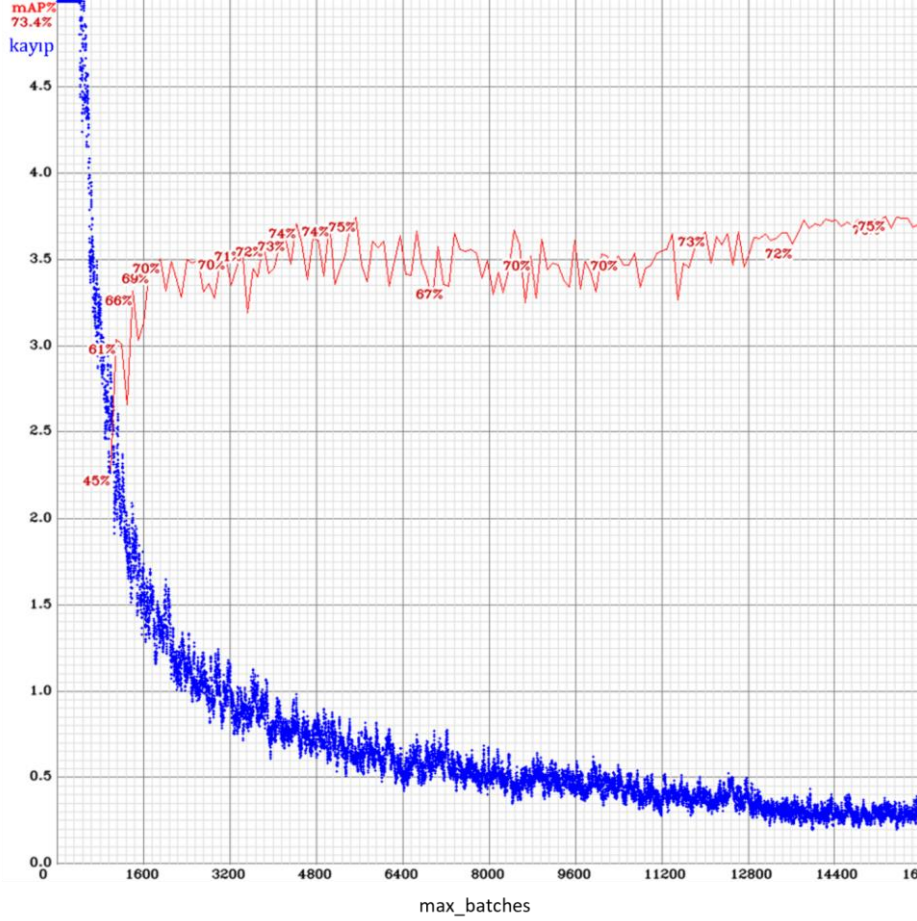
$$AP = \int_0^1 P(R) dR \quad (3)$$

$$mAP = \frac{\sum_{i=1}^N AP_i}{N} \quad (4)$$

3. Deneysel Sonuçlar

3.1. YOLOv4 sonuçları

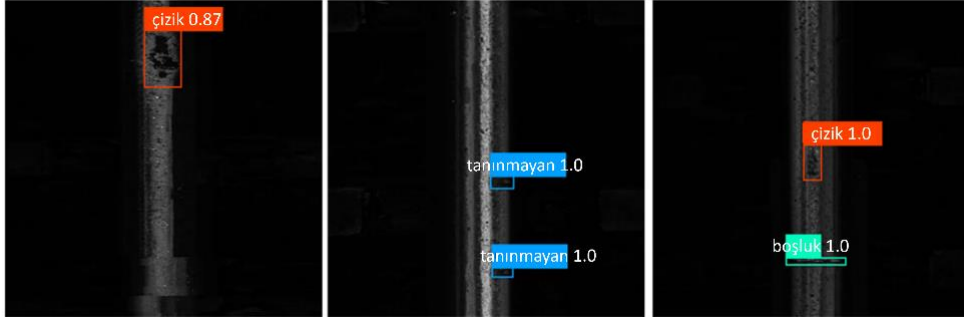
Çalışmada eğitimini gerçekleştirdiğimiz YOLOv4 modeli 0,7338 mAP.5 değeri yakalamıştır. Ayrıca 0,73 kesinlik, 0,69 geri çağırma oranı elde etmiştir. YOLOv4 modelinin kayıp grafiği Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. YOLOv4 modelinin kayıp grafiği

Şekil 9'da görüldüğü gibi max_batch sayısı arttıkça kayıp kademeli olarak azalmıştır. Toplam iterasyon sayısı max_batch ile belirtilir. Toplam iterasyon yeterli sayılara ulaştığında kayıp ve mAP üzerinde büyük etkisi olmuştur. Yalnızca toplam iterasyon sayısı çok küçük olduğunda düşük eğitim kaybı ve doğrulama mAP oranları veriyor gibi görünmektedir.

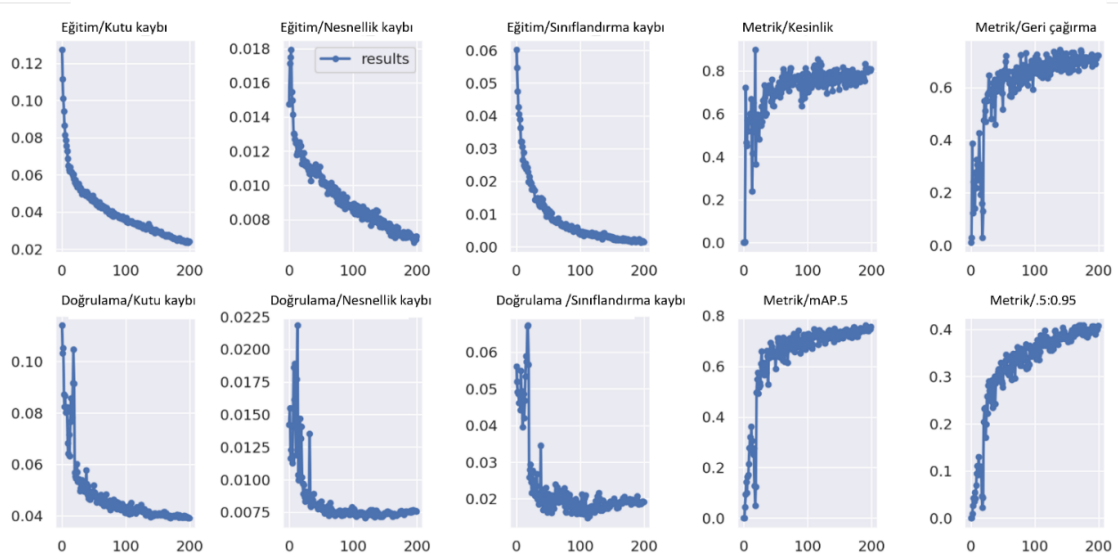
Eğitim sonucunda elde edilen ağırlık ile test edilen ray kusuru içeren görüntüleri görsel ortama aktardığımızda Şekil 10'daki sonuçlar ve mAP.5 oranları elde edilmiştir.



Şekil 10. YOLOv4 modelinin test sonuçları

3.2. YOLOv5 sonuçları

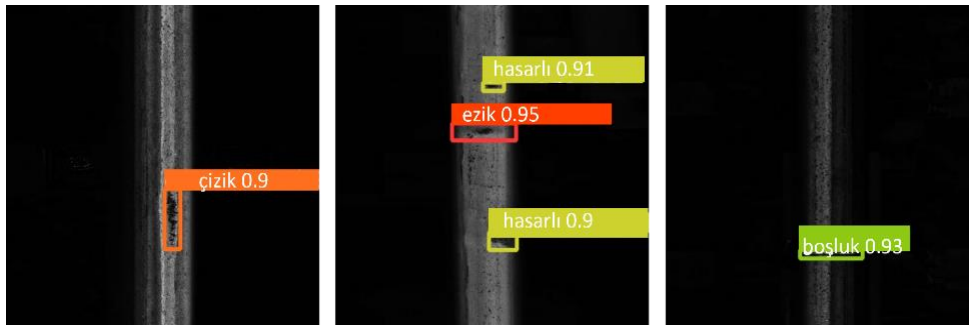
Çalışmada YOLOv5 modelinin alt mimarileri nesne tespiti için kullanılmıştır. Bunlar; YOLOv5s, YOLOv5n, YOLOv5m, YOLOv5l'dir. Şekil 11'de YOLOv5s alt mimarisine ait eğitim ve doğrulama grafikleri görülmektedir.



Şekil 11. YOLOv5s mimarisinin eğitim ve doğrulama sonuçları

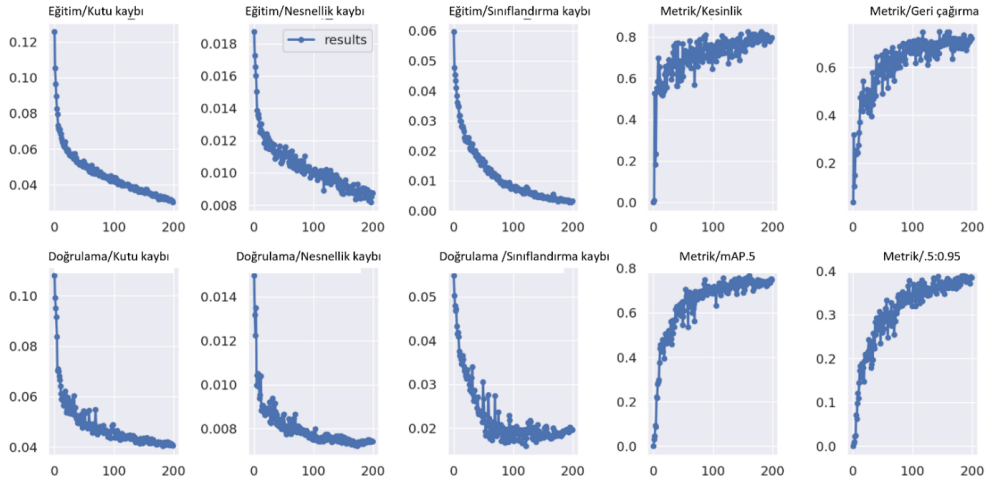
YOLOv5s alt mimarisi eğitimi sonucunda 0,7555 mAP.5 değeri yakalamıştır. Ayrıca 0,744 kesinlik, 0,742 geri çağırma oranı elde etmiştir.

Eğitim sonucunda elde edilen ağırlık ile test edilen ray kusuru içeren görüntüleri görsel ortama aktardığımızda Şekil 12'deki görüntüler elde edilmiştir.



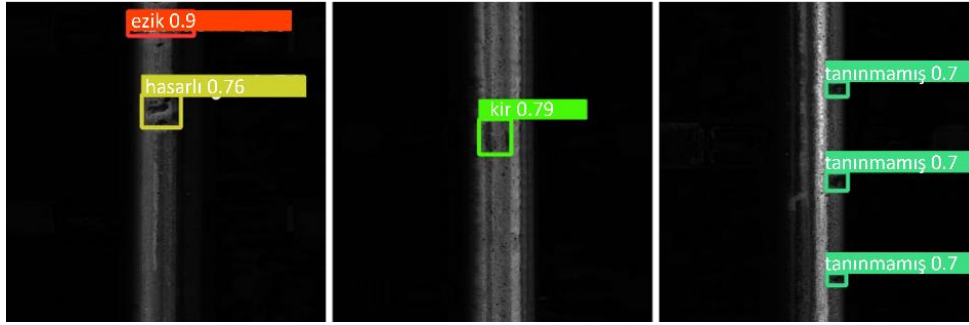
Şekil 12. YOLOv5s alt mimarisinin test sonuçları

Şekil 13'te YOLOv5n alt mimarisine ait eğitim ve doğrulama grafikleri görülmektedir.



Şekil 13. YOLOv5n alt mimarisinin eğitim ve doğrulama sonuçları

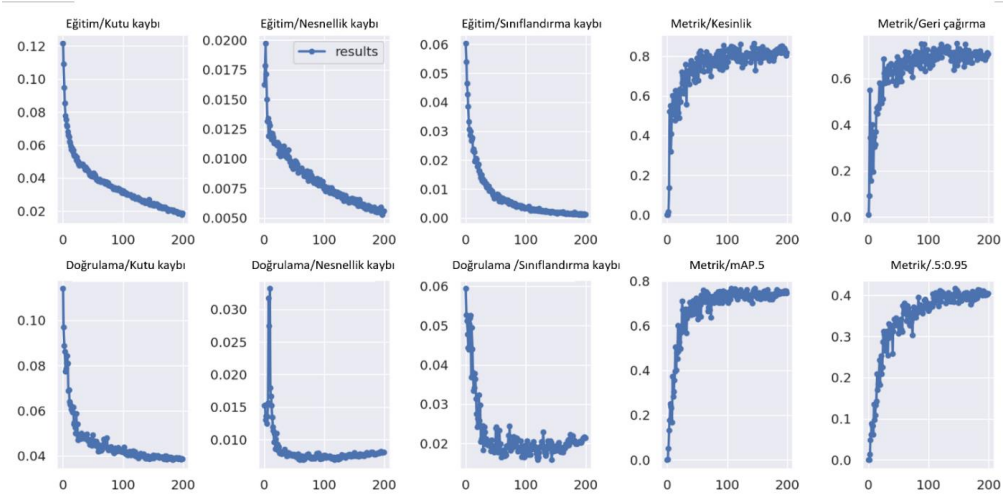
YOLOv5n alt mimarisinin eğitimi sonucunda elde edilen ağırlık ile test edilen ray kusuru içeren görüntüleri görsel ortama aktardığımızda Şekil 14'teki görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 14. YOLOv5n alt mimarisinin test sonuçları

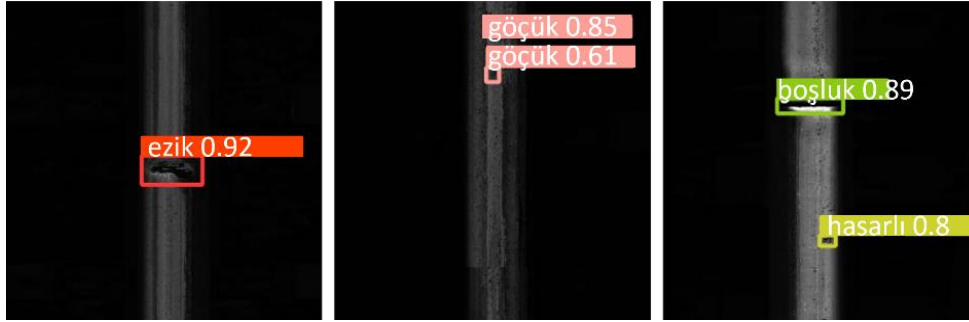
YOLOv5n alt mimarisi eğitimi sonucunda 0,755 mAP.5 değeri yakalamıştır. Ayrıca 0,794 kesinlik, 0,704 geri çağırma oranı elde etmiştir.

Şekil 15'te YOLOv5m alt mimarisine ait eğitim ve doğrulama grafikleri görülmektedir.



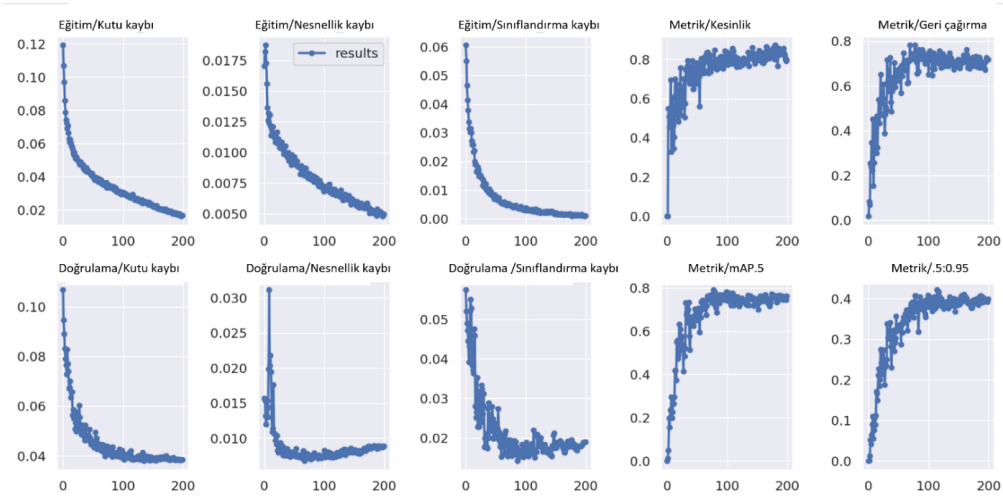
Şekil 15. YOLOv5m mimarisinin eğitim ve doğrulama sonuçları

YOLOv5m alt mimarisi eğitimi sonucunda 0,752 mAP.5 değeri yakalamıştır. Ayrıca 0,812 kesinlik, 0,68 geri çağırma oranı elde etmiştir. YOLOv5m alt mimarisinin eğitimi sonucunda elde edilen ağırlık ile test edilen ray kusuru içeren görüntüleri görsel ortama aktardığımızda Şekil 16'daki görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 16. YOLOv5m alt mimarisinin test sonuçları

Şekil 17'de YOLOv5l alt mimarisine ait eğitim ve doğrulama grafikleri görülmektedir.



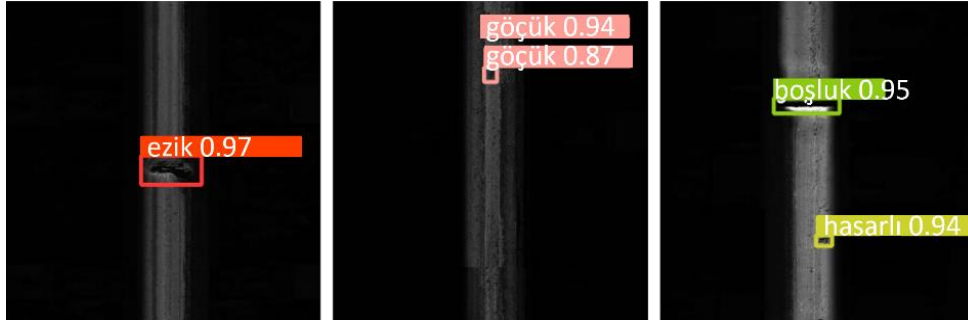
Şekil 17. YOLOv5l mimarisinin eğitim ve doğrulama sonuçları

YOLOv5l alt mimarisi eğitimi sonucunda 0,759 mAP.5 değeri yakalamıştır. Ayrıca 0,813 kesinlik, 0,723 geri çağırma oranı elde etmiştir. Tablo 1’de YOLOv4 ve YOLOv5 modellerinin eğitimi sonucu sınıf bazında elde edilen mAP.5 değerleri görülmektedir.

Tablo 1. YOLOv5m Alt Mimarisini Eğitim Sonucunda Sınıf Bazında Elde Ettiği mAP.5 Değerleri

| Kusur Çeşidi | YOLOv4 mAP.5 Değeri | YOLOv5s mAP.5 Değeri | YOLOv5n mAP.5 Değeri | YOLOv5m mAP.5 Değeri | YOLOv5l mAP.5 Değeri |
|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Ezik | 0,930 | 0,912 | 0,869 | 0,969 | 0,922 |
| Göçük | 0,650 | 0,688 | 0,797 | 0,722 | 0,794 |
| Çizik | 0,770 | 0,832 | 0,786 | 0,829 | 0,800 |
| Eğik | 0,680 | 0,728 | 0,842 | 0,681 | 0,730 |
| Hasarlı | 0,380 | 0,349 | 0,253 | 0,325 | 0,327 |
| Kir | 0,600 | 0,712 | 0,718 | 0,712 | 0,719 |
| Boşluk | 1,000 | 0,995 | 0,977 | 0,990 | 0,979 |
| Tanınmamış | 0,830 | 0,821 | 0,799 | 0,786 | 0,805 |

YOLOv5l alt mimarisinin eğitimi sonucunda elde edilen ağırlık ile test edilen ray kusuru içeren görüntüleri görsel ortama aktardığımızda Şekil 18’deki görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 18. YOLOv5l alt mimarisinin test sonuçları

Tablo 2’de YOLOv5 alt mimarilerinin doğrulama performansları ve topluluk modelleme ile elde edilen doğrulama performansları görülmektedir. Topluluk modelleme, eğitim sonucu elde edilen ağırlıkların doğrulama performanslarının mAP.5 değerlerini yukarıya çektiği görülmektedir.

Tablo 2. YOLOv5 Modelleri ile Topluluk Modelleme Yönteminin Doğrulama Performansları

| Model | P | R | mAP.5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| YOLOv5n | 0.794 | 0.704 | 0.756 |
| YOLOv5s | 0.744 | 0.742 | 0.753 |
| YOLOv5m | 0.812 | 0.68 | 0.752 |
| YOLOv5l | 0.875 | 0.716 | 0.783 |
| YOLOv5n+ YOLOv5s+ YOLOv5m+ YOLOv5l | 0.843 | 0.763 | 0.809 |
| YOLOv5s+ YOLOv5m+ YOLOv5l | 0.849 | 0.751 | 0.811 |

3.3. YOLOv6 sonuçları

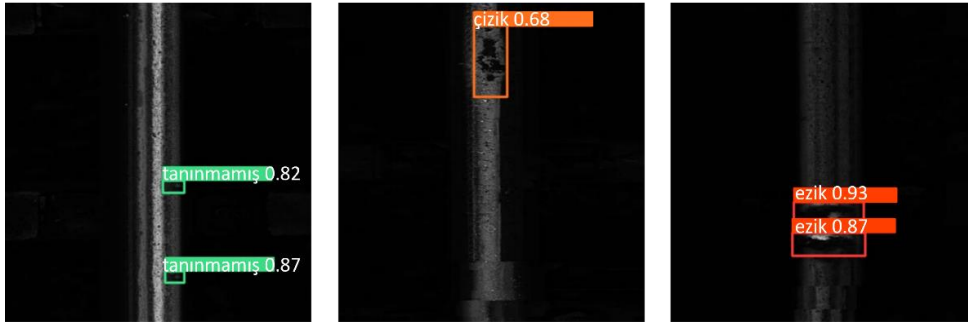
Çalışmada YOLOv6 modelinin alt mimarileri olan YOLOv6s, YOLOv6n ve YOLOv6t veri setini eğitmek için kullanılmıştır. Kullanılan alt YOLOv6 alt mimarilerinin eğitim sonuçları Tablo 3’te görülmektedir. Tablo 3’te görüldüğü gibi artan girdi boyutu ray üzerindeki kusurların tespiti konusunda başarıyı arttırmıştır. mAP.5 değerindeki artış bunun ispatıdır. Şekil 19-24’te YOLOv6 alt mimarilerinin eğitim sonucu oluşturulan ağırlıkları kullanılarak elde edilen test sonuçları görülmektedir.

Tablo 3. YOLOv6 Alt Mimarisinin Eğitim Sonuçları

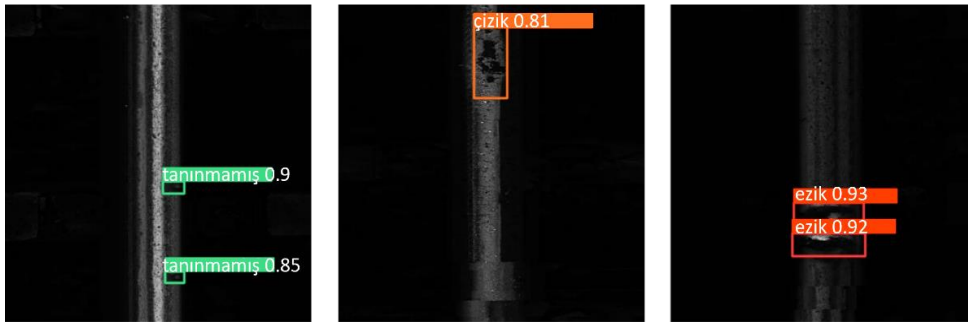
| Model | Girdi Boyutu | mAP.5 |
|---------|--------------|--------|
| YOLOv6s | 416 | 0.7074 |
| YOLOv6n | 416 | 0.7063 |
| YOLOv6t | 416 | 0.6858 |
| YOLOv6s | 640 | 0.7802 |
| YOLOv6n | 640 | 0.7473 |
| YOLOv6t | 640 | 0.7792 |



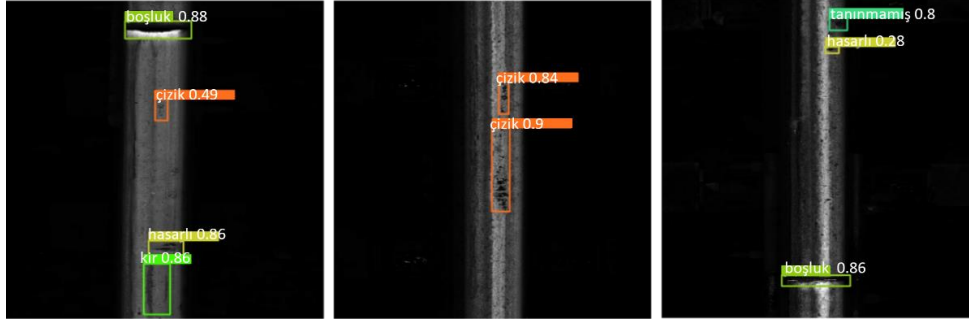
Şekil 19. 416x416 girdi boyutlu YOLOv6s alt mimarisinin test sonuçları



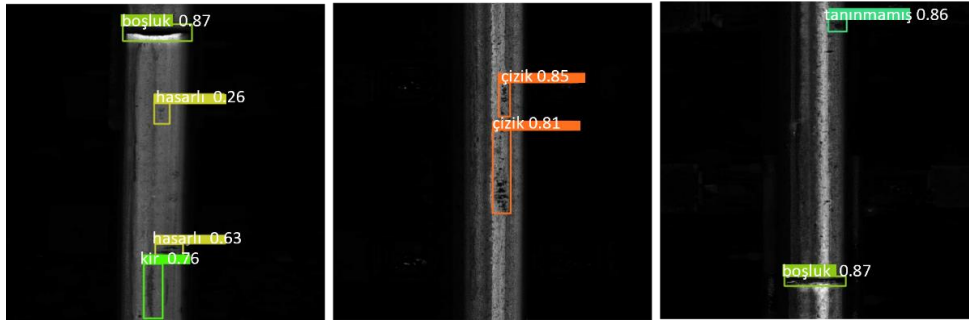
Şekil 20. 416x416 girdi boyutlu YOLOv6n alt mimarisinin test sonuçları



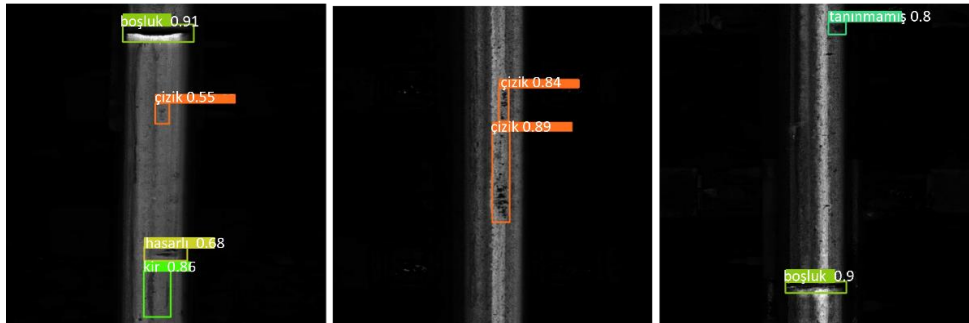
Şekil 21. 416x416 girdi boyutlu YOLOv6t alt mimarisinin test sonuçları



Şekil 22. 640x640 girdi boyutlu YOLOv6s alt mimarisinin test sonuçları



Şekil 23. 640x640 girdi boyutlu YOLOv6n alt mimarisinin test sonuçları



Şekil 24. 640x640 girdi boyutlu YOLOv6t alt mimarisinin test sonuçları

YOLOv4 modeli eğitim sonucunda 0,7338 mAP.5'lik oranı yakalamıştır. YOLOv5'in alt mimarileri YOLOv5n, YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l sırasıyla 0,7555, 0,755, 0,752, 0,752 mAP.5 oranı yakalamışlardır. YOLOv6'nın alt mimarisi olan YOLOv6s modeli girdi veri boyutunu attığımızda Tablo 3'te görüldüğü gibi 0.7802'lik mAP.5 oranı yakalamıştır. Çalışmada görüldüğü gibi YOLOv5 ve YOLOv6 modelleri YOLOv4'e göre daha başarılı sonuçlar vermişlerdir. İki modelin doğrulama performansları Tablo 4'teki gibidir. Doğrulama işlemi 90 adet görüntüyle yapılmıştır.

Tablo 4. YOLOv5 Modelleri ile Topluluk Modelleme Yönteminin Doğrulama Performansları

| Model | Görüntü Sayısı | Girdi Boyutu | mAP.5 |
|------------------------------------|----------------|--------------|-------|
| YOLOv5n | 939 | 416 | 0.756 |
| YOLOv5s | 939 | 416 | 0.753 |
| YOLOv5m | 939 | 416 | 0.752 |
| YOLOv5l | 939 | 416 | 0.783 |
| YOLOv5n+ YOLOv5s+ YOLOv5m+ YOLOv5l | 939 | 416 | 0.809 |

| | | | |
|---------------------------|-----|-----|-------|
| YOLOv5s+ YOLOv5m+ YOLOv5l | 939 | 416 | 0.811 |
| YOLOv6s | 939 | 416 | 0.734 |
| YOLOv6n | 939 | 416 | 0.702 |
| YOLOv6t | 939 | 416 | 0.704 |
| YOLOv6s | 939 | 640 | 0.770 |
| YOLOv6n | 939 | 640 | 0.738 |
| YOLOv6t | 939 | 640 | 0.785 |

Tablo 4'te görüldüğü gibi topluluk modelleme YOLOv5 alt mimarilerine ait doğrulama performanslarını arttırmıştır. YOLOv6 modelinde ise girdi veri boyutunu attırmak da doğrulama performansına pozitif etki yapmıştır. Buradaki dezavantaj ise eğitim süresinin artması olmuştur. Ortalama eğitim süresi 1,8 saatten 3,2 saate çıkmıştır. Çalışmanın bir diğer katkısı da literatürde demiryolu alandaki çalışmalarda YOLOv5 topluluk modelleme ve YOLOv6 yöntemleri fazla kullanılmamıştır. Tablo 5'te görüldüğü gibi önerilen topluluk modelleme yöntemi literatürdeki bazı yaklaşımlarla karşılaştırıldığında daha yüksek kesinlik ve geri çağırma değerleri elde etmiştir.

Tablo 5. YOLOv5 Topluluk Modelleme Yöntemi ile Literatürdeki Yaklaşımların Performans

| Karşılaştırması | | Görüntü Sayısı | P | R |
|-------------------|------------------------------------|----------------|-------|-------|
| Referans | Yaklaşım | | | |
| [25] | BSM | 195 | 0.278 | 0.726 |
| [25] | CTFM | 195 | 0.841 | 0.732 |
| [25] | REM | 195 | 0.039 | 0.472 |
| [26] | Yolov4 | 278 | 0.880 | 0.666 |
| [26] | ASFF-Yolov4 | 278 | 0.725 | 0.439 |
| Önerilen Metot-I | YOLOv5n+ YOLOv5s+ YOLOv5m+ YOLOv5l | 939 | 0.843 | 0.763 |
| Önerilen Metot-II | YOLOv5s+ YOLOv5m+ YOLOv5l | 939 | 0.849 | 0.751 |

4. Sonuç

Bu çalışmada, demiryolu hattından toplanan görüntülerden demiryolu rayı üzerindeki kusurların tespiti için YOLOv4, YOLOv5 ve YOLOv6 tabanlı bir yaklaşım önerilmektedir. 8 farklı ray kusuru içeren ve 399 görüntüden oluşan veri seti görüntü artırım işlemine tabi tutulmuştur. Bu görüntü artırım teknikleri görüntü çevirme, parlaklık ve gürültü ekleme işlemidir. Gürültü ekleme işlemi daha zor şartlarda modelin performansını ölçmeyi sağlamıştır. Eğitim işleminde 810 adet ray kusuru içeren görüntü kullanarak eğitim işlemi tamamlanmıştır. Doğrulama işlemi için 90 adet görüntü, test işlemi için 39 adet görüntü kullanılmıştır. Yüzde olarak belirtecek olursak eğitim için %86, doğrulama için %10 ve test içinde %4'lük veri seti ayrılmıştır. Topluluk modelleme yöntemiyle 8 adet farklı ray kusuru tespit eden YOLOv5 modeli %81 mAP.5, %84 kesinlik ve %75 geri çağırma oranı yakalamıştır. Ölçüm sonuçları önerilen modellerin rayların içerdikleri kusurları tespit etmede topluluk modelleme ve girdi verinin boyutunu arttırmanın başarımlarına etki ettiğini göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, 120E097 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] O. Yaman, Demiryolu Rayları İçin Gerçek Zamanlı Bulanık Otomata ile Görme Tabanlı Arıza Teşhis Sisteminin Geliştirilmesi, PhD Thesis, Fırat University, 2018.

- [2] C. Taştımur, M. Karaköse, E. Akın and İ. Aydın, "Rail defect detection with real time image processing technique," 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2016, pp. 411-415, doi: 10.1109/INDIN.2016.7819194.
- [3] D. Barke, & W. K. Chiu, "Structural Health Monitoring in the Railway Industry: A Review," *Structural Health Monitoring*, 2005, 4(1), 81–93.
- [4] D. Çetintaş, T. Tuncer, "Determining the type of document read using eye movement properties by hybrid CNN method," *Traitement du Signal*, vol. 39, No. 4, pp. 1099-1108, 2022, doi: 10.18280/ts.390402.
- [5] H. Feng, Z. Jiang, F. Xie, P. Yang, J. Shi and L. Chen, "Automatic Fastener Classification and Defect Detection in Vision-Based Railway Inspection Systems," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 4, pp. 877-888, 2014.
- [6] F. Guo, Y. Qian, and Y. Shi, "Real-time railroad track components inspection based on the improved yolov4 framework," *Automation in Construction*, 2021.
- [7] D. Zheng et al., "A Defect Detection Method for Rail Surface and Fasteners Based on Deep Convolutional Neural Network," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2021, p. e2565500, Aug. 2021, doi: 10.1155/2021/2565500.
- [8] Y. Xia, F. Xie and Z. Jiang, "Broken Railway Fastener Detection Based on Adaboost Algorithm," 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing, 2010, pp. 313-316, doi: 10.1109/ICOIP.2010.303.
- [9] H. Fan, P. C. Cosman, Y. Hou and B. Li, "High-Speed Railway Fastener Detection Based on a Line Local Binary Pattern," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 6, pp. 788-792, June 2018, doi: 10.1109/LSP.2018.2825947.
- [10] L. Shang, Q. Yang, J. Wang, S. Li and W. Lei, "Detection of rail surface defects based on CNN image recognition and classification," 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), pp. 45-51, 2018.
- [11] H. Yu et al., "A Coarse-to-Fine Model for Rail Surface Defect Detection," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 3, pp. 656-666, March 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2853958.
- [12] S. Yanan, Z. Hui, L. Li and Z. Hang, "Rail Surface Defect Detection Method Based on YOLOv3 Deep Learning Networks," 2018 Chinese Automation Congress (CAC), 2018, pp. 1563-1568, doi: 10.1109/CAC.2018.8623082.
- [13] Li H, Wang F, Liu J, Song H, Hou Z, et al. (2022) Ensemble model for rail surface defects detection. *PLOS ONE* 17(5), doi: 10.1371/journal.pone.0268518.
- [14] Shorten, C., Khoshgoftaar, T.M. A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. *J Big Data* 6, 60 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>.
- [15] A. Akdağ, Derin öğrenme algoritmaları kullanılarak gerçek zamanlı silah tanıma uygulaması, Master Thesis, Necmettin Erbakan University, 2017.
- [16] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 779-788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [17] E. Güçlü, İ. Aydın, K. Şahbaz, E. Akın ve M. Karaköse, "Demiryolu Bağlantı Elemanlarında Bulunan Kusurların YOLOv4 ve Bulanık Mantık Kullanarak Tespiti", *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 14, pp. 249-262, 2021, doi:10.47072/demiryolu.939830.
- [18] Z. Zakria, J. Deng, R. Kumar, M. S. Khokhar, J. Cai and J. Kumar, "Multiscale and Direction Target Detecting in Remote Sensing Images via Modified YOLO-v4," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 15, pp. 1039-1048, 2022, doi: 10.1109/JSTARS.2022.3140776.
- [19] YOLOv5 Custom Training. <https://github.com/ultralytics/yolov5/wiki/Train-Custom-Data> (accessed August. 8, 2022).
- [20] E. Güney, Sürücü asistan sistemleri için mobil gpu tabanlı gerçek zamanlı durum analizi ve tespit uygulamaları, Master Thesis, Sakarya University, 2021.
- [21] R. Xu, H. Lin, K. Lu, L. Cao, Y. Liu, "A Forest Fire Detection System Based on Ensemble Learning," *Forests*. 2021; 12(2):217, doi: 10.3390/f12020217
- [22] V. Kotu, B. Deshpande, "Chapter 2 - Data Science Process." ScienceDirect, Morgan Kaufmann, 2019.
- [23] G. Conley, S. C. Zinn, T. Hanson, K. McDonald, N. Beck, and H. Wen, "Using a deep learning model to quantify trash accumulation for cleaner urban stormwater," *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022.

- [24] R. Padilla, S. L. Netto and E. A. B. da Silva, "A Survey on Performance Metrics for Object-Detection Algorithms," 2020 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2020, pp. 237-242, doi: 10.1109/IWSSIP48289.2020.9145130.
- [25] H. Yu et al., "A Coarse-to-Fine Model for Rail Surface Defect Detection," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 3, pp. 656-666, March 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2853958
- [26] C. Zhang, X. Hu, J. He, N. Hou, "Yolov4 High-Speed Train Wheelset Tread Defect Detection System Based on Multiscale Feature Fusion", Journal of Advanced Transportation, vol. 2022, Article ID 1172654, 13 pages, 2022, doi: 10.1155/2022/1172654.

Özgeçmiş



Mehmet SEVİ

1988 yılında Denizli’de doğdu. Lisans derecesini Doğu Akdeniz Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde, Yüksek Lisans derecesini ise Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde aldı. Şu an Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde doktora öğrencisidir. Araştırma alanları arasında görüntü işleme ve derin öğrenme bulunmaktadır. Aynı zamanda Muş Alparslan Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığında mühendis olarak çalışmaktadır.
E-Posta: m.sevi@alparslan.edu.tr



İlhan AYDIN

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



Erhan AKIN

Erhan Akın, lisans derecesini Elazığ Fırat Üniversitesi’nden elektrik mühendisliği bölümünden 1984 yılında, yüksek lisans derecesini Elazığ Fırat Üniversitesi’nden bilgisayar mühendisliği bölümünden 1987 yılında ve doktora derecesini 1994 yılında Fırat Üniversitesi elektrik mühendisliği alanından almıştır. Halen Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde Profesör Doktordur. Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölüm başkanıdır. Araştırma ilgi alanları arasında yumuşak bilgi işlem, elektrik motoru sürücüler, bulanık kümeler ve sistemler, doğrusal olmayan kontrol sistemleri, hata teşhisi ve bilgisayar görüşü yer almaktadır.
E-posta: eakin@firat.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Bir Metro Hattında Yolcu Sayısına Bağlı Dinamiklerin Anahtarlamalı Sistem Olarak Modellenmesi ve Girişten Duruma Kararlılık Analizi

Berkin BİROL*^{ID}, Ali Fuat ERGENÇ^{ID}

*İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği
Bölümü, İstanbul, Türkiye*

*birolb@itu.edu.tr

(Alınış/Received: 14.11.2022, Kabul/Accepted: 23.12.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Bir ulaşım sisteminde bulunan istasyon ve araçlardaki yolcu sayıları ile sefer aralığı (ardışık iki araç arasındaki süre) arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Sefer aralıklarını azaltmak yolcu konforunu arttırsa da, işletme maliyetlerini arttırmaktadır. Bu nedenle iyi ayarlanmış bir sefer aralığı hem işletmeci hem de yolcular açısından önem kazanmaktadır. Sefer aralığının sağlıklı şekilde ayarlanması için iyi kurgulanmış bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Bir ulaşım sistemindeki yolcu dinamikleri bir aracın bir durağa yanaşıp yanaşmamasına göre değişkenlik gösterdiği için, bu sistemler anahtarlamalı sistem gibi davranırlar. Buna ek olarak, sefer aralığının güncellenmesi tüm istasyonları anında etkilemez. Güncelleme ilk istasyon dışındaki istasyonları bir zaman gecikmesi ile etkiler. Bu çalışmada, bir metro hattındaki yolcu sayıları anahtarlamalı sistem olarak modellenmiştir ve gerçek veriler ile MATLAB Simulink® yazılımında benzetimi yapılmıştır. Sistemin keyfi anahtarlama altındaki kararlılık analizi ortak Lyapunov fonksiyonları ve girişten duruma kararlılık yöntemleri kullanılarak yapıлып, benzetim sonuçları ile de doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Anahtarlamalı sistem, Girişten duruma kararlılık, Lyapunov kararlılığı, Metro, Sefer aralığı, Yolcu sayısı

Modelling a Metro Line as a Switched System and Performing Input-to-State Stability Analysis

Abstract: There is a linear relationship between the headway (the time distance between two consecutive vehicles) of the vehicles and the passenger quantities in stations in a public transportation system. Reducing the headway increases passenger satisfaction but increases operational costs. Therefore, an optimized headway is beneficial for both passengers and the operator. The passenger quantities in the line should be well-modelled to tune the headway efficiently. The passenger dynamics in a public transportation system behave like a switched system since the passenger dynamics differ if a vehicle is berthed to a station or not. Furthermore, updating the headway does not affect all stations instantaneously. The update in the headway affects stations other than the first station with a time delay. In this study, passenger quantities in a metro line have been modelled as a switched system and simulated in MATLAB Simulink®. The stability of the system under arbitrary switching has been analysed by using the common Lyapunov and input-to-state stability methods and verified by the simulation results.

Keywords: Switched system, Input-to-state stability, Lyapunov stability, Metro, Headway, Passenger quantity

1. Giriş

Metropoller nüfus artışları ve aldıkları göçler nedeniyle giderek daha kalabalık hale gelmektedir. Bu nedenle toplu taşıma sistemlerinin rolü; trafik sıkışıklıklarını azalttıkları, ulaşım konforu arttırdıkları ve hava kirliliğini azalttıkları için giderek artmaktadır [1]. Raylı ulaşım sistemleri güvenilirdir, trafik sıkışıklıklarından etkilenmezler ve diğer ulaşım alternatiflerine göre daha temiz enerji ile çalıştırılırlar [2]. Tüm bu avantajlarının bir sonucu olarak, raylı ulaşım sistemlerine, özellikle metrolara olan talep büyük şehirlerde artmaktadır [3].

Atıf için/Cite as: B. Birol, A.F. Ergenç, "Bir metro hattında yolcu sayısına bağlı dinamiklerin anahtarlamalı sistem olarak modellenmesi ve girişten duruma kararlılık analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 133-144, Jan 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1203693

Raylı ulaşım sisteminin başarılı olması iyi ayarlanmış bir zaman çizelgesine bağlıdır. Newell vd. [4] zaman çizelgelerini inceleyip istasyondaki toplam bekleme sürelerini hesaplamak için sürekli akışkan modellerini kullanmışlardır. Osuna vd. [5] bir toplu taşıma sistemindeki yolcuların bekleme sürelerini azaltmak için optimal kontrolden faydalanmışlardır ve bir ya da iki araçtan oluşan örnekleri çözüp problemin karmaşıklığına dikkat çekmişlerdir. Hurdle [6], [7] ise minimum maliyetli zaman çizelgelerini oluşturmak üzerine çalışmıştır ve problemi sıvı akışkan modeli gibi ele alıp trenleri hat üzerinde akan koltuklar olarak kabul etmiştir ve bu model ile sıkışık ve sıkışık olmayan zamanlar için işletme ve depolama maliyetlerini en aza indirmek üzerine çalışmıştır. Etkin bir zaman çizelgesi için raylı ulaşım sistemindeki blok mesafelerinin doğru hesaplanması önemlidir. Yıldırım [8] yüksek hızlı tren hatlarındaki blok mesafelerinin ayarlanması üzerine çalışmıştır ve kurulum ile bakım maliyetlerini de hesaba katarak yüksek hızlı tren hatlarında 7500 ile 10000 metre arasındaki blok mesafesinin uygun olacağını belirtmiştir.

Zaman çizelgelerinin ayarlanması günümüzde de popüler araştırma konularından biridir. Sun vd. [9] bir önceki haftanın talep verilerini kullanarak zaman çizelgelerinin haftalık olarak güncellenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır ve Singapur'da koşturdukları benzetimler ile modeli doğrulamışlardır. Şahin [10] ise trenin gelecekteki dakiklik/geç kalma gibi durumlarını tahmin edebilmek için Markov zincirleri, trenin ilk ve anlık durumunu kullanarak istatistikten yararlanmıştır. Xie vd. [11] stabil zaman çizelgesi ve enerji tasarrufu üzerine yoğunlaşmış ve zaman çizelgeleri ve duruş planlarını optimize etme üzerine bir model önermişlerdir. Önerdikleri modeli Şangay'daki yüksek hızlı tren hattında deneyip hem yolcu talebinin karşılandığı hem de enerji tüketiminin azaldığını doğrulamışlardır.

Hattaki aksamaların yönetilmesi de demiryolu zaman çizelgeleri için popüler bir çalışma konusudur. Aken vd. [12] tren zaman çizelgesi ayarlama problemi üzerine çalışmışlardır ve sorunun çözümü için karışık tamsayı programlama yöntemini kullanmışlardır. Demiryolu ağını bölüp ve kısa dönüş yapan trenler için dönüş aktivitelerini modelleyerek problemin boyutunu ve karmaşıklığını azaltmayı hedeflemişlerdir. Zhu ve Goverde [13], [14] trenlerin duruş davranışlarını esnek olarak değiştirmek ve her trenin kısa dönüş istasyonu aday sayılarını azaltmak için; iptal etme, yeniden sıralama ve yeniden zamanlama yöntemlerini birleştirerek karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli kurmuşlardır. Nielsen vd. [15] probleme farklı bir bakış açısı ile yaklaşmış, trendeki elektronik tartı ekipmanını kullanarak trendeki yolcu adetlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Sonuçlarını el ve kızılötesi sistem ile yapılan sayımlarla karşılaştırıp, önerdikleri modelin daha doğru sonuç verdiğini işaret etmişlerdir. Li ve Zhu [16] ise, yolcu akışını modellemek için ayrık olay sistemi tekniğini kullanmış olup, yolcuların güzergâh seçimleri ve tren gecikmelerinin yolcu akış dağılımlarına olan etkilerini incelemişlerdir.

Anahtarlamalı sistemlerin tasarımı ve analizine yönelik son on yıllarda artan bir talep vardır [2]. Otomotiv endüstrisi, anahtarlamalı güç dönüştürücülerini, mekanik sistemlerin kontrolü ve biyolojik sistemler anahtarlamalı sistemlerin bazı uygulama noktalarındandır [17]–[19]. Anahtarlamalı sistemler, ayrık-zamanlı veya sürekli-zamanlı sistemlerin aralarındaki geçişin bir anahtarlama kuralı ile yönetildiği sistemler ailesidir [19], [20]. Chen vd. [21] anahtarlamalı sistem teorisini güç sistemlerinin özellikle hata durumlarındaki kararlılığını incelemek için kullanmıştır. Xu vd. [22] çalışmalarında anahtarlama maliyetlerini de hesaba katacak şekilde bir optimal anahtarlama işareti tasarımı üzerine çalışmışlardır. Ulaşım hatlarındaki yolcu değişimi bir araç – durak eşleşmesi olduğu ve olmadığı durumlarda farklı davranmaktadır. Modelin sabit kalmayıp belirli aralıklar ile değişiyor olması sistemin modellenmesi ve kontrolünde klasik kontrol yöntemlerinde sorunlar yaratmaktadır. Bu nedenle Birol ve Ergenç [2] bir metro ağındaki yolcu değişimini anahtarlamalı sistem olarak modellemişlerdir.

Günümüzde kullanılan son teknoloji otonom sürüş sistemleri sayesinde sabit zaman çizelgelerinin yerine esnek, talep ile güncellenebilen sefer aralıklarının uygulanması kolaylaşmıştır. Sefer aralığının en iyi şekilde belirlenmesi için yolcu sayılarının doğru bir modeline ihtiyaç vardır ve

model aynı zamanda beklenmedik bir bozucu etkiye neden olacak yüksek miktarda yolcu talepleri (ör. bir etkinlik sonrasında) nedeniyle sefer aralıklarının güncellenmesi için de kullanılabilir.

Bu çalışmada, bir metro hattındaki yolcu sayılarının modeli oluşturulmuştur. İki terminal ve yirmi altı ara istasyondan oluşan İstanbul'un M2 hattının benzetimi MATLAB Simulink®'te gerçekleştirilmiştir. Sistemin kararlılık analizi ortak Lyapunov fonksiyonu ve girişten-duruma-kararlılık yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Kararlılık analizinin doğrulanması için MATLAB Simulink®'te kurulan model ve Metro İstanbul'dan alınan veriler kullanılarak benzetimler oluşturulmuş ve analiz sonuçları ile doğrulanmıştır.

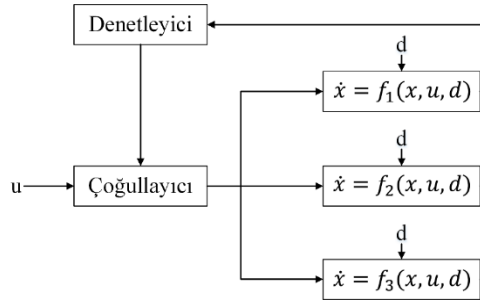
2. Metot

2.1. Anahtarlama sistemleri

Anahtarlama sistemleri; bir anahtarlama kuralı ile birbirleri arasındaki geçişin yönetildiği ve $x(t)$ 'nin durum, \dot{x} 'nin x 'in zamana bağlı türevi, $u(t)$ 'nin kontrol girişi, $y(t)$ 'nin çıkış, $v(t)$ ve $\omega(t)$ 'nin bozucu gibi harici işaretler ve σ 'nin anahtarlama işareti seti olarak ifade edildiği, Denklem 1. ve Denklem 2.'deki gibi gösterilen alt sistemler ailesidir [19], [20], [23].

$$\dot{x}(t) = f_{\sigma}(x(t), u(t), v(t)), \quad x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

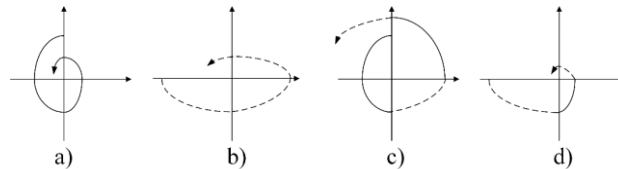
$$y(t) = g_{\sigma}(x(t), \omega(t)) \quad (2)$$



Şekil 1. Anahtarlama sisteminin şematik görünümü ([18]'den uyarlanmıştır)

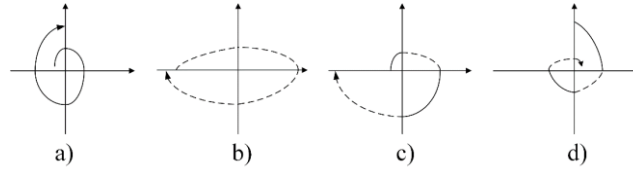
Alt sistemler arasındaki geçiş, denetleyici tarafından üretilen parçalı sürekli olan σ işareti ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 1.). $\sigma(t) = k$ olduğu durumda, sadece k numaralı alt sistem $f_k(x, u, d)$ aktif olmaktadır. Anahtarlama işareti zamana, önceki değerlerine, durum/çıkış değişkenlerine ya da harici işaretlere bağlı olabilir.

2.2. Anahtarlama sistemlerinin kararlılığı



Şekil 2. Alt sistemleri kararlı olan anahtarlama sistemi ([20]'den uyarlanmıştır)

Bir anahtarlama sistemi, tüm alt sistemlerinin kararlı olduğu durumda (Şekil 2. a, Şekil 2. b) uygun seçilmeyen anahtarlama işaretleri ile kararsız davranış da sergileyebilirken (Şekil 2. c) uygun anahtarlama işareti ile kararlı olabilir (Şekil 2. d). Benzer şekilde, bir anahtarlama sistemi tüm alt sistemlerinin kararsız olduğu durumda (Şekil 3. a ve Şekil 3. b) uygun seçilmeyen anahtarlama işaretleri ile kararsız davranış sürdürmeye devam ederken (Şekil 3. c), uygun anahtarlama işareti ile kararlı olabilir (Şekil 3. d).



Şekil 3. Alt sistemleri kararsız olan anahtarlamalı sistem ([20]'den uyarlanmıştır)

2.3. Ortak Lyapunov fonksiyonları

Sürekli türevlenebilir pozitif tanımlı bir $V: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ fonksiyonu pozitif tanımlı $W: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ fonksiyonu için Denklem 3.'te verilen eşitsizliği sağlıyorsa bu V fonksiyonu Denklem 1. ve Denklem 2.'de verilen sistem için ortak Lyapunov fonksiyonu olarak tanımlanır.

$$\frac{\partial V}{\partial x} f_p(x) \leq W(x) \quad \forall x, \quad \forall p \in P \quad (3)$$

Teorem: Bir anahtarlamalı sistem tüm alt sistemleri için ortak bir Lyapunov fonksiyonu olması durumunda, Global Üniorm Asimptotik Kararlı olarak tanımlanır.

2.4. Girişten duruma kararlılık (input-to state stability)

Kararlılık analizini bozucu girişlerini kapsayacak şekilde genişletmek ilgi çekici bir çalışma alanıdır. Bir sistem için $\gamma \in \mathcal{K}_\infty, \beta \in \mathcal{KL}$ fonksiyon seti ve her ilk durum (0) için Denklem 4. eşitsizliği sağlanıyorsa bu sistem d girişi için girişten duruma kararlıdır [20], [24].

$$|x(t)| \leq \beta(|x(0), t|) + \gamma(\|d\|_{[0,t]}) \quad \forall t \geq 0 \quad (4)$$

Teorem: Denklem 5.'te verilen bir anahtarlamalı sistem için eğer Denklem 6., Denklem 7. ve Denklem 8. eşitsizlikleri sağlanıyorsa sürekli türevlenebilir fonksiyonlar $V_p: \mathcal{R}^n \rightarrow [0, \infty), p \in P; \mathcal{K}_\infty$ fonksiyonlar $\alpha_1, \alpha_2, \gamma$ ve sabitler $\lambda_0 > 0, \mu \geq 1$ olmak üzere $\forall \xi \in \mathcal{R}^n, \eta \in \mathcal{R}^l$, ve $\forall p, q \in P$ için ortalama yavaşma süresi $\tau_a > \ln(\mu/\lambda_0)$ koşulu ile girişten duruma kararlıdır [25].

$$\dot{x} = f_p(x, d) \quad (5)$$

$$\alpha_1(\|\xi\|) \leq V_p(\xi) \leq \alpha_2(\|\xi\|) \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_p}{\partial x} f_p(x, u) \leq -\lambda_0 V_p(\xi) + \gamma(\|\xi\|) \quad (7)$$

$$V_p(\xi) \leq \mu V_q(\xi) \quad (8)$$

3. Bulgular

3.1. Matematiksel model

Metro sistemindeki yolcu sayısının takibi için duraklardaki ve trenlerdeki yolcu sayılarının değişimi modellenmiştir [2]. $d_i(t)$ i numaralı istasyondaki yolcu adedi fonksiyonu, $d_{i_g}(t)$ i numaralı istasyona turnikeler ile gelen yolcu adedi fonksiyonu, $p_j(t)$ j numaralı trendeki yolcu sayısı fonksiyonu, k_{i_g} i numaralı istasyonu trene binmeyerek terk eden yolcuların oranı, k_{i_b} i numaralı istasyonda trene binen yolcuların oranı, k_{i_i} i numaralı istasyona yavaşan trenden inen yolcuların oranı ve τ_t trenden inen yolcuların istasyonu terk etme süresi olmak üzere, bir i istasyonundaki yolcu değişimi Denklem 9.'daki gibi modellenmiştir.

$$\dot{d}_i(t) = d_{i_g}(t) - k_{i_g}d_i(t) - k_{i_b}d_i(t) + k_{i_i}p_j(t) - k_{i_i}p_j(t - \tau_t) \quad (9)$$

Denklem 9.'daki eşitlik " $-k_{i_b}d_i(t) + k_{i_i}p_j(t) - k_{i_i}p_j(t - \tau_{terk})$ " kısmı sadece bir tren istasyona yanaştığı süre boyunca anlamlı olacağı için her t koşulunda geçerli değildir. Bu nedenle, sistem Denklem 9.'daki gibi i numaralı istasyona bir tren yanaşmış ve Denklem 10.'daki gibi i numaralı istasyona bir tren yanaşmamış olarak tanımlanabilen iki alt sistemden oluşmaktadır.

$$\dot{d}_i(t) = d_{i_g}(t) - k_{i_g}d_i(t) \quad (10)$$

Trenlerdeki yolcu sayılarının değişimleri de benzer şekilde olmaktadır. Denklem 11.'deki gibi j numaralı tren bir istasyona yanaşmadığında yolcu değişimi olmaz iken, Denklem 12.'deki gibi trenin bir istasyona yanaşması ile yolcu değişimi gerçekleşir.

$$\dot{p}_j(t) = 0 \quad (11)$$

$$\dot{p}_j(t) = k_{i_b}d_i(t) - k_{i_i}p_j(t) \quad (12)$$

Aynı zamanda anahtarlama sinyali olan i numaralı istasyona j numaralı trenin yanaşma sinyali $\delta_{i,j}(t)$ Denklem 13.'teki gibi oluşturulmuştur. Trenin ilk istasyondan i numaralı istasyona ulaşma süresi τ_i , birinci istasyondan başlayacak olan herhangi bir sefer aralığı güncellemesinin i numaralı istasyona etki etmesi için gerekli zaman gecikmesidir. j numaralı trenin i numaralı istasyondan k 'inci kez ayrılma zamanı için $t_{j+m(k-1)}$ gösterimi kullanılmıştır.

$$\delta_{i,j}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \delta(t - t_{j+m(k-1)} - \tau_i) \quad (13)$$

i numaralı istasyona bir trenin yanaşmadığı durum için Denklem 10. ve Denklem 11. kullanılarak durum uzayı gösterimi $x_i(t)$ durum vektörü, $\omega(t)$ bozucu vektörü, A_1 ve E uygun boyutlu katsayı matrisleri olmak üzere Denklem 14.'te verildiği gibi yazılabilir.

$$\dot{x}_i(t) = A_1x_i(t) + E\omega(t) \quad (14)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -L_i & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{(m+1) \times (m+1)} ; x_i(t) = \begin{bmatrix} d_i(t) \\ p_1(t) \\ \vdots \\ p_m(t) \end{bmatrix}_{(m+1) \times 1} ; E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{(m+1) \times 1} \quad (15)$$

$$\omega(t) = d_{i_g}(t) \quad (16)$$

i numaralı istasyona bir trenin yanaşmadığı durum için Denklem 9. ve Denklem 12. kullanılarak ve trenden inen yolcuların durağı anında terk ettikleri kabulü yapılarak durum uzayı gösterimi A_m uygun boyutlu katsayı matrisi olmak üzere Denklem 17.'de verildiği gibi yazılabilir.

$$\dot{x}_i(t) = A_mx_i(t) + E\omega(t) \quad (17)$$

$$A_m = \begin{bmatrix} -k_{i_g} - k_{i_b} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \Psi_1 & -\Lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ \Psi_2 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \Psi_m & 0 & \dots & 0 & -\Lambda_m \end{bmatrix}_{(m+1) \times (m+1)} \quad (18)$$

$$\Psi_m = \begin{cases} k_{i_b} & \delta_{i,j} = 1 \\ 0 & \delta_{i,j} \neq 1 \end{cases}, \Lambda_m = \begin{cases} k_{i_i} & \delta_{i,j} = 1 \\ 0 & \delta_{i,j} \neq 1 \end{cases} \quad (19)$$

i numaralı istasyonu ifade edecek olan anahtarlamalı sistem Denklem 21.'deki anahtarlama işareti ile Denklem 20.'deki gibi yazılır.

$$\dot{x}_i(t) = A_{\sigma(t)}x(t) + E\omega(t) \quad (20)$$

$$\sigma_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \delta_{(i,1)} = \delta_{(i,2)} = \dots = \delta_{(i,m)} = 0 \\ 2 & \text{eğer } \delta_{(i,1)} = 1 \\ \vdots & \vdots \\ m+1 & \text{eğer } \delta_{(i,m)} = 1 \end{cases} \quad (21)$$

3.2. Kararlılık analizi

Bölüm 3 ve bölüm 4'te, bölüm 3.1'de matematiksel modeli ve durum uzayı gösterimi verilen sistemin kararlılık analizi yapılmaktadır.

3.3. Bozucunun olmadığı durumda kararlılık analizi

Toplam i adet istasyon ve j adet trenden oluşan anahtarlamalı sistem iki alt sistemden oluşmaktadır: bir trenin bir istasyona yanaştığı alt sistem ve herhangi bir trenin istasyona yanaşmadığı alt sistem. Bir istasyona aynı anda sadece bir tren yanaşabilir, bu nedenle A_1 ve A_2 matrisleri Denklem 22.'deki gibi yazılabilirler.

$$A_1 = \begin{bmatrix} -k_{i_g} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} -k_{i_g} - k_{i_b} & 0 \\ k_{i_b} & k_{i_i} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Denklem 22.'de verilen sistem için ortak P matrisi adayı ve ortak Lyapunov fonksiyon adayı $V(x)$ Denklem 23.'teki gibi seçilmiştir.

$$P = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix}, \quad V(x) \triangleq x^T P x = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{10}x_2^2 \quad (23)$$

Hem trende hem de istasyonda yolcu bulunmaması sistemin denge noktası olarak seçilmiş olup, i numaralı istasyon için $x_i^* = 0$ olarak belirlenmiştir. Denklem 23.'te seçilmiş olan Lyapunov fonksiyonu denge noktası olan $x_i^* = 0$ koşulunda $V(0) = 0$ olmakta iken, Denklem 24.'te görüldüğü gibi $V(x)$ karesel bir fonksiyon olduğu için diğer tüm durumlarda pozitif olmaktadır.

$$V(x^*) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{10}x_2^2 = 0, \quad V(x) > 0 \forall x \neq x^* \quad (24)$$

Lyapunov kararlılığı için üçüncü koşul olan $\dot{V}(x) \leq 0$ tüm alt sistemler için sağlanmalıdır. İstasyonu terk eden yolcuların oranı pozitif olduğu için ($0 \leq k_{i_g} \leq 1$) Denklem 25. ilk alt sistem olan trenin yanaşmadığı durum için koşulu sağlamaktadır.

$$\dot{V}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ 0,2x_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -k_{i_g} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = -k_{i_g}x_1^2 \leq 0 \quad (25)$$

İkinci alt sistem için inceleme yapıldığında görülmektedir ki, Denklem 30. koşulu geçerli olduğunda $\dot{V}(x) \leq 0$ sağlanmaktadır.

$$\dot{V}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ 0,2x_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -k_{i_g} - k_{i_b} & 0 \\ k_{i_b} & -k_{i_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\dot{V}(x) = -a^2 - bx_1^2 - cx_2^2 \quad (27)$$

$$a = k_{i_b}x_1 - 0,1x_2; \quad b = k_{i_g} + k_{i_b} - k_{i_b}^2 \quad (28)$$

$$c = 0,2k_{i_i} - 0,01; \quad k_{i_i} \geq 0,05 \Leftrightarrow cx^2 \geq 0 \quad (29)$$

$$V(x) \leq 0 \Leftrightarrow k_{i_i} \geq 0,05 \quad (30)$$

M2 hattı için sadece turnike giriş verileri bulunduğu için iniş oranları binme yoğunlukları üzerinden hesaplanmıştır ve en düşük inme oranına %9 ile sahip olan Darüşşafaka için Denklem 30. koşulu sağlandığı için sistem global asimptotik kararlıdır.

3.4. Bozucunun olduğu durumda kararlılık analizi

Bozucuların olduğu durumun kararlılığının incelenmesinde bölüm 2.4'te verilen Vu ve Chatterjee'nin [25] teoreminden faydalanılmıştır. Denklem 23.'teki gibi seçilen ortak Lyapunov fonksiyonu için alttan ve üstten sınırlayıcı fonksiyonlar olan $\alpha_1(\|\xi\|)$ ve $\alpha_2(\|\xi\|)$ fonksiyonları Denklem 33. ve Denklem 34.'teki gibi bulunur.

$$|x_2| \leq |x_1| \Rightarrow \frac{\|x\|^2}{4} \leq \frac{(x_1^2 + x_1^2)}{4} = \frac{1}{2}x_1^2 \leq V(x) \quad (31)$$

$$|x_1| \leq |x_2| \Rightarrow \frac{\|x\|^2}{20} \leq \frac{(x_2^2 + x_2^2)}{20} = \frac{1}{10}x_2^2 \leq V(x) \quad (32)$$

$$\alpha_1(\|\xi\|) = \min\left(\frac{\|\xi\|^2}{4}, \frac{\|\xi\|^2}{20}\right) = \frac{\|\xi\|^2}{20} \quad (33)$$

$$V(x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{10}x_2^2 \leq \frac{1}{2}\|x\|^2 \Rightarrow \alpha_2(\|\xi\|) = \frac{1}{2}\|\xi\|^2 \quad (34)$$

Girişten duruma kararlılığın ikinci koşulu iki alt sistem için de irdelenmelidir. İki sistem için de bozucu işaret olarak sisteme dışarıdan gelen yolcuları temsil edecek şekilde $d = \omega(t)$ alınmıştır. İlk olarak trenin bir istasyona yanaşmadığı durum incelenmiştir. $\dot{V}_1(x) \leq 0$ eşitsizliğini sağlayacak $|x|$ koşulu Denklem 38.'de hesaplanmıştır.

$$\dot{V}_1(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f_1(x, u) = -k_{i_g}x_1^2 + x_1d \quad (35)$$

$$\dot{V}_1(x) = -(1 - \theta)k_{i_g}x_1^2 - \theta k_{i_g}x_1^2 + x_1d \leq 0, \quad 0 < \theta < 1 \quad (36)$$

$$\dot{V}_1(x) \leq 0 \Leftrightarrow -\theta k_{i_g}x_1^2 + x_1d \leq 0 \quad (37)$$

$$-\theta k_{i_g}x_1^2 + x_1d \leq 0 \Rightarrow x_1d \leq \theta k_{i_g}x_1^2 \Leftrightarrow |x_1| \geq \frac{|d|}{k_{i_g}\theta} \quad (38)$$

Trenin yanaşmadığı durumda trenle istasyon arasında herhangi bir yolcu değişimi bulunmadığı için, trendeki yolcu sayısı, x_2 , sıfır olarak alınmış ve $\rho_1(r)$ Denklem 39.'daki gibi oluşturulmuştur.

$$\|x\| \geq \frac{|d|}{k_{i_g}\theta} \Rightarrow \rho_1(r) = \frac{|r|}{k_{i_g}\theta} \quad (39)$$

Denklem 34. kullanılarak $\|x\|^2 \geq 2V(x)$ yazılabilir ve $\dot{V}_1(x)$ 'in λ_1 ve $V(x)$ ile olan ilişkisi Denklem 41.'deki gibi verilir. Böylece trenin yanaşmadığı durum için λ_1 değeri bulunmuş olur.

$$\dot{V}_1(x) \leq -(1 - \theta)k_{i_g}x_1^2 \leq \underbrace{-2k_{i_g}(1 - \theta)}_{\lambda_1} V(x) \quad (40)$$

$$\dot{V}_1(x) \leq -\lambda_1 V(x); \quad \|x\| \geq \rho_1(d) \quad (41)$$

Trenin yanaştığı durum için olan λ_2 değeri de hesaplanmalıdır. a, b, c değerleri Denklem 28. ve Denklem 29.'daki gibi alınırsa $\dot{V}_2(x)$ Denklem 42.'deki gibi yazılır ve Denklem 43. elde edilir.

$$\dot{V}_2(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f_2(x, u) = -a^2 - bx_1^2 - cx_2^2 + x_1 d \leq 0 \quad (42)$$

$$\dot{V}_2(x) \leq -bx_1^2 - cx_2^2 + x_1 d \leq 0 \quad (43)$$

$\theta \in (0,1)$ için Denklem 44. ve Denklem 45. yazıldığında Denklem 45. koşulunun sağlanması için Denklem 46. veya Denklem 48. koşullarının sağlanması gerekmektedir.

$$\dot{V}_2(x) \leq -(1 - \theta)(bx_1^2 + cx_2^2) - \theta(bx_1^2 + cx_2^2) + x_1 d \leq 0 \quad (44)$$

$$\dot{V}_2(x) \leq -\theta(bx_1^2 + cx_2^2) + x_1 d \leq 0 \quad (45)$$

$$\theta bx_1^2 + x_1 d \leq 0 \Rightarrow x_1 d \leq \theta bx_1^2 \Leftrightarrow |x_1| \geq \frac{|d|}{b\theta} \quad (46)$$

$$|x_1| < \frac{|d|}{b\theta} \Rightarrow \theta cx_2^2 + x_1 d \leq 0 \Rightarrow \theta cx_2^2 + \frac{|d|^2}{b\theta} \leq 0 \quad (47)$$

$$|x_1| < \frac{|d|}{b\theta} \Leftrightarrow |x_2| \geq \frac{|d|}{\theta\sqrt{bc}} \quad (48)$$

Denklem 46. veya Denklem 48. koşulları ile $\rho_2(r)$ Denklem 51.'deki gibi tanımlanır.

$$\|x\| \geq \sqrt{\left(\frac{|d|}{b\theta}\right)^2 + \left(\frac{|d|}{\theta\sqrt{bc}}\right)^2} = \frac{|d|}{b\theta} \sqrt{\frac{b+c}{c}} \quad (49)$$

$$\dot{V}_2(x) \leq -(1 - \theta)(bx_1^2 + cx_2^2) \quad \forall \|x\| \geq \rho_2(d) \quad (50)$$

$$\rho_2(r) = \frac{r}{b\theta} \sqrt{\frac{b+c}{cb}} \quad (51)$$

$\Delta \triangleq (1 - \theta)(bx_1^2 + cx_2^2)$ dönüşümü kullanılarak analiz yapıldığında Denklem 52., Denklem 53. ve Denklem 54. yazılabilir.

$$|x_2| \leq |x_1| \Rightarrow \frac{b(1 - \theta)}{2} \|x\|^2 \leq b(1 - \theta)x_1^2 \leq \Delta \quad (52)$$

$$|x_1| \leq |x_2| \Rightarrow \frac{c(1 - \theta)}{2} \|x\|^2 \leq c(1 - \theta)x_2^2 \leq \Delta \quad (53)$$

$$\min(b, c) \frac{(1 - \theta)}{2} \|x\|^2 \leq \Delta \quad (54)$$

Denklem 54.'ü ve $V(x)$ için Denklem 34.'te verilen üstten sınırlamalı fonksiyonu kullandığımızda Denklem 50. ve Denklem 51.'de ifade edilen $\dot{V}_2(x)$, Denklem 55.'teki gibi yazılabilir ve λ_2 Denklem 56.'daki gibi bulunur.

$$\dot{V}_2(x) \leq -\Delta \leq -\underbrace{\min(b, c)}_k \frac{(1 - \theta)}{2} \|x\|^2 \leq -2kV(x); \quad \forall \|x\| \geq \rho_2(d) \quad (55)$$

$$\lambda_2 = (1 - \theta) \min\left(\left(k_{i_i} + k_{i_b} - k_{i_b}^2\right), (0, 2k_{i_i} - 0.01)\right) \quad (56)$$

$\dot{V}_p(x) \leq -\lambda V(x)$ için gerekli λ koşulu $\lambda = \max(\lambda_1, \lambda_2)$ olarak bulunur. $V(x)$, Denklem 20.'deki anahtarlamalı sistem için ortak bir Lyapunov fonksiyonu olduğu için $\mu = 1$ 'dir ve bu nedenle

Denklem 57.'de görüldüğü gibi anahtarlamalı sistem ortalama yanaşma süresi 0'dan büyük her sistem için karardır. Diğer bir deyişle, anahtarlamalı sistem Denklem 41. ve Denklem 50. koşulları sağlandığı sürece keyfi anahtarlama altında girişten duruma karardır.

$$\tau_a \geq \frac{\ln(\mu)}{\lambda} = 0 \quad (57)$$

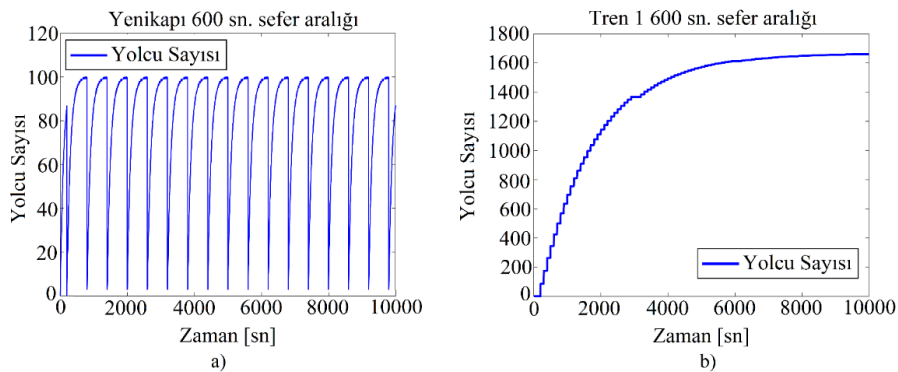
3.5. Benzetim sonuçları

Girişten duruma karardlık analizini doğrulamak için, Şekil 4.'te şematığı verilen on üç noktada yirmi altı ara istasyon ve iki adet terminal istasyondan oluşan İstanbul'daki M2 metro hattı seçilmiştir ve anahtarlamalı sistem MATLAB Simulink®'te modellenmiştir. Metro İstanbul'dan istasyonlara gelen saatlik yolcu sayıları edinilmiştir ve bu veri modele girdi olarak kullanılmıştır. İlk olarak sistemin karardlı olduğu koşullarda, sonrasında sınır koşullarında çeşitli benzetimler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. İstanbul'da Yenikapı – Hacıosman arasında hizmet veren M2 hattının şematığı

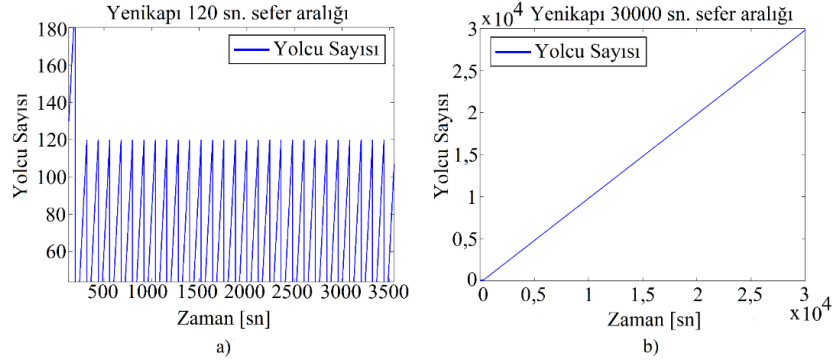
Yenikapı istasyonuna saniyede bir yolcu geldiği durumda sistem incelenmiştir. Şekil 5. a)'da $k_{ig} = 0,01$; $k_{ib} = 1$; $k_{ii} = 0,06$ koşulları altında 600 saniyelik sefer aralığında Yenikapı istasyonundaki yolcu sayıları, Şekil 5. b)'de ise 1 numaralı trendeki yolcu sayıları gösterilmektedir. Yenikapı istasyonundaki ve 1 numaralı trendeki yolcu sayılarının bu koşullar altında sınırlı kaldığı gözlenmektedir.



Şekil 5. $k_{ig} = 0,01$; $k_{ib} = 1$; $k_{ii} = 0,06$; 600 sn. sefer aralığı için a) Yenikapı istasyonundaki yolcu sayısı b) Tren 1'deki yolcu sayısı

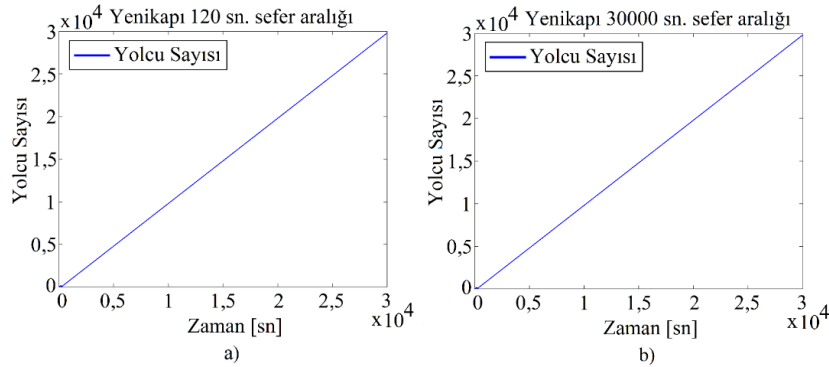
$k_{ig} = 0$ olduğunda Denklem 39.'un sağlanması için $\|x\| \rightarrow \infty$ olmalıdır. Şekil 6. a)'da $k_{ig} = 0$ iken saniyede bir yolcu geldiği durumda 120 sn. sefer aralığı için Yenikapı istasyonundaki yolcu sayıları görülmektedir. Şekil 6. b)'de ise sefer aralığının benzetim süresinin üzerine çıkartıldığı durumda Yenikapı istasyonundaki yolcu sayısının sınırsız şekilde arttığı gözlenmektedir. Sistem,

Denklem 39.'un sağlanmadığı $k_{i_g} = 0$ koşulunda 120 sn. sefer aralığında kararlıyken, sefer aralığı arttırılınca kararsızlığa doğru gitmektedir, dolayısıyla sistem keyfi anahtarlama altında girişten duruma kararlı değildir.



Şekil 6. $k_{i_g} = 0$ için Yenikapı istasyonu yolcu sayısı: a) 120 sn. sefer aralığı b) 30000 sn. sefer aralığı

$b = 0$ ($k_{i_g} = 0$ ve $k_{i_b} = 0$) yapılırsa Denklem 51.'in sağlanabilmesi için $\|x\| \rightarrow \infty$ olmalıdır. Şekil 7. a)'da bu koşullar altında 120 saniyelik sefer aralığında dahi duraktaki yolcu sayısının kararsızlığa gittiği görülmektedir. $b = 0$ olması için diğer bir koşul da $k_{i_g} = 0$ ve $k_{i_b} = 1$ olmasıdır. Bu koşullar altında da sistem anahtarlama süresi uzadıkça kararsızlığa gitmektedir (Şekil 7. b)).



Şekil 7. Yenikapı istasyonundaki yolcu sayısı a) 120 saniye sefer aralığı için $k_{i_g} = 0$ ve $k_{i_b} = 0$ koşulları b) 30000 saniye sefer aralığı için $k_{i_g} = 0$ ve $k_{i_b} = 1$ koşulları

MATLAB Simulink® benzetim sonuçları ile de doğrulandığı üzere, anahtarlama sistemi, Denklem 39. ve Denklem 51. koşulları sağlandığında 0'dan büyük herhangi bir anahtarlama sinyali için, yani keyfi bir anahtarlama için girişten duruma kararlıdır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bir metro hattında trenlerde ve istasyonlarda bulunan yolcu sayıları anahtarlama sistemi olarak modellenmiştir. Model; yolcu sayıları, tren hareket süreleri ve yanaşma süreleri gibi gerçek zamanlı dinamik veriler ile çalışma yeteneğine sahiptir. Bu nedenle, sistemdeki bozucuların benzetimlerini koşturma yönünden avantajlar sunmaktadır. Önerilen model sayesinde, herhangi bir anda sisteme dâhil olabilecek yüksek sayıdaki yolcular benzeri bozucuların neden olacağı talep dalgalanmalarını giderecek bir kontrolör tasarlanması mümkün olacaktır. Oluşturulan modelin kararlılık analizi hem ortak Lyapunov fonksiyonu hem de girişten duruma kararlılık yöntemleri ile sorgulanmıştır. Elde edilen kararlılık analiz sonuçları, MATLAB Simulink®'te oluşturulan modelin çeşitli benzetimleri ile doğrulanmıştır. Bu çalışmanın en

önemli katkısı, istasyonlar ve trenler arasındaki yolcu sayılarının değişiminin literatürdeki istatistikî veya yinelemeli yaklaşımlar yerine, matematiksel olarak modellenmesi ve oluşturulan matematiksel modelin kararlılık analizinin yapılmasıdır. Kararlık analizi için hem ortak Lyapunov fonksiyonları hem de girişten duruma kararlılık analizi yöntemleri seçilmiştir ve benzetim sonuçları ile kararlılık analizi çıktıları doğrulanmıştır. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda modelin başarımını doğrulamak için turnike verilerine ek olarak tren ve duraktan anlık yolcu bilgisi alınması ve oluşturulan modelin çıktıları ile karşılaştırılması hedeflenmektedir. Çalışmanın ortaya çıkış amacı olan sefer aralığını dinamik olarak sürekli ayarlayacak bir kontrolör tasarlanması ileride yapılması planlanan çalışmaların ana odağı olacaktır.

Kaynakça

- [1] S. I. J. Chien, "Optimization of headway, vehicle size and route choice for minimum cost feeder service," *Transp. Plan. Technol.*, 2005, doi: 10.1080/03081060500322565.
- [2] B. Birol and A. F. Ergenç, "A modelling and simulation study of a metro line as a time-delayed switched system," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol. 22, p. 100318, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100318>.
- [3] J. Fang, T. Fujiyama, and H. Wong, "Modelling passenger distribution on metro platforms based on passengers' choices for boarding cars," *Transp. Plan. Technol.*, 2019, doi: 10.1080/03081060.2019.1609218.
- [4] G. F. Newell, "Dispatching policies for a transportation route," *Transp. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 91–105, Mar. 1971, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/25767595>.
- [5] E. E. Osuna, and G. F. Newell, "Control strategies for an idealized public transportation system," *Transp. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 52–72, Mar. 1972, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/25767635>.
- [6] V. F. Hurdle, "Minimum cost schedules for a public transportation route: II. examples," *Transp. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 138–157, Mar. 1973, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/25767694>.
- [7] V. F. Hurdle, "Minimum cost schedules for a public transportation route: I. theory," *Transp. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 109–137, Mar. 1973, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/25767693>.
- [8] S. Yıldırım, "Yüksek Hızlı Tren Hatlarında Sinyalizasyon Blok Mesafelerinin Hesaplanması" *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı 14, Sayfa 14-25, Temmuz 2021.
- [9] L. Sun, J. G. Jin, D. H. Lee, K. W. Axhausen, and A. Erath, "Demand-driven timetable design for metro services," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 2014, doi: 10.1016/j.trc.2014.06.003.
- [10] I. Sahin, "Markov chain model for delay distribution in train schedules: Assessing the effectiveness of time allowances," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol. 7, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jrtpm.2017.08.006.
- [11] J. Xie, J. Zhang, K. Sun, S. Ni, and D. Chen, "Passenger and energy-saving oriented train timetable and stop plan synchronization optimization model," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 98, p. 102975, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.102975.
- [12] S. Van Aken, N. Bešinović, and R. Goverde, "Solving large-scale train timetable adjustment problems under infrastructure maintenance possessions," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol. 7, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jrtpm.2017.06.003.
- [13] Y. Zhu and R. Goverde, "Railway timetable rescheduling with flexible stopping and flexible short-turning during disruptions," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 123, pp. 149–181, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.trb.2019.02.015.
- [14] Y. Zhu and R. Goverde, "Dynamic and robust timetable rescheduling for uncertain railway disruptions," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jrtpm.2020.100196.
- [15] B. F. Nielsen, L. Frølich, O. Nielsen, and D. Filges, "Estimating passenger numbers in trains using existing weighing capabilities," *Transp. A Transp. Sci.*, vol. 10, Jul. 2014, doi: 10.1080/23249935.2013.795199.
- [16] W. Li and W. Zhu, "A dynamic simulation model of passenger flow distribution on schedule-based rail transit networks with train delays," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 3, no. 4, pp. 364–373, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.09.009>.
- [17] D. Liberzon and A. S. Morse, "Basic problems in stability and design of switched systems," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 19, no. 5, pp. 59–70, 1999, doi: 10.1109/37.793443.
- [18] A. S. Morse, *Control using logic-based switching*. Springer, London, 1997.
- [19] M. Mahmoud, *Switched time-delay systems: Stability and control*. Springer, New York, 2010.
- [20] D. Liberzon, *Switching in system and control*. Boston, Birkhäuser, 2003.

- [21] S. Chen, L. Jiang, W. Yao and Q. H. Wu, "Application of switched system theory in power system stability," 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2014.6934651.
- [22] W. Xu, L. Yu, G. Lin and Z. G. Feng, "Optimal switching signal design with a cost on switching action", *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 16, no. 5, pp. 2531-2549, 2020, doi: <https://doi.org/10.3934/jimo.2019068>
- [23] Z. Sun and S. Ge, *Switched linear systems: Control and design*. London, Springer, 2005.
- [24] E. Sontag, "Smooth stabilization implies coprime factorization," *Autom. Control. IEEE Trans.*, vol. 34, pp. 435-443, May 1989, doi: 10.1109/9.28018.
- [25] L. Vu, D. Chatterjee, and D. Liberzon, "Input-to-state stability of switched systems and switching adaptive control," *Automatica*, vol. 43, no. 4, pp. 639-646, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.10.007>.

Özgeçmiş



Berkin BİROL

Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Mühendisliği'nde 2007 yılında, yüksek lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği'nde 2010 yılında tamamlamış olup, aynı bölümde doktora eğitimine devam etmektedir. Raylı Ulaşım Sistemleri Enstitüsü'nde Kıdemli Başuzman Araştırmacı olarak çalıştığı TÜBİTAK'ta 2009 yılından itibaren demiryolu sinyalizasyon sistemleri geliştirilmesi, sertifikasyonu ve yaygınlaştırılması projelerinde görev almaktadır. Demiryolu sinyalizasyonu, emniyet kritik sistemler, ölü zamanlı sistemler, anahtarlamalı sistemler ve Petri ağları konularında araştırmalarını sürdürmektedir.

E-Posta: birolb@itu.edu.tr

Ali Fuat ERGENÇ

Lisans ve yüksek lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği'nde sırasıyla 1999 ve 2001 yıllarında; doktora eğitimini University of Connecticut Makine Mühendisliği'nde 2007 yılında tamamlamıştır. 2009 yılından beri İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği'nde tam zamanlı öğretim üyesidir. Sabancı Üniversitesi ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'da yarı zamanlı öğretim üyesi olarak ders vermektedir. IEEE, TOK ve SIAM üyesidir. Biyomekatronik, kontrol teorisi ve uygulamaları, sensörler, otomasyon ve nesnelerin interneti alanlarında çalışmaktadır.

E-Posta: ali.ergenc@itu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Berkin BİROL: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Görselleştirme, Yazılım, Kaynaklar, Yazma. Ali Fuat ERGENÇ: İnceleme, Kontrol, Doğrulama.



Demiryolu Sinyalizasyon Sistemi İçin Hibrit Bir RAMS Değerlendirme Yöntemi

Özgür Turay KAYMAKÇI^{*1}, İsmail YAKIN², Mehmet Turan SÖYLEMEZ³

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

² Alstom Transport, FAST Metro HQ, Riyadh, Saudi Arabia

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*okaymakci@comu.edu.tr

(Alınış/Received: 12.12.2022, Kabul/Accepted: 05.01.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Demiryolu teknolojisinin gelişmesiyle birlikte emniyet ve konfor kavramları hiç olmadığı kadar önem kazanmıştır. Bu kapsamda yapılan sistem mühendisliği Güvenilirlik, Emre Amadelik, Bakım Yapılabilirlik ve Güvenlik (RAMS) analizleri ile işletilen sistemin güvenilir, elverişli, sürdürülebilir ve emniyetli bir şekilde işletilmesi garanti altına alınmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmada hata modları etkileri analizi ve hata ağacı analizi olmak üzere iki farklı analiz yöntemi birlikte kullanılmıştır. İşletmesel hedefleri tehdit eden tüm tehlikeleri kabul edilebilir seviyeye çekmeyi hedefleyen bir risk değerlendirme yöntemi ortaya koyulmuştur. Önerilen bu yaklaşım İstanbul'da işletilen Mescidi Selam bölgesi sinyalizasyon sistemi üzerine uygulanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda tramvay hatlarında kullanılan sabit blok sinyalizasyon sistemlerine ilişkin hatalar ve nedenleri açığa çıkartılmıştır. Ayrıca trenin raydan çıkması tehlikesi için yöntem detaylı bir şekilde işletilmiş ve nicel olarak riskin seviyesi ifade edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sinyalizasyon, RAMS analizi, risk değerlendirme, FMEA, FTA

A Hybrid RAMS Evaluation Method for Railway Signalization System

Abstract: The concept of safety and comfort has become more important than ever with the development of railway technology. In this context, it is tried to guarantee that the system can be operated in a reliable, convenient, sustainable and safe way with the RAMS analysis conducted within the scope of system engineering. In this study, two different analysis methods, namely failure mode and effects analysis and fault tree analysis, were used together. A risk assessment method has been introduced that aims to reduce all hazards that threaten operational objectives to an acceptable level. This proposed approach has been applied to the Mescidi Selam signalling system operated in Istanbul. As a result of this study, the errors and their causes of fixed block signalling systems used in tram lines were expressed.

Keywords: Signalling, RAMS analysis, risk assessment, FMEA, FTA

1. Giriş

Demiryolu organizasyonları diğer ulaşım metotlarına kıyasla kendine özgün kriterleri olan ve rekabet etme avantajları açısından yaygın bir araştırma konusu olmuşlardır. Bunun neticesi olarak demiryolu organizasyonları, emre âmedelik, güvenilirlik, etkin maliyet, ileri teknolojilerin uygulama ve yönetimleri konusunda yenilikçi gelişmeler için yeniden yapılandırma süreci içerisine girmişlerdir. Örneğin, taşımacılıkta kademeli olarak serbestleşme ve denetimleri azaltma, işletme ile altyapının birbirinden ayrılmasına, modlar arası rekabetin ortaya çıkmasına ve birlikte işletilebilirliğinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur [1], [2].

Raylı ulaşım sektöründe sürdürülebilirlik kavramının bir sonucu olarak güvenilirlik, emre âmedelik ve maliyet etkinlik son yıllarda kritik öneme sahip konulardan birisi gelmiştir öyle ki sektörde sisteminin yüksek güvenlik, emre âmedelik ve maliyet etkinliğinin sürekli olarak geliştirilmesi ve

Atıf için/Cite as: Ö.T. Kaymaç, İ. Yakın, M.T. Söylemez, "Demiryolu sinyalizasyon sistemi için hibrit bir RAMS değerlendirme yöntemi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 145-160, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1216606

takip edilmesi beklenmektedir. Bu noktada demiryolu işletmeleri kendi demiryolu tasarım ve geliştirme projelerinde bazı özel mühendislikler ortaya koymuşlardır. Örneğin, sistem mühendisliğiyle beraber RAMS yönetimi, birçok demiryolu işletmesi tarafından ilk proje aşamasından itibaren güvenlik, emre âmedelik ve maliyet etkinlik gibi mühendislik kavramlarını yerleştirmek için kullanılmıştır.

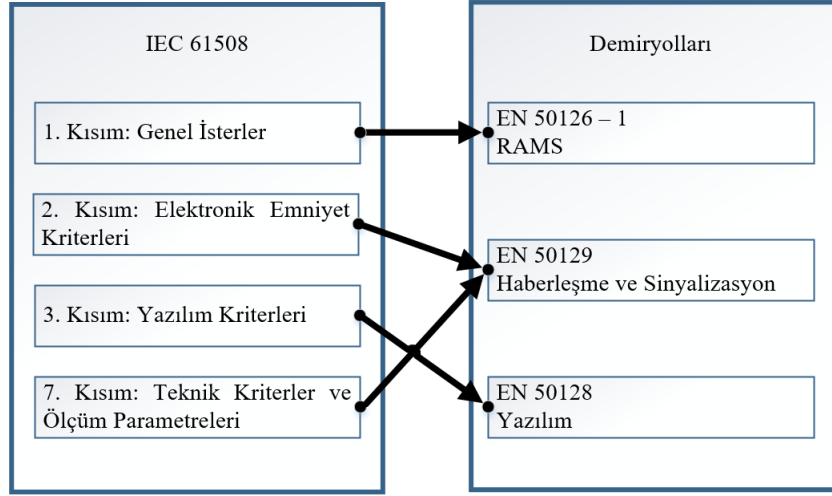
RAMS yönetimi güvenilirlik, emre âmedelik, sürdürülebilirlik ve emniyet özelliklerini sistem mühendisliği süreçleriyle birleştirerek bir öz sistem tasarım özelliği ortaya koymaya yarayan ve belirlenen demiryolu tarifesiyle başarıyla sağlamaya çalışan bir mühendislik alanıdır. Son yıllarda, belirlenen bir demiryolu tarifesi zamanında, güvenli ve maliyet etkin bir şekilde yerine getirmek hızla gelişen bir mühendislik alanı haline gelmiştir. Ayrıca bu alan, demiryollarının diğer ulaşım sektörleri ile rekabetini sürdürebilmesi için kritik bir öneme sahip olmuştur. Bu sebeple, RAMS yönetimi bugünün küresel demiryolu sektöründe hem uygulama hem de araştırma alanında önde gelen konu başlıklarından birisi olmuştur.

Zhang vd. [3] güvenilirliği arızanın frekansı ve hattın topolojisine göre tanımlar iken demiryolu ağı güvenlik indeksi tanımlamışlardır öyle ki bu indeks tren istasyonlarının ve bölümlerinin güvenliğini ölçmek için ve kümeleme yöntemini kullanmıştır. Diğer taraftan Sitarz vd. [4] demiryolu taşımacılığındaki operasyonel riski değerlendirmek için hata modu etkileri analizini kullanmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda Polonya Demiryolu Taşımacılık Departmanı güvenlik kapsamında kabul edilen risk için onay değerini güncellemiştir. Ayrıca RAMS kapsamında ilgili departmanın oluşturduğu bazı model formlar güncellenmiştir. Qiu vd. [5] ise RAMS süreçlerinde en sıklıkla yaşanan problemlerden bir tanesi olan bilgi ve verilerin eksikliğinden veya belirsizliğinden kaynaklanan durum belirsizliğinin varlığında sistemlerin emre amadeliğini hesaplayabilmek için orijinal bir benzetim yaklaşımı önermişlerdir. Diğer taraftan başka bir çalışmada ise raylı ulaşım sistemlerinde giderek daha fazla elektronik, programlanabilir ve veri tabanı sistemlerine geçişin bir sonucu olarak artan açık veri iletişim sistemlerinin kullanılmasından kaynaklı açığa çıkabilecek riskler demiryolu teknolojisindeki dâhili riskler olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda olası istenmeyen olaylar ve RAMS demiryolu standartları tarafından tanımlanan tehditler arasındaki ilişkiler referans alınarak iletişimi etkileyen farklı türdeki tehlikeli olayları analiz edilmiştir [6]. Bir diğer çalışmada raylı sistem performansının belirlenmesinde LCC ve RAMS yaklaşımlarını birleştirerek demiryolu hatları için yeni bir temel performans göstergesi tanımlanmıştır. Bu yeni temel performans göstergesi için yenilikçi algoritmalar tanımlanmış, balastlı ve balastsız hatlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir [7]. Bu çalışmada niteliksel olarak belirlenen risklerin niceliksel olarak değerlendiren hibrit bir risk analiz yöntemi geliştirilmiştir öyle ki bu yöntem EN 50126 ile tam uyumludur. Bunun sonucunda demiryolu projeleri kapsamında yürütülen sistem mühendisliği hizmetlerinde etkin bir şekilde kullanılabilir.

2. Demiryolunda RAMS Yönetimi

Demiryolu RAMS standartları, Şekil 1'de belirtildiği gibi IEC 61508 standardına dayanarak geliştirilmiştir öyle ki ilgili standart elektrik, elektronik ve programlanabilir elektronik sistemlerle ilgili güvenlik yönetimi tanımlayan şemsiye standarttır [8].

Bu kapsamda CENELEC tarafından 3 adet demiryolu RAMS yönetimi standardı geliştirilmiştir ve bunlar Şekil 1'de belirtildiği gibi IEC 61508 şemsiye standardına dayanmaktadır [9]. EN 50126-1 ile ilk defa 1999 yılında demiryolu RAMS yönetimi temel prensipleri ve uygulaması olarak yayınlanmıştır [10]. EN 50128, demiryolu sistemi içeren sistemlerin çalışması, sinyalizasyonu ve iletişimde kullanılan yazılımlar için geliştirilmiş olan RAMS yönetimi standardıdır ve 2008'de geliştirilmiştir [11]. Diğer taraftan EN 50129 ise demiryolu sinyalizasyon sistemleri donanımları ile ilgili RAMS yönetimi standardıdır ve 2003'te ilk olarak yayınlanmıştır [12]. Bu RAMS yönetimi standartları her 5 yılda bir revize edilmektedir.



Şekil 1. Demiryolu standartları

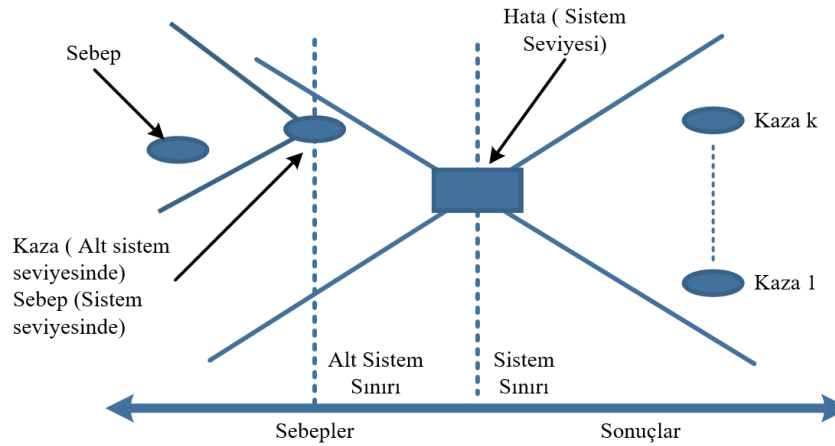
2.1. Risk değerlendirme kavramı

Risk belirleme, sistem mühendisliği ve RAMS yönetiminin temel kısmını oluşturur. Risk, bir hata durumunun sonuçları olarak tanımlanır. Risk belirleme, RAMS yönetimi sürecinin temel parçasıdır ve RAMS yönetiminin uygulanması için temel oluşturur. Aşağıda risk kavramı için iki tanım bulunmaktadır:

- Risk, getireceği sonuçların vahametinin ve götürülerinin beklenen gerçekleşme sıklığının birleşimidir [13].
- Risk, seviyesine göre ortaya çıkan olumsuz etkilerdir.

Genellikle riski nitelik ve nicelik olarak tanımlamak için aşağıdaki 4 madde gereklidir. Şekil 2’de bu 4 maddenin ilişkisi verilmiştir [12].

- Potansiyel hatanın temel sebepleri
- Hata modu
- Götürüleri ya da etkileri
- Olma olasılığı

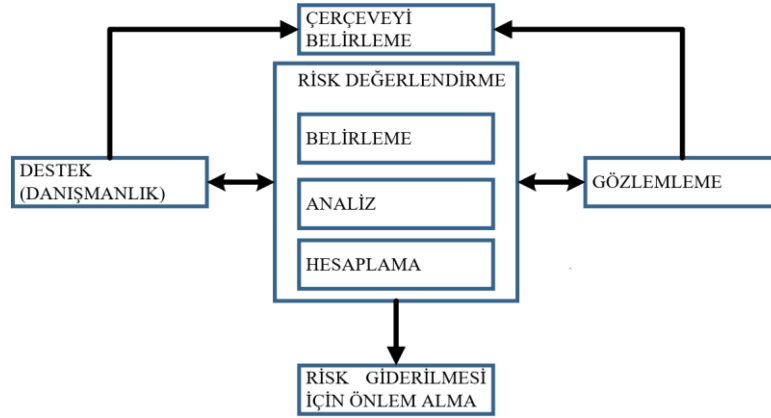


Şekil 2. Risk tanımlama diyagramı

Risk değerlendirme, bir riski nitelik ve/veya nicelik açısından, tanımlama belirleme ve değerlendirme sürecidir. Risk değerlendirme genelde şu sorulara yanıt arar:

- i. Riski tanımlar, ne meydana gelebilir ve neden olabilir?
- ii. Sonuçların ciddiyetini tanımlamayı başarısızlık sebepleri nelerdir?
- iii. Başarısız olma sıklığını belirleyerek başarısız olma ihtimali nedir?
- iv. Risk değerlendirme teknikleri uygulayarak risk seviyesi nedir ve tahammül edilebilir yada kabul edilebilir mi? Yoksa ayrıca kontrol gerekli mi?

Yukarıdaki sorulara cevap arayabilmek için sistemdeki bütün potansiyel zararları tanımlamak, belirlemek, analiz etmek ve değerlendirmek amacıyla Şekil 3'de görülen süreci takip etmek gerekir [14].



Şekil 3. Risk değerlendirme süreci

Risk değerlendirmesi; riski, sebeplerini, sonuçlarını ve olma ihtimalini derinlemesine anlamayı sağlayarak sistemlerin RAMS yönetiminde karar verme için imkân sağlar. Risk değerlendirmesi, ayrıca aşağıdaki beş konuda da RAMS yönetiminin başarıyla uygulanmasına imkân sağlar:

- i. Değişik riskler arasında değişik seçenekler arasında seçim yapmak,
- ii. Karar verme ve risk yönetim seçeneklerinin belirlenmesi için risk önceliklerinin belirlenmesi,
- iii. Uygun risk yönetim stratejilerinin seçilmesi,
- iv. Riski kontrol altına almak için, risk aktivitesinin belirlenmesi
- v. Kontrol edilecek olan risk seviyelerinin belirlenmesi.

2.2. Risk değerlendirme yöntemleri

Risk değerlendirme yöntemleri toplanan bilgi ve kaynakların ışığında risklerin belli bir sistematik çerçevesinde değerlendirmesini ve bu kapsamda risk seviyelerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Risk değerlendirme metodu genel grup ve özel grup olmak üzere ikiye ayrılır. Genel grup, analitik şartlar, bilgi ve kaynaklara göre, nitel, nicel ve yarı-nicel değerlendirme olarak üç ana kategoriye ayrılır. Özel grup ise sistem tasarım sürecinin analitik yönlendirilişine göre, tepeden tabana ve tabandan tepeye olmak üzere iki gruba ayrılır. Tepeden tabana değerlendirme, fonksiyonel tasarım aşamasında, tabandan tepeye değerlendirme ise fiziksel ürün tasarım aşamasında uygulanır [14].

Sistem mühendisliğinin tasarım aşamasında nitel değerlendirme metotları sıklıkla tanımlanan riskin genel seviyesini saptamak ve potansiyel muhtemel riskleri belirlemek ve tahmin etmek amacıyla ön risk değerlendirme olarak kullanılır. Bununla birlikte, nitel değerlendirme sistem

mühendisliğin her bir tasarım süreç aşamasında tanımlanmış risklerin yarı-nicel ya da nicel risk değerlendirilmesi için gerekli bir evre olabilir. Örneğin, FMEA nitel risk değerlendirme olarak uygun bir örnektir [15].

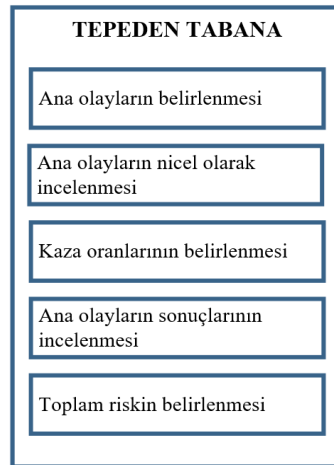
Nitel değerlendirme, fonksiyonel alt sistem tasarım aşamasında tüm muhtemel hata etkilerini tanımlamak ve güvenlik fonksiyonları oluşturmak için uygundur. Nicel veri kullanımı yerine böyle bir nitel yaklaşım, hata sonuçlarının sıklığını ve şiddetini ölçmek için sözel aralıklardan faydalanabilir. Genellikle felaket, kritik, marjinal ve önemsiz gibi dört sözel aralık hata şiddetini sınıflandırmak için kullanılır. Bununla birlikte sık, muhtemel, nadir, pek az ve muhtemel olmayan gibi beş sözel aralık da hata sıklığını sınıflandırmak için kullanılabilir [16].

Yarı-nicel risk değerlendirmesi yukarıda anlatılan nitel risk değerlendirmesine benzer olmakla birlikte, ondan daha geniş sıralama aralığı kullanır. Nitel metodların avantajlarından birçoğunu içerir. Bununla birlikte böyle bir metod, nitel metodlar kadar kesin ve hassas olmayabilir. Eğer bütüncül bir nitel değer mevcut değilse, nitel bilgiyi nicel ölçülere dönüştürmek için FMECA gibi risk değerlendirme metrikleri kullanan sıralama parametreleri kullanılabilir. FMECA yarı-nicel risk değerlendirme metodu olarak uygun bir örnektir [17].

Nicel risk değerlendirme metodu, sistem ve RAMS tasarımcılarına nicel ölçülerle sistem tasarım çözümlerinin alternatiflerini belirleme imkânı sağlamayı amaçlar. Nicel değerler riskleri anlamada, uygulamada ve karşılaştırmada çok önemli avantajlar sağlar. Bununla birlikte, nicel değerlendirme metodu istatistiksel analiz için veri ve teknikleri gerektirir.

Nicel metodun uygulanması tasarlanacak sistemin daha derin bir şekilde anlaşılmasını ve sistem tasarımını geliştirebilecek daha detaylı bilgi gerektirir. Hata ağacı analizi ve olay ağacı analizi yöntemleri nicel risk değerlendirme için uygun örneklerdir.

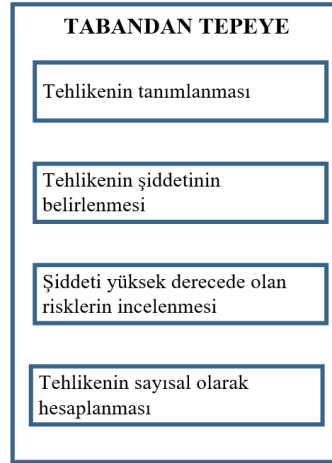
Tepeden tabana ve tabandan tepeye risk değerlendirme metodları, arıza etkilerinin sonuç senaryolarını tanımlamak ve analiz etmek için kullanılır. Metodun seçimi, eldeki veri ve bilgiye, risk değerlendirmesinin sözleşme seviyesine, değerlendirilecek sistemi oluşturan alt sistemlerin ve bileşenlerin ilişkilerinin karmaşıklığına ve sistemin teknik inovasyon seviyesine bağlıdır [14]. Şekil 4, geçmiş hata verisini kullanarak kök arıza sebeplerini ve istenilen düşük risk seviyesine inebilmek için arıza sebepleri arasında hiyerarşiyi tanımlayan tepeden tabana risk değerlendirme sürecini gösterir. Tepeden tabana risk değerlendirme tüm kök arıza sebepleri belirlenene kadar devam eder. Nicel ve nitel risk değerlendirmenin her ikisi de tepeden tabana değerlendirmede kullanılabilir fakat bunun için derin bir bilgi ve birçok geçmiş tecrübeye ihtiyaç vardır. FTA tepeden tabana risk değerlendirme metodu olarak uygun bir örnektir [15].



Şekil 4. Tepeden tabana risk değerlendirme süreci

Tabandan tepeye risk değerlendirme yaklaşımı Şekil 5’de gösterilmiştir. Tüm muhtemel hata modlarını tanımlamak için sistemin detaylı dağılımına ihtiyaç duyan tümevarımsal bir risk değerlendirme metodudur. Hata modları taban seviyeden tepe seviyeye doğru tanımlanır ve arıza sonuçlarının şiddeti ile arıza sıklığı değerlendirmesi yürütülür. Tabandan tepeye risk değerlendirmesi, tepeden tabana değerlendirmeye kıyasla aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- i. Hata modlarını ve sebeplerini kesin olarak analiz edebilir.
- ii. Bilgisayar programı ile kullanımı daha kolaydır.
- iii. Büyük ölçekli karmaşık sistemlerin risk değerlendirmelerinde kullanılmak için uygundur.



Şekil 5. Tabandan tepeye risk değerlendirme süreci

Risk değerlendirmesi için gerekli veri uygun bilgi kaynaklarından elde edilebilir. En yaygın bilgi kaynakları ve çeşitleri risk olasılığını hesaplamak için kullanılabilir. Bilgi, aşağıdaki kaynaklardan toplanabilir.

- i. Geçmiş arıza/kaza kayıtları (saha verisi)
- ii. Pratik ve konuyla ilgili veri (olay verisi)
- iii. Deneyler ve prototipler
- iv. Mühendislik ve diğer modeller
- v. Uzman yorumu, görüşü

Bu noktada risk değerlendirme tekniğinin seçilmesi önemlidir. EN 31010 ve EN 60300-3 risk değerlendirme tekniğini, risk değerlendirme süreç aşaması ve risk seviyesini etkileyen faktörler olarak tanımlamıştır. Buna göre Tablo 1 ve Tablo 2’de tipik risk değerlendirme teknikleri tahmini sonuçlarını özetlenmiştir. Tablo 1 tipik risk değerlendirme tekniklerinin risk değerlendirme sürecinde uygulanabilirliklerini gösterir iken Tablo 2 ise bu teknikleri sistemin risk seviyesini etkileyen üç faktöre göre açıklamaktadır.

Tablo 1. Temel risk değerlendirme teknikleri

| Teknik | Risk Tanımlama | Sıklık | Olasılık | Şiddet | Risk Ölçülmesi |
|--------|----------------|--------|----------|--------|----------------|
| FMEA | | | - | - | - |
| FTA | - | + | + | + | + |
| HAZOP | | | - | - | - |
| PHA | | - | - | - | - |
| ETA | - | | | + | - |
| RBD | | + | + | + | + |

(“+”: yönetime ait karakteristik özellik, “-“: yönetime ait olmayan özellik)

Tablo 2. Risk değerlendirme tekniklerinin hesaplanabilirliği

| Teknik | Kaynaklar | Belirsizlik Derecesi | Karmaşıklık | Nicelik Hesaplama |
|--------|-----------|----------------------|-------------|-------------------|
| FMEA | Orta | Orta | Orta | Orta |
| FMECA | Orta | Orta | Orta | Orta |
| FTA | Yüksek | Yüksek | Yüksek | Yüksek |
| HAZOP | Orta | Yüksek | Yüksek | Orta |
| RCM | Orta | Orta | Orta | Yüksek |
| PHA | Düşük | Yüksek | Orta | Düşük |
| ETA | Orta | Orta | Orta | Yüksek |
| RBD | Yüksek | Yüksek | Yüksek | Yüksek |

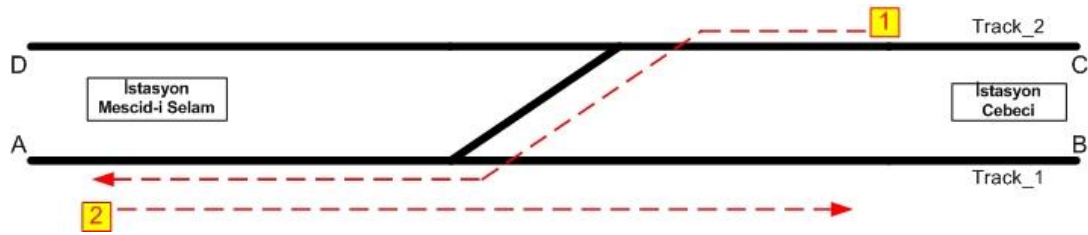
Birçok risk değerlendirme tekniği geliştirilmiş ve birçok farklı endüstride kullanılmıştır. Bununla birlikte, sistem mühendisliği tasarım aşamasında risk değerlendirme metotları ve tekniklerinin kullanımı ile ilgili bazı zorluklar da mevcuttur. Risk değerlendirmedeki bazı zorluklar aşağıda belirtilmiştir [18].

- Eldeki kaynaklar, veriler ve bilgiler çok sınırlıdır ve istatistiksel olarak yanlıştır.
- Sistem performansını etkileyen birçok tehdit, sistemin fonksiyonel davranışını değerlendirecek matematiksel modelin uygulanmasını zorlaştırır.
- Nicel risk değerlendirme, sistem tasarım analizinde asıl bir unsurdur fakat maliyetlidir ve doğru veri gerektirir. Dolayısıyla, risk değerlendirmesinin derinliğini ve kapsamını belirlemek oldukça zordur.
- Arıza sonuçlarının nicel risk değerlendirmesi yanlış veriden dolayı büyük belirsizlikler içerebilir.
- Nitel değerlendirme, birçok varsayım, tahmin, görüş ve yorumla birlikte birçok analitik tecrübeler gerektirir fakat değerlendirme sonuçları sıklıkla analiste bağlı olacak şekilde öznel olabilir.

3. Mescidi Selam Lokal Sinyalizasyon Sistemi Uygulaması

İstanbul'da işletilen T4 hattında cari işletme yapılan bölge Topkapı - Mescidi Selam İstasyonları arasında yaklaşık 14 km'lik bölgeyi kapsamaktadır. Mescidi Selam istasyonunun devamındaki bölge depo/atölye sahası olup bakım ve depolama alanı olarak kullanılmaktadır.

Bölgede tek yönde günlük yaklaşık 200 tren geçişi olmaktadır. Bu geçişlerin %90'ı Şekil 6'da belirtilen senaryoda gerçekleşmektedir.

**Şekil 6.** Ana işletme senaryosu

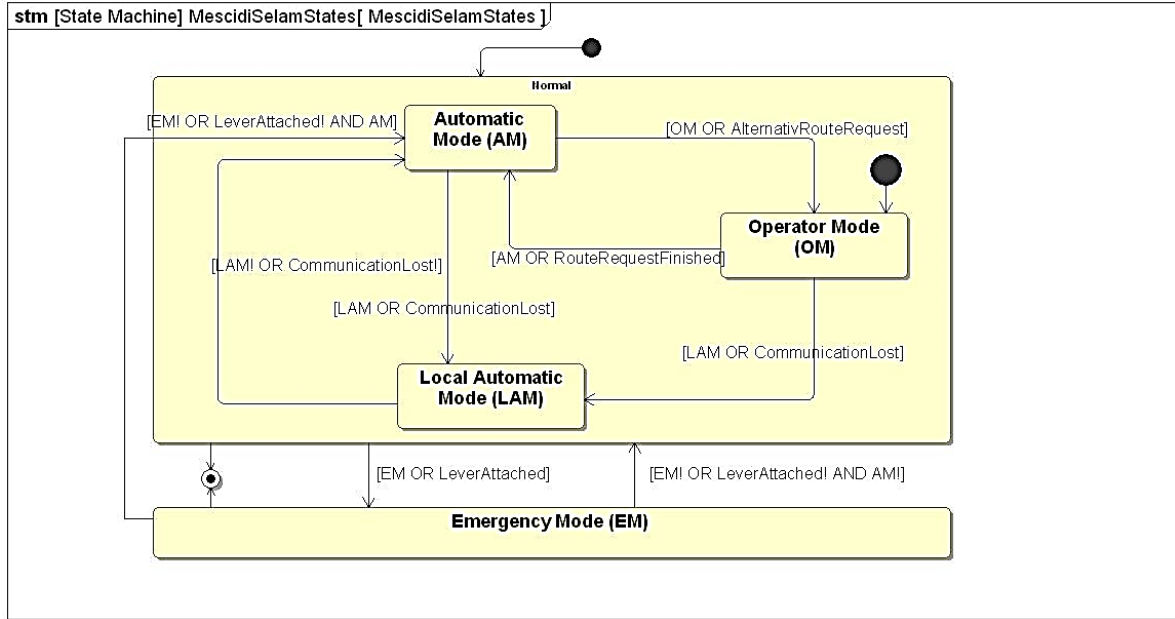
Bu çalışmada yukarıda kısa tanıtımı yapılan bölgede, EN 50126 standardı referans alınarak riskler tanımlanmış ve trenin yoldan çıkma riski incelenmiştir. Yukarıda tanıtımı yapılan ve şematik olarak gösterilen bölgeyi kontrol edecek olan sinyalizasyon sistemi dört farklı çalışma modunda çalışmaktadır. Bu modlar ve sistemde çalıştırılacak öncelik seviyeleri Tablo 3'de listelenmiştir.

Tablo 3. Sistem çalışma modları

| Çalışma Modu | Öncelik Seviyesi |
|----------------------------|------------------|
| Otomatik Çalışma Modu (AM) | 4 |

| | |
|-----------------------------------|---|
| Operatör Çalışma Modu (OM) | 3 |
| Lokal Otomatik Çalışma Modu (LAM) | 2 |
| Emniyet Modu (EM) | 1 |

Sistemin öncelik sırasına göre çalışma modları (düşükten yükseğe) yukarıda listelendiği gibi 4, 3, 2, 1 şeklinde tasarlanacaktır. Sistemin normal çalışma modu otomatik moddur. Sistem belirtilen tüm bu modlardan herhangi birisini aktive edemediği durumlarda kendisini emniyet moduna alacak ve hiçbir kontrol ve kumanda fonksiyonunu yerine getiremeyecektir. Tablo 3’de belirtilen tüm modlar kumanda merkezi tarafından yönetilecektir. Modlar arası geçiş şartları Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Mod geçişleri

3.1. Mescidi selam lokal sinyalizasyon sisteminin risk değerlendirmesi

Literatürde yapılan kritiklik analizlere göre %26,65 ile sinyalizasyon sistemleri ve %23,47 ile makas sistemleri en önemli sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır [19]. Bu noktada sinyalizasyon sistemleri ve bileşenlerinin sahip oldukları risklerin belirlenmesi ve seviyesinin tespit edilmesi çok önemlidir. Mescidi Selam lokal sinyalizasyon sistemine ait sistem ve alt sistem tablosu Tablo 4’de gösterilmektedir. Bu tabloda sistem bileşenlerine ait fonksiyonel tanımlar belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır.

Tablo 4. Sinyalizasyon sisteminin fonksiyonel tanımı

| No | Alt Sistem | No | Alt sistem | Fonksiyon Tanımı |
|----|-------------------|------|-----------------------------|---|
| A1 | Besleme Sistemi | A1.1 | 750V/24V DC besleme (PS24a) | 750 V DC gerilimi 24V DC'ye çevirmek. |
| | | A1.2 | 24/48V DC besleme (PS48) | Sinyallerin beslemesini sağlamak. |
| | | A1.3 | Topraklama Ünitesi (EU) | Aşırı gerilime karşı sistemi korumak |
| A2 | Anklaşman Sistemi | A2.1 | İşlemci (CPU) | Saha kontrol ve kumandasını sağlamak. |
| | | A2.2 | Giriş / Çıkış Modülü (IOM) | Tüm mantıksal giriş ve çıkışları işlemciye iletmek. |

| | | | | |
|----|-----------------------|-----------------------------------|--|---|
| | A2.3 | Haberleşme Modülü (CM) | HMI alt sistemi ile sürekli haberleşmeyi sağlamak. | |
| A3 | Makas Kontrol Modülü | A3.1 | Motor Tahrik Modülü (PDM) | Makas elektrik motorunu tahrik etmek. |
| | A3.2 | Konum İndikatörü (PI) | Makasın konumunu izlemek. | |
| A4 | Sinyal Kontrol Modülü | A4 | | Sinyal durumlarını izlemek. |
| A5 | Kullanıcı Arayüzü | A5.1 | Kumanda Merkezi (GUI) | Sistemin tesis edildiği bölgeyi uzaktan izlemek. |
| | A5.2 | Buton/Anahtar ve LED Sinyal (MMI) | | Makinist/bakımcı kullanıcısının sahadan sistemi yönetmelerini sağlamak. |

Tablo 4’de belirtildiği gibi besleme sistemi (PS) ana güç/besleme kaynağından gelen enerjiyi sistem içerisinde kullanılabilir seviyeye indirmek, LED aydınlatmaları için gerekli güçü sağlama ve sistemin aşırı gerilime karşı korunması için topraklama fonksiyonunu yerine getirmektedir.

Anlaşman sistemi (IS) ise sisteme ait tüm saha elemanlarını kontrol ve kumanda etmek, sahadan veya kullanıcıdan gelen mantıksal verileri değerlendirip sistemin emniyetli bir şekilde işletilebilmesini sağlamaktır. Bununla birlikte tren algılamasının emniyetli bir şekilde yapılması ve kumanda merkezi ile haberleşme sağlanması da yine bu alt sistemin fonksiyonlarındandır.

Makas kontrol modülü (PCM), makasların konumlarını değiştirmek yani hareket ettirmek ve makasların mevcut buldukları konumları izlemektir. Sinyal kontrol modülü (LCM) de benzer bir fonksiyona sahip olup, LED lambaların durumlarını sürekli takip ederek gerektiğinde enerjilendirilerek ışık vermesini sağlamaktadır.

Kullanıcı arayüzü (HMI) modülünde ise saha veya kumanda merkezindeki tüm kullanıcı arayüzleri bulunmaktadır. Bunlar sırası ile operatör bilgisayarı (kumanda merkezi yazılımı), yerel kontrol butonları ve LED lambalardır.

Tablo 5. Mescidi selam lokal sinyalizasyon sistemi işletme istatistikleri

| Olay | Olay Açıklaması | Değer | Birim |
|------|---|----------------|--------|
| X1 | Bir trenin bölgeyi meşgul etme oranı | $5,9.10^{-3}$ | - |
| X2 | Yazılımın SIL 2 olduğu kabulü altında hatalı yeşil ihtimali | $3,0.10^{-3}$ | - |
| X3 | Herhangi bir trenin bölgeden kırmızı ışıkta geçme ihtimali | $3,0.10^{-3}$ | - |
| X4 | Makas hareketinin standart sürede tamamlanamaması | $2,28.10^{-4}$ | 1/saat |
| X5 | Makas bölgesinde tren algılanamaması - aks sayıcı arızası | $5,71.10^{-6}$ | 1/saat |

Tablo 5’de bu sistemin kullandığı hatta ait işletmesel veriler bulunmaktadır. İlgili ekipmanlara ait işletme ve arıza istatistikleri referans alınarak Tablo 5 elde edilmiştir. Sistemin tesis edildiği bölgenin bir tren tarafından meşgul edilme oranı X1 ve sisteme ait anlaşman yazılımının hata sıklığı X2 ile ifade edilmiştir. Diğer taraftan ilgili bölgeden geçen trenlerin kırmızı ışık ihlali yapma oranı X3, makasın konum değiştirirken hareketini standart sürede tamamlayamaması durumu X4 ve son olarak ilgili bölgede tren algılanamaması durumu ise X5 ile ifade edilmiştir. Bu bilgiler ilgili birimlerin işletme ve arıza kayıtları referans alınarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada önerilen FMEA - FTA tabanlı risk analizi için EN 50126 standardına göre hata şiddet parametreleri Tablo 6’da verilmiştir. Ayrıca Tablo 7’de risk seviyesi parametreleri ve Tablo

8’de hata sıklık parametreleri verilmiştir. Son olarak bu tablolara göre tanımlanmış risk hesaplama matrisi ise Tablo 9’da aşağıda verilmiştir.

Tablo 6. Hata şiddet parametreleri

| Seviye | Şiddet Kategorisi | İşletmeye Etkisi |
|--------|-------------------|---|
| 4 | Yıkıcı | Sistemin 1 hafta devre dışı kalması - Trenin raydan çıkması |
| 3 | Kritik | Sistemin 1 gün devre dışı kalması - İşletme anında giderilemeyen hata |
| 2 | Düşük | Sistemin 1 saat devre dışı kalması - İşletme esnasında giderilebilen hata |
| 1 | Önemsiz | Sistemin 20 dk. devre dışı kalması - Anında müdahale ile giderilebilen hata |

Tablo 7. Risk seviyesi parametreleri

| Seviye | Risk Sınıfı (R) | Risk Kontrolü |
|--------|---------------------|--------------------------------|
| R1 | Kabul edilemez | Risk giderilmeli |
| R2 | Sakıncalı | Risk, mümkünse giderilmeli |
| R3 | Tahammül edilebilir | Risk kontrol altında tutulmalı |
| R4 | Önemsiz | Kabul edilebilir risk |

Tablo 8. Hata sıklık parametreleri

| Seviye | Kategori | Tanım | Sıklık (yıl başına) |
|--------|-----------|--|-----------------------|
| A | Sık | Büyük ihtimalle olması beklenen | 100’den büyük |
| B | Muhtemel | Birçok kez tekrarlanacak | 1 - 100 |
| C | Ara sıra | Birçok kez tekrarlanma ihtimali bulunan | 10^{-2} - 1 |
| D | Nadir | Sistem işletmede olduğu sürece birkaç kez olması beklenen | 10^{-4} - 10^{-2} |
| E | İmkânsız | Olma ihtimali bulunmayan ancak istisnai olarak olması beklenen | 10^{-6} - 10^{-4} |
| F | İnanılmaz | Olma ihtimali bulunmayan ve olmaması beklenen | 10^{-6} ’dan küçük |

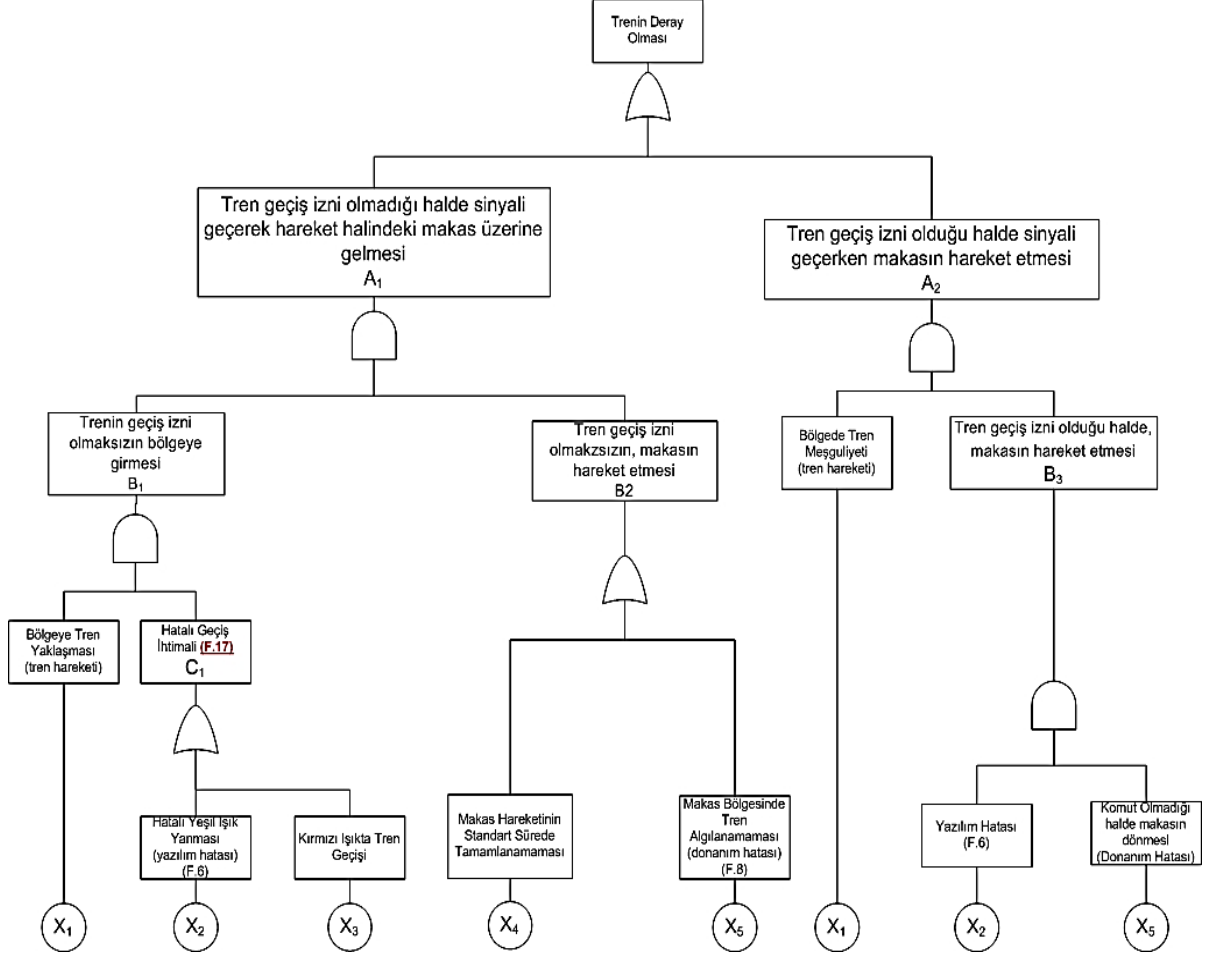
Tablo 9. Risk hesaplama matrisi

| | | Hatanın Şiddeti (Ş) | | | |
|---------------------|---|---------------------|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Hata Sıklıkları (F) | A | R2 | R1 | R1 | R1 |
| | B | R3 | R2 | R1 | R1 |
| | C | R3 | R2 | R2 | R1 |
| | D | R4 | R3 | R2 | R2 |
| | E | R4 | R4 | R3 | R3 |
| | F | R4 | R4 | R4 | R4 |

Yukarıda belirtilen parametrelere göre hazırlanan FMEA Çalışması Ek 1’de gösterilmiştir. İlgili tabloda şiddet Ş, sıklık F ve risk ise R ile sembolize edilmiştir. Ek 1’de belirtilen bu FMEA çalışmasından yola çıkarak oluşturulacak hata ağacı modelinde üst olay olarak, FMEA’da Trenin Yoldan Çıkması (Trenin Deray Olması) hata sonucu incelenmiştir. Bu olayın meydana gelme olasılığını hesaplamak için Şekil 8’de gösterilen hata ağacı modeli oluşturulmuştur.

Şekil 8’de gösterilen hata ağacı modelinde iki ana oluşması durumu göz önünde bulundurulmuştur. A1 ile gösterilen birinci olayda trenin sistem tarafından geçiş izni olmadığı halde sinyali geçerek hareket halindeki makas üzerine gelmesi ve A2 ile gösterilen ikinci olayda

ise sistem tarafından trene geçiş izni verildiği halde sinyali geçerken makasın hareket etmesi incelenmiştir. Bu iki senaryoda da tren raydan çıkmaktadır.



Şekil 8. Mescidi selam lokal sinyalizasyon sistemi için hazırlanmış FTA modeli

A1 olayının olabilmesi için makas bölgesine tren girişi olmalı ve makas hareket etmelidir. A2 olayının meydana gelebilmesi için ise yine bölgeye tren girişi olmalı ve bu durumda makas motoru hareket etmelidir. Bu her iki olayın da oluşması hata ağacı modelinde temel olaylarla ilişkilendirilmiş ve trenin raydan çıkma arıza olasılığı yaklaşık $6,0 \cdot 10^{-7}$ 1/h olarak hesaplanmıştır.

4. Sonuç

Risk analizinde değişik mühendislik yöntemlerinden olay ağacı analizi ya da hata modları ve etkileri analizi gibi çeşitli yöntemlerin birlikte kullanımı esnekliğinin olması çeşitli kaynaklardan bilgi ve veri kullanımına imkân sağlamaktadır. Buna örnek olarak FMEA-FTA teknikleri; nitel, yarı-nitel ve nicel risk değerlendirmeleri ile tepeden tabana ve tabandan tepeye yaklaşımlarının bir ürünüdür. Bu yöntemlerle yapılan risk değerlendirmeleri de mevcut bilgi ve veriler ile gerçekleştirilen sistem tasarımı aşamaları için esneklik sağlar. Bu çalışmada tanımlanan FMEA-FTA risk değerlendirmesi, özellikle yüksek güvenli demiryolu sistemlerinin belirsizlik düzeyini değerlendirirken; sistem tasarımı, analizi ve risk değerlendirmesi süreçlerinde büyük bir potansiyele sahip olduğu gözlemlenmiştir. FMEA-FTA tekniğinin melez bir şekilde uygulandığı bu çalışmada, geliştirilen yaklaşım yerli olarak geliştirilmiş ilk lokal sinyalizasyon sistemi olan Mescidi Selam sinyalizasyon sistemi üzerinde uygulanmıştır. Çalışma özelinde tramvay hatları özelinde açığa çıkabilecek olan riskler gerçekçi bir şekilde ortaya koyulmuş, sistemin bünyesine

bulunan en büyük tehlikenin riski niceliksel olarak açığa çıkartılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre trenin raydan çıkma arıza olasılığı yaklaşık $6,0 \cdot 10^{-7}$ 1/h olarak hesaplanmıştır. Bu hibrit risk değerlendirme yöntemi EN 50126 ile tam uyumlu olmasının neticesinde istenildiği takdirde tüm raylı sistem projelerinde sistem mühendisliği kapsamında verilen RAMS hizmetlerinde etkin bir şekilde kullanılabilir. Diğer taraftan tehlikeler değerlendirilen insan faktörü ve bu kapsamdaki belirsizlikler kapsam dışında bırakılmıştır. İlerleyen çalışmalarda özellikle insan kaynaklı riskler ve bu kapsamdaki belirsizlikleri içeren modellerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Kaynakça

- [1] P. Cantos and J. Campos, "Recent changes in the global rail industry: facing the challenge of increased flexibility," *European Transport \ Trasporti Europei, ISTIEE, Institute for the Study of Transport within the European Economic Integration*, issue 29, pages 1-21, 2005
- [2] V. Profillidis, *Railway management and engineering (3rd ed.)*. Routledge, 2006.
- [3] Z. Zhang, L. Jia, and Y. Qin, "RAMS analysis of railway network: model development and a case study in China," *Smart and Resilient Transportation*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.1108/srt-10-2020-0013.
- [4] M. Sitarz, K. Chruzik, and R. Wachnik, "Application of RAMS and FMEA methods in safety management system of railway transport," *Journal of Konbin*, vol. 24, no. 1, 2012, doi: 10.2478/jok-2013-0061.
- [5] S. Qiu, M. Sallak, W. Schön, and Z. Cherfi-Boulanger, "Availability assessment of railway signalling systems with uncertainty analysis using statecharts," *Simul Model Pract Theory*, vol. 47, 2014, doi: 10.1016/j.simpat.2014.04.004.
- [6] M. Pawlik, "Railway safety and security versus growing cybercrime challenges," *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1049, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-27547-1_5.
- [7] F. G. Praticò and M. Giunta, "Proposal of a key performance indicator for railway track based on LCC and RAMS analyses," *J Constr Eng Manag*, vol. 144, no. 2, 2018, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001422.
- [8] *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems Part 1...7*, BS EN 61508-1...7, 2010.
- [9] M. A. Lundteigen, M. Rausand, and I. B. Utne, "Integrating RAMS engineering and management with the safety life cycle of IEC 61508," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 94, no. 12, 2009, doi: 10.1016/j.res.2009.06.005.
- [10] *Railway applications - the specification and demonstration and reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) - part 1: generic rams process*, BS EN 50126-1, 2017.
- [11] J. L. Boulanger, *CENELEC 50128 and IEC 62279 standards*. John Wiley & Sons, 2015.
- [12] *Railway applications. Communication, signaling and processing systems. Safety related electronic systems for signaling*, BS EN 50129, 2018.
- [13] M. Rausand, *Reliability of safety-critical systems*. John Wiley & Sons, 2014.
- [14] *Risk management - risk assessment techniques*, IEC 31010, 2019.
- [15] *Dependability management - part 3-4: application guide - guide to the specification of dependability requirements*, CSN EN 60300-3-4, 2007.
- [16] Department of defense of USA, *Standard practice for system safety military handbook (mil-std-882d)*, 2000.
- [17] *Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*, IEC 60812, 2018.
- [18] M. An, W. Lin, and S. Huang, "An intelligent railway safety risk assessment support system for railway operation and maintenance analysis," *The Open Transportation Journal*, vol. 7, no. 1, 2013, doi: 10.2174/1874447801307010027.
- [19] C. Özarpa, İ. Avcı ve B. F. Kınacı, "Akıllı Raylı Sistemlerde Kullanılan Alt Sistemlerin Kritik Seviye Analizi", *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 14, ss. 143-153, Tem. 2021, doi:10.47072/demiryolu.937278

Özgeçmiş**Özgür Turay KAYMAKÇI**

1976 tarihinde doğmuştur. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. 14 bilimsel dergi makalesi ve 50'den fazla ulusal ve uluslararası bildirinin yazarıdır. 13 farklı bilimsel projede aktif olarak görev almıştır. Hali hazırda Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Doçent olarak görev yapmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları, raylı sistemler ve sinyalizasyon, fonksiyonel güvenlik ve endüstriyel otomasyondur.

E-Posta: okaymakci@comu.edu.tr

**İsmail YAKIN**

1986 tarihinde doğmuştur. İstanbul Teknik Üniversite'sinde Kontrol ve Otomasyon Bölümünde lisans ve yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 10 yılı aşkın süredir demiryolu sektöründe değişik pozisyonlarda görev almış, şu an Alstom Transport şirketinde Sistem Mühendislik Müdürü olarak görev yapmaktadır. Anahtar teslim demiryolu sistemleri tasarımı, sinyalizasyon ve telekomünikasyon ile sistem mühendisliği konularına odaklanmaktadır.

E posta: ismail.yakin@alstomgroup.com

**Mehmet Turan SÖYLEMEZ**

İTÜ Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden lisans (1991), Manchester Üniversitesi'nden yüksek lisans (1994) ve doktora (1999) derecelerini almıştır. Bir kitap, 25 bilimsel dergi makalesi ve 150'den fazla ulusal ve uluslararası bildirinin yazarıdır. Tamamlanmış 8 adet doktora ve 43 yüksek lisans tezine danışmanlık yapmıştır. Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi genel sekreterliği, Shift2Rail Bilimsel Komite üyeliği, İTÜ Raylı Sistemler Ana Bilim Dalı Başkanlığı gibi değişik görevleri yürütmektedir.

E-Posta: soylemezm@itu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.

Ek 1. Örnek FMEA tablosu

| Hata Kodu | Alt Sistem | Komponent Hata Türü | Muhtemel Hata Sebepleri | F | Ş | R | Hata Etkisi | Hatanın Teşhisi | Riskin Giderilmesi için Alınması Gereken Önlemler |
|-----------|------------|---|---|---|---|----|--|--|--|
| F.1 | PS | Ana Besleme Arızası | Katener Hattında enerji kesintisi | C | 1 | R3 | Sistemin devre dışı kalması | Sistem ile tüm haberleşmenin kesilmesi | |
| F.2 | PS | A1.1 modüllerinden birinin arızalanması | Donanım Hatası | E | 3 | R3 | Sistem fonksiyonlarının azalması | Alarm log'ları ile takip edilmesi | Periyodik bakımlarla yedekli olarak çalışan güç kaynaklarının sağlamlığı test edilmelidir. |
| F.3 | PS | A1.2 arızası | Donanım Hatası | D | 2 | R3 | LED lambaların enerjisiz kalması | Alarm log'ları ile takip edilmesi | Yukarıdaki maddede yedeklilik eklenince bu maddenin hata sıklığı D'ye geriledi ve risk R3'e indirildi. |
| F.4 | PS | Topraklama Kablounun devre dışı kalması | Kablo Hatası | E | 2 | R4 | Sistemin aşırı gerilime maruz kalması | Rutin bakımlarla elektriksel ölçümler alınması | |
| F.5 | IS | CPU Arızası | Donanım Hatası | C | 3 | R2 | Sistem fonksiyonlarının azalması | Sistem ile tüm haberleşmenin kesilmesi veya arıza bildirimi | |
| F.6 | IS | Anlaşman Arızası (Sinyal ihlali riski) | Yazılım Hatası | E | 3 | R3 | Sistem fonksiyonlarının azalması (dolaylı deray riski) | Arıza bildirimi | Tüm işletmesel senaryolar test edilmiştir. |
| F.7 | IS | IOM Arızası | Donanım Hatası | C | 3 | R2 | Sistem fonksiyonlarının azalması (saha komutlarının iletilmemesi veya alınmaması ve dolaylı deray riski) | Sistem ile tüm haberleşmenin kesilmesi veya arıza bildirimi | |
| F.8 | IS | Tren algılamasının yapılamaması (Sinyal ihlali riski) | Donanım Hatası. Algılayıcı Hatası. Algılayıcı pozisyonu kayması | C | 3 | R2 | Sistem fonksiyonlarının azalması (dolaylı deray riski) | Aks sayıcı sisteminin hataya düşerek uyarı bildirimi yapması | Bakım periyotları artırılarak hata sıklığı azaltılmalıdır. |
| F.9 | IS | CM arızası | Donanım Hatası | D | 2 | R3 | Sistemin lokal modda çalışması | Sistemin lokal moda geçiş yapması | |
| F.10 | IS | CM kablo arızası | Fiber Optik Kablo Hatası (Yedekli) | C | 1 | R3 | Sistemin lokal modda çalışması | Sistemin lokal moda geçiş yapması | |

| | | | | | | | | | |
|------|------|------------------------|---|---|---|----|---|--|---|
| F.11 | PCM | PDM Tahrik Arızası | Elektrik Motoru Hatası. Makas Motorunun Tahrik Kolunun Kırılması | C | 3 | R2 | Sistem fonksiyonlarının azalması | Makas motorunun hareket etmemesi | Makas motoruna ait yedek malzemeler hazırda tutulmalıdır ve rutin bakımları aksatılmamalıdır. |
| F.12 | PCM | PDM kablo arızası | Kablo Hatası | D | 2 | R3 | Sistem fonksiyonlarının azalması | Makas motorunun hareket etmemesi | |
| F.13 | PCM | PDM Yön Arızası | Kontaktör Arızası | D | 2 | R3 | Sistem fonksiyonlarının azalması | Makas motorunun hareket etmemesi | Hatanın hızlı giderilmesi için koltuk ambarında yedek komponent bulundurulmalıdır. |
| F.14 | PCM | PI belirsizlik arızası | Sensör Arızası. Kablo Hatası. Makas Motoru Tespit Kolunun Kırılması | B | 4 | R1 | Deray riski. Makas motorunun hareketini tamamlayamaması | Makas motorunun konumunun tespit edilememesi (alarm logları ile) | Bakım periyotları artırılarak hata sıklığı E'ye düşürülecektir. Ayrıca makinistlere işletmesel prosedürlerle, makas konumunu görmeden makas üzerinden trenle geçiş yasağı konulmalıdır. |
| F.15 | LC M | LCM arızası | Donanım Hatası. Kablo Hatası | B | 2 | R2 | Sistem fonksiyonlarının azalması | Alarm logları veya arıza bildirimini | Hata risklerini ortadan kaldırmak için LCM komponenti geliştirilmelidir. |
| F.16 | HMI | GUI arızası | Donanım Hatası. Hatalı Komut Talebi | B | 1 | R3 | Sistem fonksiyonlarının azalması işletme gecikmesi | Sistemin lokal moda geçiş yapması | Sistemin etkilenmemesi için bu hata durumunda lokal modda çalışma tanımlanmıştır. Hata sıklığını D seviyesine indirmek için GUI dispeçerlere sürekli kullanılabilir. |

| | | | | | | | | | |
|------|-----|----------------------|----------------------------|---|---|----|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| F.17 | HMI | MMI kullanıcı hatası | Kırmızı ışıkta tren geçişi | C | 4 | R1 | Deray riski | Görsel olarak, operatör kontrolü | Makinistlere işletmesel yaptırımlar konularak kırmızı ışıkta geçiş kesin olarak kontrol altında tutulacaktır. |
| F.18 | HMI | MMI Arızası | Kablo Hatası. LED arızası | D | 1 | R4 | Sistem fonksiyonlarının azalması | Alarm logları veya arıza bildirim | Bu riskin indirilmesine çözüm olarak 2 beslemeli akım kontrollü LED kullanıldı. |



Raylı Sistem Elektrifikasyonu Katener Sistemlerinde Pandül Verilerinin Yapay Sinir Ağları ile Tasarlanması

Seçkin ULUSKAN^{*1} , Alırza ATAM² 

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: 19.12.2022, Kabul/Accepted: 09.01.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Bu çalışmada, raylı sistemlerde pandül boylarının yapay sinir ağları ile elde edilmesi ele alınmıştır. Demiryolu taşımacılığında elektrifikasyon sistemlerinin önemi çok büyüktür. Pantografin temas ederek enerji aldığı seyir telinin pantografla sürekli temas halinde olmasından dolayı ray üstünden yüksekliğinin her noktada aynı olması sağlanmalıdır. Seyir telini belirlenen yükseklikte sabit tutabilmek için seyir telinin üzerinde aynı hizada giden bir taşıyıcı portör teli tesis edilir ve pandül adı verilen ara bağlantı elemanlarıyla seyir teli portör teline asılır. Pandüllerin, çeşitli değişkenlere göre konumlarının ve boylarının titizlikle belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde, pandül verilerinin hesaplanması, modellenmesi ve simülasyonlara dahil edilmesi, diferansiyel denklemler, doğrusal olmayan denklem sistemlerinin çözümü, sonlu elemanlar yöntemi vb. hesaplamalar içermektedir. Pandül hesapları önceleri elle çözümlenirken, günümüzde bazı firmaların geliştirdiği pahalı yazılımlar ile hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada özgün bir yaklaşım olarak, pandül verilerinin elde edilebilmesi için daha önceki projelerde uygulanmış olan pandül verileri kullanılarak Matlab® yazılımı ile yapay sinir ağları eğitilmiştir. Böylelikle, test verileri ile yapılan incelemede pandül boylarının otomatik olarak yüksek bir doğruluk seviyesinde hesaplanabildiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemler, Demiryolu katener sistemleri, Elektrifikasyon, Pandül hesaplamaları, Yapay sinir ağları

Designing Dropper Data with Artificial Neural Networks in Railway Electrification Catenary Systems

Abstract: In this study, determination of the dropper lengths in rail systems via artificial neural networks is discussed. The role of electrification systems in railways is quite important. It should be ensured that the height of contact wire which the pantograph constantly contacts should be the same at every point of the line. In order to keep the contact wire stable at a specific height, a messenger wire which runs in the same line but above of the contact wire is installed. The contact wire is hung on the messenger wire with intermediate connection elements called dropper. The heights and locations of droppers should be carefully determined according to various factors and variables. In the literature, calculating, modeling and simulating the dropper data require solving differential equations, nonlinear equation systems, finite element method etc. While previously, the dropper heights were determined manually, they can be recently calculated with special software developed by certain companies. In this study, as a new approach, in order to be able to produce new dropper data, artificial neural networks have been trained with Matlab® by means of the dropper data utilized previously in railway projects. Finally, it has been observed that the dropper lengths can be calculated automatically with a high accuracy for a test data.

Keywords: Rail systems, Railway catenary system, Electrification, Dropper calculations, Artificial neural networks

Atıf için/Cite as: S. Uluskan, A. Atam, "Raylı sistem elektrifikasyonu katener sistemlerinde pandül verilerinin yapay sinir ağları ile tasarlanması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 161-173, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1220992

1. Giriş

Elektrikli demiryolu işletmeciliğinde tren setinin enerjilendirilmesi; iletim hatlarından, tren setinin akım toplayıcısı vasıtasıyla enerjinin alınarak çekiş mekanizmalarına iletilmesiyle olmaktadır. Elektrifikasyon sistemlerinin önemli parçası standart katener sistemleridir. Bu sistemler, tren setlerinin çeken araçlarındaki pantografin havai katener iletkenlerine temasıyla enerjilenmesi prensibiyle oluşturulan sistemlerdir. Katener hattı, portör(taşyıcı) teli, seyir teli, y halatı ve pandüllerden oluşur.

Seyir teli pantografin sürekli temas ederek enerji aldığı teldir. Bu sebeple seyir telinin ray üstünden yüksekliklerinin her noktada aynı olması sağlanmalıdır. Aksi durumda, tel yüksekliklerindeki tolerans dışı değişimler sonucunda ark oluşumları meydana gelmekte ve aşırı temas kuvvetleri oluşabilecektir. Bu durumlarda, seyir telinde aşınma ve kopma şeklinde hasarlar meydana gelecektir. Bu nedenle seyir telinin ray üstünden yüksekliğinin uluslararası standartlarda belirlenen tasarım değerlerinde hattın hızına göre toleranslar dahilinde sabit tutulması kritik öneme sahiptir. Seyir telini belirlenen ray üstü yüksekliğinde sabit tutabilmek için; seyir telinin üzerinde seyir teli ile aynı hizada giden ve seyir telinin asılı olduğu taşıyıcı portör telleri tesis edilir ve pandül adı verilen ara bağlantı elemanlarıyla seyir teli bu portör teline asılır. Pandüllerin; taşıyıcı telin sehimi, seyir telinin sehimi, tellerin gerginliği vb. değişkenlere göre konumlarının ve boylarının titizlikle belirlenmesi gerekmektedir.

Katener tesislerinde, pandül boyları önceleri el ile hesaplanarak yerleştirilir, boyları ayarlanır ve montajları yapılır. Literatürde, bu hesapların otomatikleşmesi ve dijitalleşmesi için çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Cho'nun, 2008'deki çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan pandül denklemleri önerilmiş ve pantograf-katener dinamiğinin bir simülasyonu sunulmuştur [1]. Çalışmada, bir pandüle etki eden bir kuvvet, portör ve seyir telinin dinamik yer değiştirmesi ve hızları, bir pandülün esnemezlik ve sönümleme katsayısı, pandül üzerindeki statik kuvvetler dikkate alınarak diferansiyel denklem şeklinde tasarlanmıştır. Cho ve diğerleri 2010'da pantograf-demiryolu katener sisteminin hareket denklemlerini doğrusal olmayan denklem sistemi şeklinde yazmışlardır. Daha sonra bu doğrusal olmayan denklemler basitleştirilerek, sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile katener sistemi parçaları hesaplanmıştır [2].

Jung ve diğerleri (2012), yine katener ve pantografin dinamik etkileşimlerinin bir analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sunmaktadır. Çalışma, pandül uzunluğunu hesaplamak için bir analitik yöntem aktarmıştır. Hesaplanan pandül uzunlukları bir katener modeline uygulanmış ve yerçekiminden kaynaklanan deformasyonun simülasyonu yapılmıştır [3]. Lee ve Park (2012), çalışmalarında mutlak düğüm koordinat denklemleri ile yine katener sistemi tasarımı yapılmıştır [4]. Benet ve diğerlerinin 2013'te yayınlanan çalışmalarında, 3 boyutlu bir katener sistemi modeline ait denklemler, yüksek işlem performansına sahip InDiCa3D isimli bir yazılım aracılığıyla hesaplanmıştır [5].

Song ve diğerleri (2015) çalışmalarında pandül hesabını doğrusal olmayan modeller aracılığıyla tasarlanmasının gerekliliğini savunmuşlardır. Çalışmada, pandül hesaplarının yapılmasını sağlayacak doğrusal olmayan denklemlerin Newton-Raphson iterasyon metodu ile çözülmüştür [6]. Chen ve diğerleri (2018), çalışmalarında pandüllerin yorulma yaşam analizi yaparak, pandül hesaplarına yönelik araştırma alanına farklı bir yaklaşım getirilmiştir [7].

Günümüzde pandül hesapları çeşitli ticari yazılımlar vasıtasıyla hesaplanabilmektedir. Bu maliyetli yazılımlara bir alternatif olarak önceki projelerden elde edilen verilerle yapay sinir ağları oluşturularak pandül boylarının belirlenmesi bir alternatif olarak düşünülebilir. Literatürde, katener sistemleri için yapay sinir ağları kullanılarak çeşitli hesaplar yapılmasına yönelik çalışmalar mevcuttur [8,9]. Fakat, yapay sinir ağları kullanılarak pandül boyu

belirlenmesi ile ilgili bir çalışma mevcut değildir. Bu vesileyle bu çalışma, raylı sistemlerdeki makine öğreniminin bu alanda literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada özgün bir yaklaşım olarak, pandül verilerinin elde edilebilmesi için geçmişteki demiryolu projelerinde kullanılan pandül verileri aracılığıyla Matlab® (The MathWorks, Inc., 2014b) yazılımı ile yapay sinir ağları eğitilmiştir. Böylelikle, test verileri ile yapılan incelemede pandül boylarının otomatik olarak yüksek bir doğruluk seviyesinde hesaplanabildiği gözlenmiştir. Bu çalışmanın devamı şu şekilde düzenlenmiştir: ilk olarak katener sistemleri ve pandül kavramı anlatılmıştır. Daha sonra pandül verilerinin hesaplanabilmesi için yapay sinir ağlarının eğitilmesi ve eğitilen yapay sinir ağlarının test edilmesi anlatılmıştır. Son olarak sonuçlar sunulmuş ve sonuçların ve çalışmanın önemi aktarılmıştır.

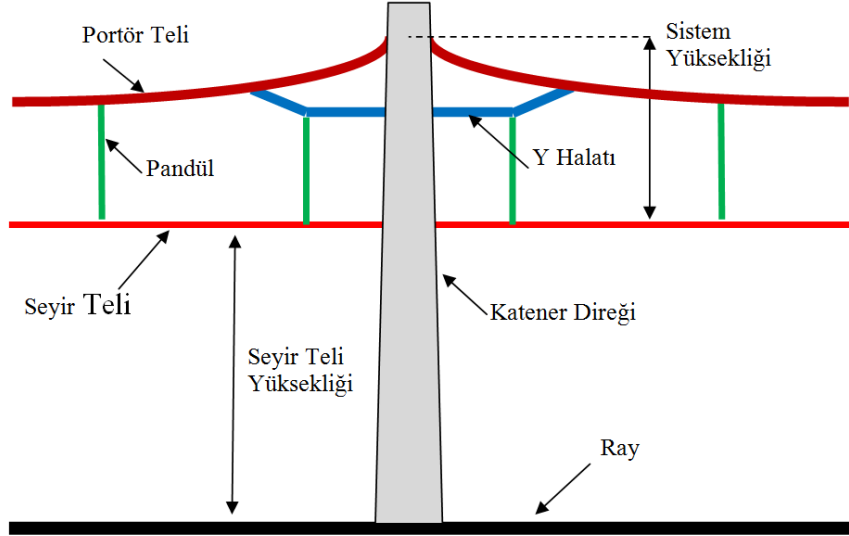
2. Standart Katener Sistemleri ve Pandüller

Bu bölümde, kısaca standart katener sistemleri ve pandül kavramı açıklanacaktır. Standart katener sistemleri, hattın belirli noktalarına tesis edilen destek noktaları (direkler, portallar, şezler), bu destek noktalarının ankrajları ve yine bu destek noktalarına asılan katener iletkenlerinden oluşur. Tren seti, pantografin temas teline sürekli temas etmesi yolu ile enerjilendirilir.

Şekil 1'de, standart katener sistemlerinin genel görünümü ve konsol-hoban takımlarına yönelik bir fotoğraf sunulmuştur. Şekil 2'de ise katener sisteminin parçaları ve katener iletkenlerini gösteren bir şema gösterilmektedir [10]. Şekil 1 ve 2'de gösterilen kısımlar bu bölümde kısaca tanıtılacaktır.



Şekil 1. Standart katener sistemlerine örnek olarak bir fotoğraf



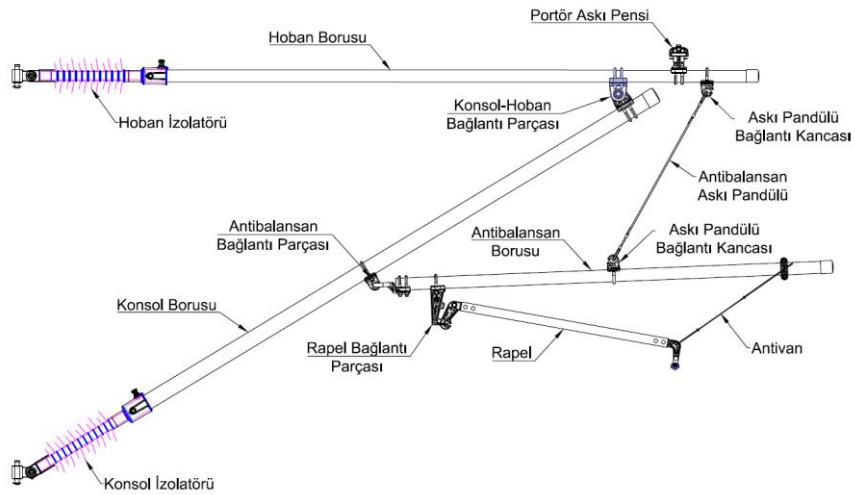
Şekil 2. Katener sisteminin parçaları ve katener iletkenleri

2.1. Katener direkleri

Katener direkleri; katener bileşenlerinin istenilen noktada sabitlenebilmesi için hat boyunca belirli aralıklarla tesis edilirler. Bu aralıklar, proje bazlı temel tasarım dokümanlarında hesaplanmaktadır. Direk tipleri ilgili projeye göre beton veya çelik olarak seçilir. Üzerindeki ekipmanlara göre boyları belirlenir, direk üzerine gelen tüm yükler hesaplanarak analizler yapılır ve katener direkleri tasarlanmış olur.

2.2. Konsol-hoban takımları

Seyir teli, portör teli, Y halatı, pandül gibi katener iletkenlerini taşıyan, istenilen seviye ve ekseninde tutulmasını sağlayan ve katener direklerine sabitlenen donanıma konsol-hoban takımı adı verilir. Şekil 3'teki gösterildiği üzere konsol-hoban takımlarında, portör askı pensine portör teli, rapel ekipmanının ucuna da seyir teli sabitlenir.



Şekil 3. Konsol-hoban takımı örnek görünümü

2.3. Seyir teli

Elektrik enerjisinin pantograf vasıtasıyla elektrikli diziye ya da lokomotifte iletmesini sağlayan ve seyir esnasında pantografin sürekli temas ettiği tel seyir teli veya temas teli olarak adlandırılır. Seyir teli, temas edilen tel olduğundan tek damarlıdır ve temas yüzeyleri pürüzsüzdür. Seyir tellerinin yalnızca pürüzsüz yüzeyinin temas edebilmesi için teller yivli yapıdadır ve yiv açılarına göre AC ve BC tip olmak üzere iki ayrılırlar.

Seyir teli, tren seyir halindeyken süreklilikle (bazen yüksek hızlarda) pantograf ile temas halinde olduğundan, hattın dinamiği açısından raydan yüksekliğinin her noktada aynı seviyede olması sağlanmalıdır. Tolerans dışı yükseklik farkları, yüksek hızlarda telin fazla salınım yapmasına ve bu salınımlar sonucu tel kopmalarına sebebiyet verebilir. TSEN 50367 standardına göre nominal seyir teli yükseklikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Nominal seyir teli yüksekliği- TS EN 50367

| Hat Hızı V(km/s) | $V \leq 200$ | $200 < V < 250$ | $V \geq 250$ |
|---|--------------|-----------------|--------------|
| Nominal seyir teli yükseklik aralığı (m) | 5,0- 5,75 | 5,0- 5,5 | 5,08- 5,3 |

2.4. Portör teli

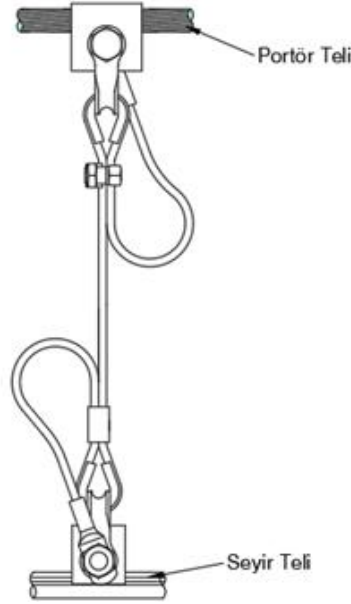
Seyir telini belirlenen yükseklikte sabit tutabilmek için; seyir telinin üzerinde aynı hızda giden ve seyir telinin asılı olduğu taşıyıcı bir portör teli tesis edilir. Bu taşıyıcı tel, pandüller aracılığıyla seyir telinin iki destek noktası arasındaki sehimini tolere eder ve bu sayede seyir teli istenilen seviyede tutulmuş olur. Taşıyıcı amaçlarından dolayı portör telleri çok damarlı olarak tesis edilirler. Portör teli malzemesi ve kesiti projeye göre farklılık gösterebilir. Akım paylaşımı amacıyla da genellikle bakır iletken, kimi zaman da alüminyum olarak tercih edilirler.

2.5. Y halatı

İşletmecilik hızı arttıkça, pantograf ile seyir teli arasındaki dinamik etkileşim arttığından, seyir teli seviyesini daha hassas koruyabilme adına her destek noktasına portör telini destekleyici bir tel olan Y Halatları tesis edilirler. Genellikle bakır iletken olarak seçilirler.

2.6. Pandül

Seyir telinin portör teline asıldığı ara bağlantı elemanlarına pandül denir. Destek noktalarını artırmadan pandüller takılarak seyir telinin esnekliği artırılır [11]. Seyir teli, pandüller vasıtasıyla istenilen düşey seviyede tutulmaktadır. Pandüller kimi zaman yalnızca taşıma görevi üstlenseler de günümüzde kullanılan pandüller bakır iletkenlerden üretilirler ve portör ve seyir tellerinin akımı bölüşmelerini sağlarlar. Şekil 4'te pandül seti örneği gösterilmiştir.



Şekil 4. Pandül seti

Pandül tasarımında; Seyir teli ağırlığından, buz yüklerinden(mevcutsa), rüzgâr yüklerinden ve seyir teli profilinden kaynaklanan dikey yükler, titreşimden ve pandül bükülmesinden kaynaklı dinamik yükler, montaj aşamasındaki yükler, komşu pandüllerdeki hatalardan kaynaklanan geçici yükler, demiryolu hattının yatay ve düşey geometrisi ve dezeksman dikkate alınmalıdır.

Daha önce açıklandığı gibi pandüller; hattın dinamiği ve esnekliği açısından çok önemlidirler. Taşıyıcı telin sehimi, seyir telinin sehimi, tellerin gerginliği vb. değişkenlere göre konumlarının ve boylarının titizlikle belirlenmesi gerekmektedir. Pandül boy ve konumları önceleri el ile hesaplanarak belirlenirken, günümüzde bazı firmaların geliştirdiği yazılımlar ile hesaplanabilmektedir.

2.7. Dezeksman

Hareket halindeki pantografin seyir teli ile teması sonucu oluşan sürtünmenin sürekli olarak aynı noktada kalarak, pantograf yüzeyindeki kömürünü çabuk aşındırmaması ve kömür yüzeyinin homojen olarak aşınmasının sağlanması için katener hattı, hat ekseninden yatay olarak belirli değerlerle kaçırılması durumudur. Seyir telinin yanı sıra portör teline de dezeksman verilmektedir.

2.8. Otomatik gergi cihazı (OGC)

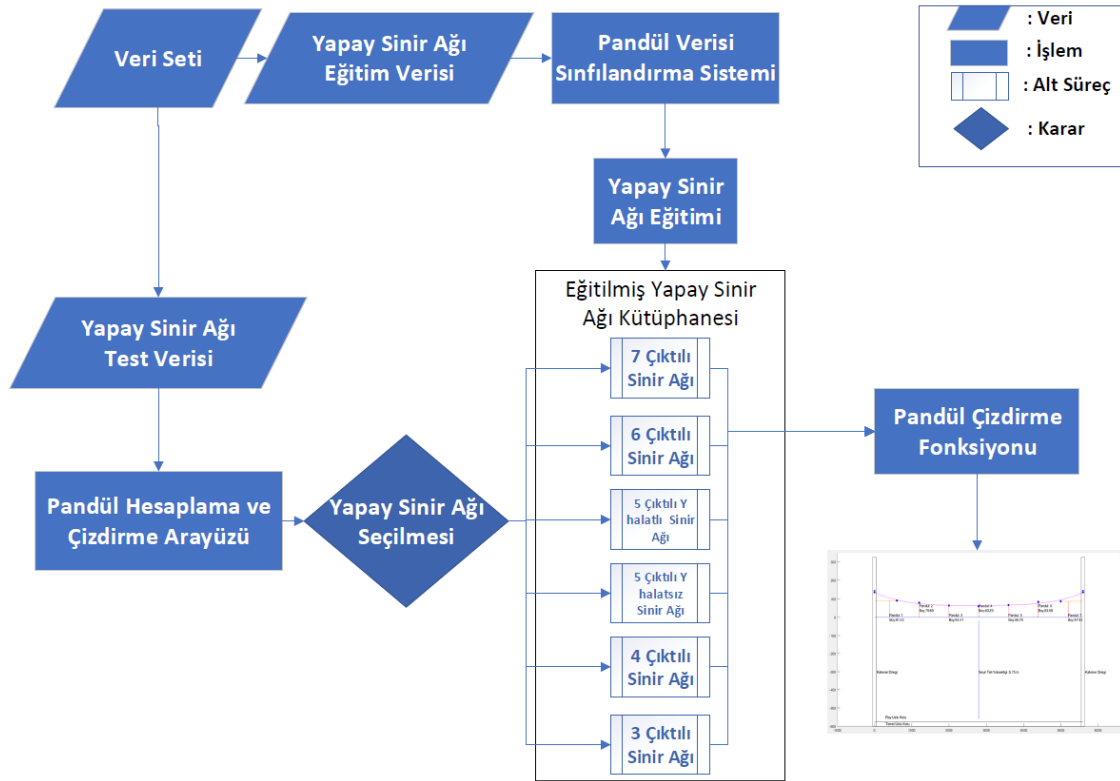
Katener hattı gerginliğinin farklı sıcaklık değerlerinde aynı kalmasını sağlayan donanımlara otomatik gergi cihazı denir. Katener sisteminin tasarımına bağlı olarak sadece seyir teli tek OGC ile, seyir teli ve portör teli beraber tek OGC ile, seyir teli ve portör teli ayrı ayrı OGC cihazları ile gerdirilirler.

2.9. Etap boyu

Katener hatlarında kullanılan seyir ve portör telleri, taşıma ve montaj kolaylığı kısıtları ile birlikte en temelde, maksimum gerdirmeye uzunluğuna bağlı olarak belirli bir uzunluktan fazla üretilemez ve kullanılamazlar. Katener hatlarının projelendirme ve montajında, bu kısıtlar ve proje teknik şartlarına bağlı olarak kesinti olmaksızın iki sonlandırma noktasında çekilen telin uzunluğuna etap boyu denir.

3. Metot: Yapay Sinir Ağları ile Pandül Sistemi Tasarımı

Bu bölümde, pandül boyu hesaplarının yapay sinir ağları aracılığıyla yapılması anlatılacaktır. Mevcut raylı sistem tesislerine ait bir pandül veri seti ile yapay sinir ağlarının eğitilmesi mantığına dayanarak pandül boylarının gerçeğe yakın şekilde elde edilebileceği gösterilecektir. Bu çalışmada, ilk olarak pandül boylarını etkileyen girdiler belirlenmiştir ve bu girdiler ilgili çıktılarla eşleştirilmiştir. Bu veriler uygun şekillerde ayıklanarak işlenebilir hale getirilmiştir. Sonrasında ayıklanan veriler ile yapay sinir ağları eğitilmiştir. Otomatik pandül çizdirme fonksiyonları oluşturularak elde edilen pandül verilerinin görselleştirilmesi sağlanmıştır. Bu kısımda anlatılacak çalışmalar Şekil 5'te sunulan akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 5. Yapay sinir ağları ile pandül sistemi tasarımı akış şeması

3.1. Veri toplama

Bu proje için, Y halatlı bir katener tesisi projesinden elde edilen pandül verilerinden bir veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışmada 415 satırlık bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti; pandül boylarını etkileyen 5 girdi ve pandül boylarını içeren 7 çıktı sütunundan oluşmaktadır. Girdiler, pandül boylarını etkileyen faktörlerden olan, dezeksman, portör teli yüksekliği, seyir teli yüksekliği, açıklık ve sistem yükseklikleridir. Çıktı olarak ise pandül boyları bulunmaktadır. İlgili girdi değerlerine göre çıktı adetleri değişkenlik göstermektedir. Veri seti örneği Tablo 2'de gösterilmiştir. Her satırdaki pandül çıktıları soldan sağa doğru iki destek noktası arasındaki pandülleri temsil etmektedir.

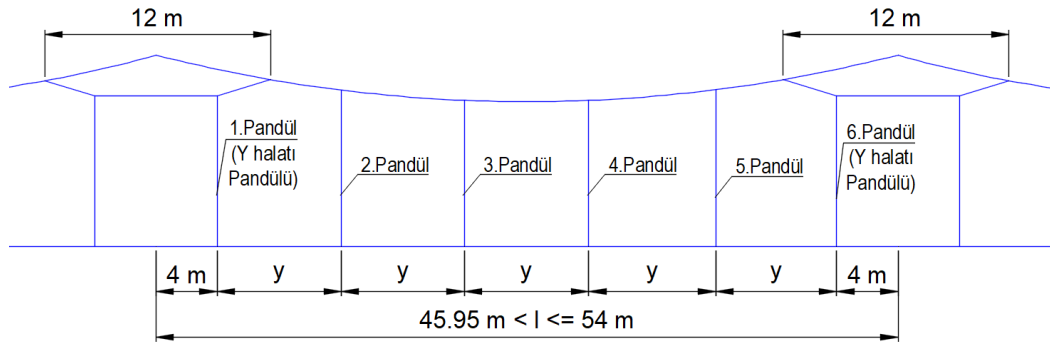
Tablo 2. Pandül veri seti örneği

| GİRDİLER | | | | | ÇIKTILAR | | | | | | |
|----------------|------------------------|-----------------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Dezeksman (cm) | Portör Teli Yüks. (cm) | Seyir Teli Yüks. (cm) | Açıklık (cm) | Sistem Yüksekliği (cm) | 1.Pandül Uzunluğu (cm) | 2.Pandül Uzunluğu (cm) | 3.Pandül Uzunluğu (cm) | 4.Pandül Uzunluğu (cm) | 5.Pandül Uzunluğu (cm) | 6.Pandül Uzunluğu (cm) | 7.Pandül Uzunluğu (cm) |
| 20 | 715 | 575 | 5997 | 140 | 89.70 | 74.70 | 56.40 | 50 | 55.70 | 73.30 | 87.70 |
| -20 | 715 | 575 | 5399 | 140 | 92.90 | 79.70 | 66.30 | 66.40 | 80.10 | 92.70 | NaN |
| -20 | 715 | 575 | 5006 | 140 | 92.80 | 83 | 70.40 | 70 | 83.10 | 93.70 | NaN |
| -5 | 715 | 575 | 4900 | 140 | 95.80 | 87.70 | 77.10 | 77 | 87.50 | 95.30 | NaN |
| -20 | 715 | 575 | 3500 | 140 | 119 | 105,9 | 105,9 | 119 | NaN | NaN | NaN |
| -20 | 740 | 600 | 2545 | 140 | 126.90 | 123.40 | 125.10 | NaN | NaN | NaN | NaN |

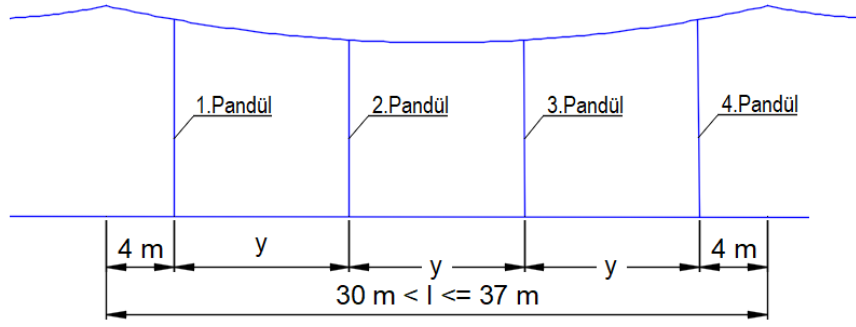
Veri setinde dezeksman, katener hattının yol ekseninden yatay doğrultudaki farkının cm cinsinden değeridir. Portör Teli Yüksekliği, portör telinin ray seviyesinden cm cinsinden yüksekliğidir. Seyir Teli Yüksekliği, seyir telinin ray seviyesinden cm cinsinden yüksekliğidir. Açıklık, iki katener destek noktası arasındaki mesafenin cm cinsinden değeri. Sistem Yüksekliği ise, seyir teli ile portör teli eksenleri arasındaki yüksekliğin cm cinsinden değeridir.

3.2. Verilerin gruplanması ve pandül konumları kuralları

Eğitilen bir yapay sinir ağının başka bir veri üzerinde test edilmesi veya çıktı üretmek üzere kullanılabilmesi için test verisinin hem girdi hem de çıktı sütun sayılarının eğitim verisi ile aynı olması gerekmektedir. Pandül verisinde, her veri satırının girdi sayısı sabit olarak 5 adettir. Fakat çıktı sayıları çeşitli durumlara ve kurallara göre değişmektedir. Bu sebeple bu denkleştirmenin sağlanabilmesi için, veriler bir sınıflandırma prensibi ile alt gruplara ayrılmıştır. Prensip olarak iki destek noktası arasındaki ilk ve son pandüller destek noktasının 4 m yakınına konulacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca şekillerde gösterilen ardı sıra gelen pandül arası mesafeler de maksimum 9,5 m olarak belirlenmiştir. Bu prensiplere göre; 7 çıktılı, 6 çıktılı, Y halatlı 5 çıktılı, Y halatsız 5 çıktılı, 4 çıktılı ve 3 çıktılı olarak pandül verileri gruplara ayrılmıştır. Şekil 6'da örnek olarak, 6 çıktılı pandül etabı ve Şekil 7'de örnek olarak, 4 çıktılı pandül etabı gösterilmiştir.



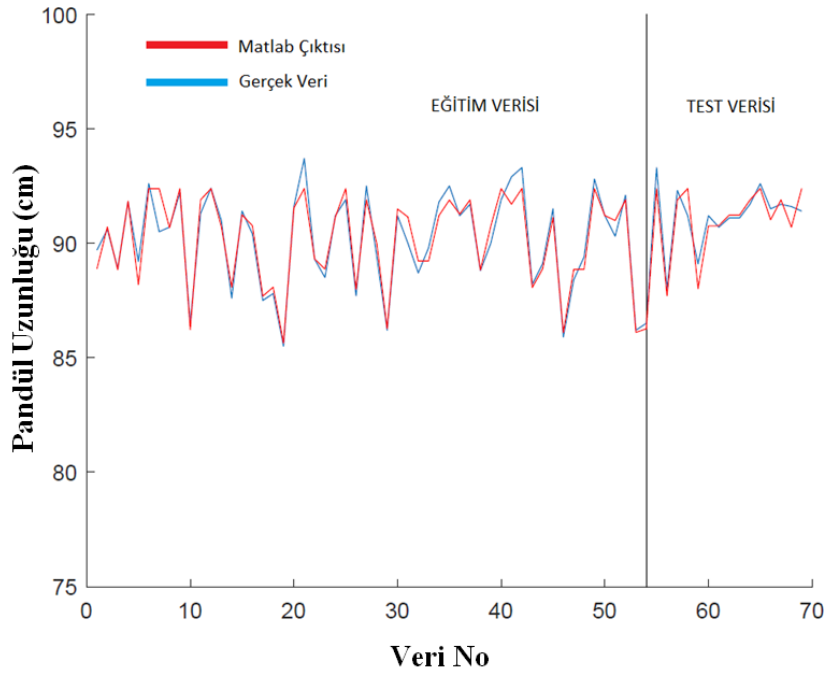
Şekil 6. Pandül etap prensibi - 6 çıktılı pandül etap prensibi



Şekil 7. Pandül etap prensibi - 4 çıkıtlı pandül etap prensibi

3.3. Yapay sinir ağlarının eğitilmesi

Matlab® yazılımı ile, oluşturulan alt veri grupları için ayrı ayrı yapay sinir ağı eğitilmiştir. Veriler eğitilirken her bir alt veri grubu için verilerin %90'ı eğitim için %10'u ise test için ayrılmıştır. Şekil 8'de bu eğitim ve test işlemi, 7 açıklıklı pandül sisteminin ilk çıktısı için gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere yapay sinir ağı çıktısı ile gerçek veriler ufak sapmalar ile büyük ölçüde örtüşmektedir.



Şekil 8. 7 çıkıtlı 1.pandül boyu uzunluğu kestirimi

3.4. Yapay sinir ağlarının hata oranları

Bu çalışmada Monte Carlo Çapraz doğrulama [12] yöntemi kullanılarak her bir yapay sinir ağı 100 iterasyon ile çalıştırılıp her seferinde gerçek değerler ile karşılaştırılarak, her bir pandül veri grubu için ortalama hata değerlerine ulaşılmıştır. Tablo 3'te ise tüm sinir ağları için hata oranı tablosu santimetre cinsinden görülmektedir. Görüldüğü üzere en yüksek ortalama hata 2.2 cm olarak 5 Pandüllü (Y halatlı) 2.Pandülde görülmektedir.

Tablo 3. Pandül uzunluğu ortalama tahmin hatası

| | 1.Pandül Hata Oranı(cm) | 2.Pandül Hata Oranı(cm) | 3.Pandül Hata Oranı(cm) | 4.Pandül Hata Oranı(cm) | 5.Pandül Hata Oranı(cm) | 6.Pandül Hata Oranı(cm) | 7.Pandül Hata Oranı(cm) |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 7 Pandüllü (Y halatlı) | 0.5781 | 0.4620 | 0.5721 | 0.5600 | 1.2006 | 0.7331 | 0.8756 |
| 6 Pandüllü (Y halatlı) | 0.5353 | 0.4494 | 0.2555 | 0.3552 | 0.6127 | 0.8082 | X |
| 5 Pandüllü (Y halatlı) | 1.2736 | 2.2218 | 2.0962 | 0.9582 | 1.1100 | X | X |
| 5 Pandüllü (Y halatsız) | 2.0373 | 1.5483 | 1.1019 | 1.2619 | 0.8883 | X | X |
| 4 Pandüllü (Y halatsız) | 0.9084 | 0.9841 | 1.3993 | 1.2111 | X | X | X |
| 3 Pandüllü (Y halatsız) | 1.9390 | 2.0699 | 1.3405 | X | X | X | X |

3.5. Pandül çizdirme sistemi

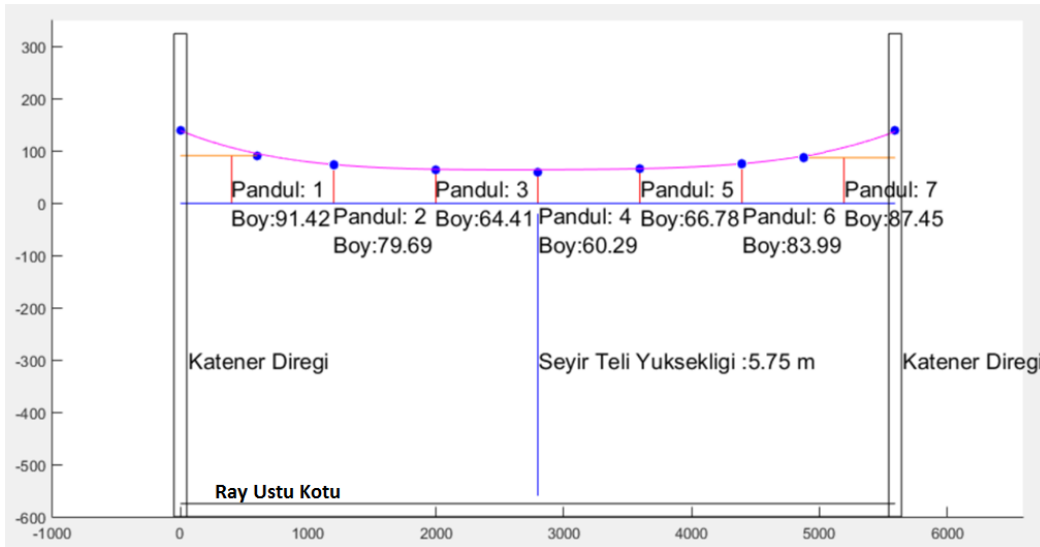
Tüm girdi ve çıktı değerlerine ek olarak pandül lokasyonları da bilindiğinde 2 direk arasındaki pandüllerin çizdirilmesi mümkün olmaktadır. Pandüllerin çizdirilmesi ve görsel kontrolü pandüllerdeki olası hataların fark edilmesi açısından önemli olabilmektedir. Dolayısıyla her pandül alt grupları için pandülleri çizdiren fonksiyonlar oluşturulmuştur. Pandül lokasyonları, veri setinin parçası olmadıklarından oluşturulan fonksiyonlara 2 direk arası açıklık bilgisiyle ile pandül lokasyonlarının da hesaplandığı kısımlar eklenmiştir. Bu kısımlar eklendikten sonra girdi ve çıktı değerleriyle birlikte pandül çizdirme fonksiyonları son hallerine getirilmiştir.

3.6. Otomatik pandül hesabı ve arayüz

Son olarak girdi değerlerinin girildiği takdirde pandül lokasyon ve boylarının hesaplanıp çizdirildiği toplu bir sistem tasarlanıp, Şekil 9'da gösterildiği gibi bir arayüzle kullanıcılara sunulmuştur. Bu arayüz Matlab® yazılımı GUI (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü) eklentisiyle tasarlanmıştır.

Kullanıcılar, girdi bilgilerini girip “Bilgileri girip bu butona basınız” butonuna basarak girdi satırını oluşturur. Bu girdi satırının, otomatik olarak hangi veri alt grubuna ait olduğu belirlenerek ve ilgili yapay sinir ağı çalıştırılarak, pandül boyları hesaplanır. Son olarak, bu satırla ilgili olan çizdirme fonksiyonu çalıştırılarak pandül çizimi oluşturulur. Dolayısıyla kullanıcı girdileri girdikten sonra karşısına Şekil 10'daki gibi, girdiği bilgiler için bir pandül etabı çizdirilmiş olur.

Şekil 9. Otomatik pandül hesabı arayüzü



Şekil 10. Pandül etabı çıktısı

4. Değerlendirmeler ve Sonuç

Pandül hesaplama işlemleri, daha önceki çalışmalarda belirtildiği üzere doğrusal olmayan bir denklem sistemidir. Bu sebeple doğrusal olmayan pandül hesapları için sonlu elemanlar yöntemi, Newton-Raphson iterasyonu gibi yöntemlerle sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu noktada, doğrusal olmayan ilişkileri modelleme yeteneği yüksek olan yapay sinir ağları önemli bir çözüm aracı olarak ortaya çıkmaktadır. Pandül hesaplamalarında, yapay sinir ağları etkin bir şekilde kullanılabilir ve hesap işlemlerinin daha verimli ve etkin hale getirilmesinde yeni bir zemin oluşturabilir.

Bu bakış açısıyla, bu çalışmada önceleri el ile hesaplanan günümüzde ise maliyetli yazılımlarla hesaplanabilen pandül boyu belirlenmesi konusunda, Matlab® yazılımının yapay sinir ağları eklentisi ile yapılan incelemelerde; eğitilen yapay sinir ağı, veri setindeki girdi ve çıktıları öğrendikten sonra beklenen çıktıya oldukça benzer veriler üretebilmiştir. Bu durum; yapay sinir ağlarının, mevcut raylı sistem katener tesislerindeki pandül verilerinin eğitim verisi olarak kullanıldığı uygulamalarda, gelecek pandül hesaplamaları için farklı bir yöntem olarak kullanılabilceğini göstermiştir.

Tablo 3'e bakıldığında, tüm pandül hesaplamaları için ortalama hata oranı 1,07 cm'dir. Bu değer yapay sinir ağları ile, pandül hesabı işleminin ne kadar yüksek doğrulukta yapılabildiğini göstermektedir. En düşük hata oranlarının 0,25 cm olduğu görülmüştür. En yüksek hata oranlarının ise, 2,21 cm olduğu görülmüştür. Bu gruptaki hata oranının yüksek olmasının sebebi veri setindeki 5 çıktılı Y halatlı veri grubuna ait projedeki verilerin azlığından kaynaklanmaktadır. Daha geniş bir veri setiyle daha düşük hata oranının gerçekleştiği diğer gruplarda görülmektedir. Gelecekte daha kalabalık veri setleriyle tahmin doğruluk oranları artırılabilir.

Oluşturulan sistem, daha geniş veri setleriyle geliştirilerek standart Y halatlı demiryolu projelerinde kullanılabilir. Bu sistem mantığının kullanılması, pandül hesaplama işlemlerinin çok hızla ve yüksek doğrulukla yapılması ve işlerin aksamadan proje sahasına tüm tesis için pandül hesaplarının çok kısa sürede otomatik olarak yapılması gibi kolaylıklar sunabilecektir. Gelecek çalışmalar olarak, katener sistemlerinde konsol-hoban takımları boru boyu ölçüleri de benzer mantıkla hat girdilerine göre hesaplanıp, boru boyutları belirlenmektedir. Gelecekte uygun veri setleri oluşturularak konsol-hoban setleri boru boyları belirlenirken de benzer mantık kullanılabilir. Ayrıca, daha çeşitli projelerden daha geniş girdi eklentileriyle güçlendirilen verilerin birleştirilip daha büyük veri setleri oluşturularak ve bu verilerin de gruplandırılıp eğitilmesiyle, her türden standart katener sistemi projesine daha yüksek hassasiyet ile yanıt verecek tek bir uygulama yapılabilir. Proje bazlı daha dar kapsamlı veriler için örneğin yalnızca Y halatsız katener sistemleri için vb. hedef odaklı sistemler oluşturulabilir.

Ülkemizde ve dünyamızda raylı sistemlerle taşımacılık, diğer taşımacılık modellerine önemli bir alternatif olarak gelişimini sürdürmektedir. İletim hatlarıyla donatılan elektrikli taşımacılık da hem çevreci hem de ekonomik çözümler sunabildiğinden yeni tesis edilen projelerin çoğu elektrikli işletme yapılmak üzere tesis edilmekte ve hali hazırda dizel işletmecilik yapılan hatlar da modernize edilerek sinyalizasyon ve elektrifikasyon tesisleri ile donatılmaktadır. Günümüzde -özellikle kent içi demiryolu ulaşımında- farklı enerjilendirme alternatifleri tartışılrsa da katener sistemleri şehirlerarası ulaşımında tek tercihken, şehir içi ulaşımlarda da yüksek oranda tercih edilmektedir. Dolayısıyla katener tesisi tasarımlarındaki akademik çalışmalar da bu yönde artmakta ve yeni bakış açılarıyla gelişmektedir. Bu çalışma da böylelikle bu alandaki kısıtlı olan literatüre diğer pandül hesaplama yöntem ve mantıklarına ek olarak katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışmada aktarılan sistem ve benzeri üretilen sistemler yaygınlaştığı takdirde, ülkemizdeki demiryolu yatırımlarının da hızla arttığı günümüzde, yazılım ithalatının bu alanda azalmasına katkı sağlayabilecektir.

Kaynakça

- [1] Y. H. Cho, "Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 315, no. 3, pp. 433-454, 2008.
- [2] Y. H. Cho, K. Lee, Y. Park, B. Kang, and K. N. Kim, "Influence of contact wire pre-sag on the dynamics of pantograph-railway catenary," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 52, no. 11, pp. 1471-1490, 2010.
- [3] S. P. Jung, Y. G. Kim, J. S. Paik, and T. W. Park, "Estimation of Dynamic Contact Force Between a Pantograph and Catenary Using the Finite Element Method," *Journal of computational and nonlinear dynamics*, vol. 7, no. 4, p. 041006, 2012.
- [4] J. H. Lee and T. W. Park, "Development of a three-dimensional catenary model using cable elements based on absolute nodal coordinate formulation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 12, pp. 3933-3941, 2012.

- [5] J. Benet et al., "An advanced 3D-model for the study and simulation of the pantograph catenary system," vol. 36, pp. 138-156, 2013.
- [6] Y. Song, Z. Liu, H. Wang, X. Lu, and J. Zhang, "Nonlinear modelling of high-speed catenary based on analytical expressions of cable and truss elements," *Vehicle System Dynamics*, vol. 53, no. 10, pp. 1455-1479, 2015.
- [7] 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, p. 1687814018776135, 2018.
- [8] G. Karaduman, E. Akın, B. Binay, and M. Dilekli, "Katener Sistemlerindeki İzolatör Kusurlarının Derin Öğrenme ile Tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 16, pp. 185-195., 2022.
- [9] M. Ö. Baştürk et al., "Pantograf Boynuz Hatalarının Derin Öğrenme ve Görüntü İşleme Teknikleri ile Tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 16, pp. 102-115, 2022.
- [10] Ş. Kuşdoğan and Ö. Doğruer, "Demiryolu Elektrifikasyonunda Katener Sistem Tasarımı," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 14, pp. 130-142, 2021.
- [11] P. Tan et al., "Multialgorithm Fusion Image Processing for High Speed Railway Dropper Failure-Defect Detection," *IEEE*, vol. 51, no. 7, pp. 4466 - 4478, 2019.
- [12] R. Fonseca-Delgado and P. Gomez-Gil, "An assessment of ten-fold and Monte Carlo cross validations for time series forecasting," in *International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2013, pp. 215-220.

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



Alırıza ATAM

Lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde, yüksek lisans eğitimini Eskişehir Teknik Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Yapı Merkezi İnşaat, Ulaşım Sistemleri firmasında elektrifikasyon tasarım mühendisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: alirizaatam@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Seçkin ULUSKAN: Yazma-gözden geçirme, düzenleme, doğrulama, tasarım. Alırıza ATAM: Yazma, görselleştirme, tasarım.



Demiryolu Çalışanlarının Psikososyal Gereksinimlerinin Karşılanmasında İş Yerinde Sosyal Hizmet Uygulamaları

Zilan UĞURLU*^{ID}, Merve Deniz PAK GÜRE^{ID}

Başkent Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Sosyal Hizmet Bölümü, Ankara, Türkiye

*zilanugurlu@baskent.edu.tr

(Alınış/Received: 01.12.2022, Kabul/Accepted: 11.01.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Demiryolu çalışanlarının örgütsel süreçler, iş yerinin yapısal ve fiziksel özellikleri, kurum politikaları gibi risk faktörleri nedeniyle iş yaşamları etkilenebilmektedir. Bu etkiler demiryolu çalışanlarında fiziksel, psikolojik ve sosyal yönlerden pek çok sorun ve gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Bunlar arasında fiziksel yönden kas-iskelet sistemi hastalıkları, işitme kaybı, diyabet ve kardiyovasküler hastalık riski; psikososyal yönden stres, depresyon, kaygı, ikincil travmatik stres, intihar gibi ruh sağlığı sorunları, tükenmişlik ve aile içi sorunlar bulunmaktadır. Demiryolu çalışanlarının karşılaştığı bu sorunların çözümünde iş yerinde sosyal hizmet uygulamaları çok işlevseldir. Bu çalışmanın amacı, demiryolu çalışanlarının psikososyal gereksinimlerinin karşılanmasında iş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının ortaya konulmasıdır. Demiryolu çalışanlarıyla yürütülen iş yerinde sosyal hizmet uygulamaları kapsamında sosyal hizmet uzmanları savunucu, danışman, klinisyen, eğitici, öğretici, aracı, bağlantı kurucu, yönetici, süpervizör, değerlendirmeci, araştırmacı gibi rol ve işlevleri üstlenmektedir. Bu bağlamda demiryolu çalışanları ile mikro, mezzo ve makro sosyal hizmet uygulamaları yerine getirilmektedir. Sonuç olarak, çalışanların iyilik halini ve örgütsel gelişimi desteklemedeki olumlu etkileri nedeniyle Türkiye’de iş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının demiryolu sektöründe faaliyete geçmesi önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu çalışanı, Psikososyal gereksinim, İş yerinde sosyal hizmet, Mesleki sosyal hizmet, Sosyal hizmet uzmanı

Occupational Social Work Practices in Providing the Psychosocial Needs of Railway Workers

Abstract: The work life of railway workers can be affected due to risk factors like organizational processes, structural and physical characteristics of the workplace, and corporate policies. These effects reveal many physical, psychological, and social problems and needs in railway workers. These include the risk of musculoskeletal diseases, hearing loss, diabetes, and cardiovascular disease. There are mental health problems like psychosocial stress, depression, anxiety, secondary traumatic stress, suicide, burnout, and family problems. Occupational social work practices are functional in solving these problems faced by railway workers. This study aims to reveal occupational social work practices in meeting the psychosocial needs of railway workers. Within the scope of occupational social work practices carried out with railway workers, social workers undertake roles and functions like advocator, counselor, clinician, trainer, instructor, mediator, linker, manager, supervisor, evaluator, and researcher. In this context, micro, mezzo, and macro social work practices are carried out with railway workers. As a result, it is suggested that occupational social work practices in Turkey should be activated in the railway sector due to their beneficial effects in supporting the well-being of workers and organizational development.

Keywords: Railway worker, Psychosocial needs, Social work in the workplace, Occupational social work, Social worker

1. Giriş

Demiryollarının ortaya çıkışı milattan önce 2200 yıllarına kadar uzanmaktadır. Babiller tarafından inşa edilen ve taş vagon yollarında çalışan tekerlekli araçların evrimi günümüz trenlerinin temellerinin atılmasını sağlamıştır. İlk tam ölçekli çalışan demiryolu buharlı lokomotif ise 1804 yılında İngiltere’de inşa edilmiştir [1]. 19. yüzyılın başında yaşanan bu hızlı gelişme tüm

Atıf için/Cite as: Z. Uğurlu, M. D. Pak Güre, “Demiryolu çalışanlarının psikososyal gereksinimlerinin karşılanmasında mesleki sosyal hizmet uygulamaları,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 174-185, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1212839

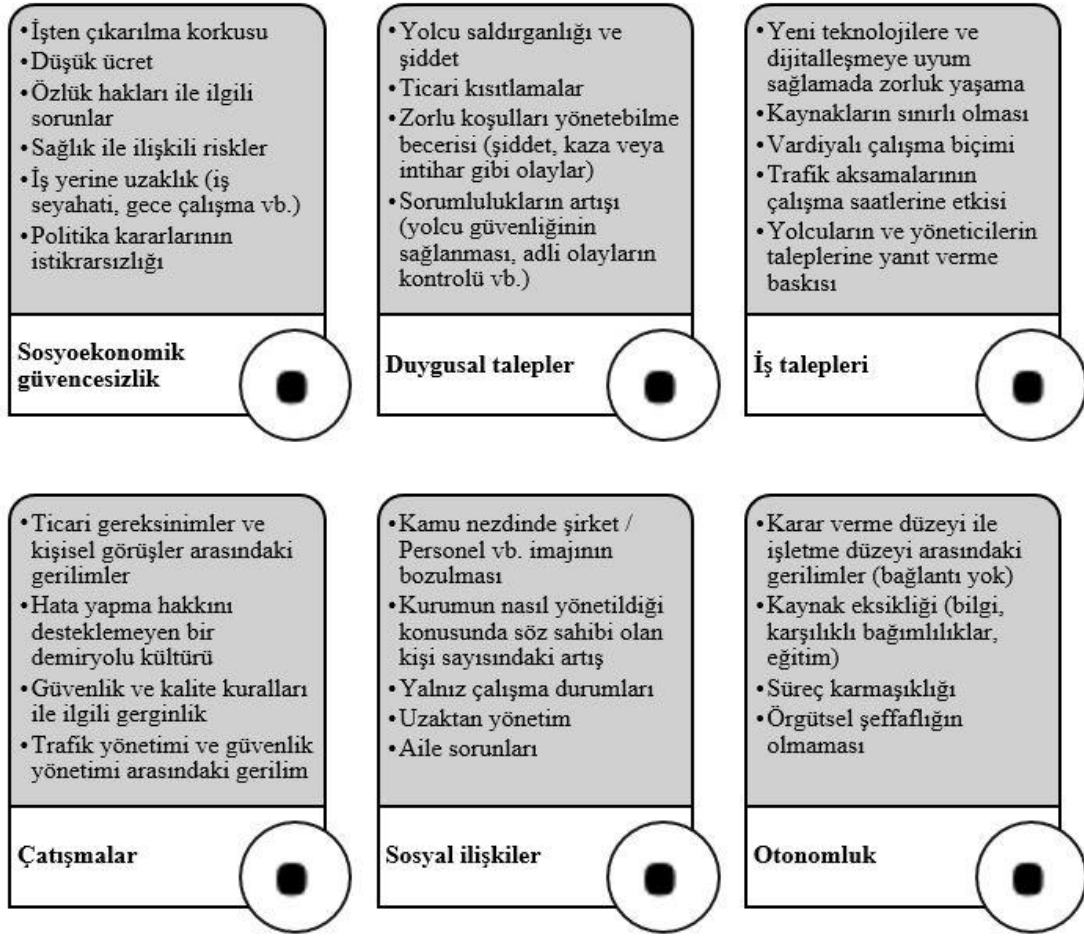
dünyaya yayılmıştır. Osmanlı İmparatorluğu döneminden itibaren verilen önem ile ülke çapında demiryolu ağı yaygınlaşmıştır. Türkiye’de demiryolları hem yük hem de yolcu taşımacılığı sektörünün başında gelmektedir. 1953 yılında Ulaştırma Bakanlığı’na bağlanan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) kamu eliyle bu hizmetlerin sunumunda rol oynamaktadır [2]. TCDD hem mevcut olan demiryolu hatlarının yenilenmesi hem de bu ağ içerisine yeni hatların eklenmesi için çalışmalarını sürdürmektedir. Türkiye’de toplam demir yolu ağı 13.050 kilometreyi aşmış durumdadır [3]. 2.000 kilometrelik konvansiyonel ve 5.000 kilometrelik yüksek hızlı demiryolu inşa edilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir [4].

Demiryolu taşımacılığı hizmetlerinin yürütülmesinde pek çok meslek grubu görev yapmaktadır. Bunlar arasında yöneticiler, makinistler, memurlar (tren teşkil memuru, hareket memuru, gişe memuru vb.), kondüktörler, teknisyenler, kontrolörler (yol kontrolörü, trafik kontrolörü, bölge kontrolörü, tesisler kontrolörü vb.), mühendisler, şefler (tren şefi, istasyon şefi, tesisler haberleşme şefi, yol bakım şefi vb.), işçiler (yol işçileri, sinyal işçileri, kataner işçileri, demiryolu hattı bakım onarımcıları vb.), bekçiler, güvenlik ve temizlik görevlileri bulunmaktadır [5]. Demiryolu taşımacılığının bazı zorlayıcı koşulları bu alanda çalışan meslek elemanlarının çeşitli risklerle karşı karşıya kalmalarına yol açabilmektedir. Bu riskler fiziksel, psikolojik ve sosyal açılardan demiryolu çalışanlarını etkileyebilmektedir. Uzun çalışma saatleri, fiziksel yönden zorlayıcı ve ağır bedensel aktivite gerektiren işler, iş kazası ile ilgili kaygılar, personelin özlük hakları ile ilgili yetersizlikler, iş yerindeki çatışmalı ilişkiler gibi çok boyutlu faktörler bu alanda çalışan meslek elemanlarının güçlükler yaşamasına yol açmaktadır [6].

Demiryolu taşımacılığına ilişkin çalışma koşulları bu alanda hizmet sunan profesyonellerin iyilik hali üzerinde doğrudan etki yaratmaktadır. Demiryolu çalışanlarında biyopsikososyal iyilik halinin geliştirilmesinde multidisipliner bakış açısının oldukça önemli bir yeri bulunmaktadır [7]. İş yaşamında çalışanların refahının arttırılmasına yönelik uygulamalar yapan mesleklerden biri sosyal hizmettir. Sosyal hizmet bireylerin, grupların ve toplumun yaşadıkları sorunların çözümünde, gereksinimlerin karşılanmasında ve refahın arttırılmasında bilgi, beceri ve değer temelini kullanarak uygulamalar yapan bir meslektir. Sosyal hizmetin özelleşmiş uygulama alanlarından biri olan ‘iş yerinde sosyal hizmet’ kapsamında ise iş yerini odak alan ve iş ortamlarında refahın sağlanmasını amaçlayan uygulamalar gerçekleştirilmektedir [8]. Bu çalışmanın amacı, demiryolu çalışanlarının psikososyal gereksinimlerinin karşılanmasında iş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının ortaya konulmasıdır. Bu kapsamda öncelikle demiryolu çalışanlarının sorunları ve gereksinimleri etraflıca irdelenecektir. İş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının temel çerçevesinin ifade edilmesinin ardından ise demiryolu çalışanlarına yönelik iş yerinde sosyal hizmet uygulamaları paylaşılacaktır.

2. Demiryolu çalışanlarının sorunları ve gereksinimleri

Demiryolu çalışanları, çalışma koşullarının doğasından kaynaklı olarak bazı sorunlar yaşayabilmekte ve bu sorunların çözümüne yönelik gereksinimlere sahip olabilmektedir. EVA Avrupa Çevre Dostu Taşımacılık Akademisi’nin 2013 Raporu [9]’na göre demiryolu çalışanlarının gereksinimleri altı boyutta şekillenmektedir. Bunlar arasında sosyoekonomik güvencesizlik, duygusal talepler, iş talepleri, çatışmalar, sosyal ilişkiler ve otonomluk bulunmaktadır (Şekil 1):



Şekil 1. Demiryolu çalışanlarının refahını etkileyen risk faktörleri [9]

Demiryolu çalışanları fiziksel, psikolojik ve sosyal yönlerden pek çok gereksinime sahiptir. İlk olarak, demiryolu çalışanları fiziksel işlevsellik ile ilişkili olarak çeşitli sorunlar yaşamaktadır. Daimi, vardiyalı ve düzensiz çalışma programlarına sahip olan demiryolu işçileri ile yapılan bir araştırmanın sonuçları, işçilerde sağlık sorunlarının yoğun olduğunu göstermektedir. Bu şikayetler arasında sindirim, solunum, eklem ve kemiklerle ilişkili sistemler (osteoartiküler) ve sinir sistemi semptomlarının yanı sıra uyku ile sorunlar bulunmaktadır [10]. Bu sorunlar iskelet-kas sistemi ile ilgili sorunlar, metabolik sorunlar ve işitme ile ilişkili sorunlar bağlamında detaylı biçimde ele alınabilir. Demiryolu çalışanları yaptıkları işler süresince iskelet-kas sisteminin korunması ile ilgili bazı gereksinimlere sahiptir. Örneğin, Malezya’da demiryolu işçilerinin iskelet sağlığının korunmasına yönelik yapılan taramada, çalışanların yüksek risk altında olduğu raporlanmıştır [11]. Demiryolu çalışanları diyabet ve kardiyovasküler hastalık riski ile karşı karşıya kalmaktadır [12, 13]. Çin’de yapılan bir araştırmanın bulguları uzun süreli gece vardiyasında çalışan erkek demiryolu işçilerinde bu riskin artış gösterdiğini ortaya koymaktadır [14]. Benzer biçimde, son derece düşük frekanslı manyetik alanlara maruz kalan İsviçreli demiryolu işçilerinde kardiyovasküler hastalık riski artış göstermektedir [15]. Son olarak, demiryolu çalışanlarında gürültüye bağlı işitme kayıpları çeşitli araştırmalarda raporlanmıştır [16]. Örneğin, Norveçli demiryolu işçilerine yönelik on yıllık izleme çalışmasında gürültüye bağlı işitme kaybı yüksek derecede bulunmuştur [17]. Benzer biçimde Kuzey Amerika’da bir kimya tesisindeki demiryolu çalışanlarının maruz kaldığı gürültü incelendiğinde çalışanların işitme kaybı açısından risk altında olduğu belirtilmiştir [18]. Capanni ve arkadaşları [19], gerçekleştirdikleri kohort analizi çalışmasında İtalya’da yüksek hızlı tren için kazılan tünelde çalışan demiryolu işçilerinin zorlayıcı fiziksel ve psikososyal çalışma şartları altında ağır bedensel

iş, vardiyalı çalışma, gece nöbeti, mineral tozları ve yüksek seviyede gürültü, elverişsiz iklim koşulları ve sosyal izolasyon gibi çeşitli risk faktörlerine maruz kaldıklarını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak demiryolları çalışanlarının yaşadıkları bu sorunlar, koruyucu-önleyici, iyileştirici ve rehabilite edici sağlık hizmetlerine duyulan gereksinimi ve önemi göstermektedir.

Demiryolu çalışanlarının fiziksel olduğu kadar psikososyal gereksinimleri de önemlidir. Demiryolu çalışanları katı protokolleri ve kısıtlı dinlenme imkanları nedeniyle ağırlıklı olarak stres altında çalışan bir meslek grubudur. Demiryolu çalışanlarının işi, mesleki sınıflandırma teorisine dayalı olarak 'yüksek gerilimli iş' olarak tanımlanmaktadır [20]. Demiryolu çalışanları iş yaşamını etkileyebilen pek çok stres faktörü ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu risk faktörleri örgütsel süreçler, fiziksel şartlar, iş yerinin yapısal özellikleri ve kurumsal politikalar gibi başlıklar çerçevesinde ele alınabilir. İlk olarak örgütsel süreçlerden kaynaklı stres etkenlerine bakıldığında; yöneticilerin ve çalışanların çelişkili ve yanlış takdir mekanizmaları, yetersiz olumlu geribildirim, denetimin adaletsiz olması, net olmayan amaçlar, kurum çalışanlarının yeterince bilgilendirilmemesi ve iletişimde yaşanan zorluklar öne çıkmaktadır. İkinci olarak iş yerinin fiziksel şartlarından kaynaklanan stres etkenleri ele alındığında; iş kazaları ile ilişkili riskler, yetersiz aydınlatma, havasızlık, radyasyon ve zehirli maddelere maruziyet, aşırı sıcak veya soğuk iç ve dış çalışma ortamı, aşırı ses ve uyarının olması, mahremiyetin gözetilmediği kalabalık çalışma ortamları düşünülmektedir. Üçüncü olarak; iş yerinin yapısal özelliklerinden kaynaklı örgütsel birimlerin bağımlılığı, ileri derecede yetkinlik gerektiren işler, aşırı ve amacını aşan formaliteler, görevde yükselme ve terfi olanaklarının sınırlı olması, karar alma mekanizmalarına dahil edilmeme ve merkezîyetçi yapı strese yol açabilmektedir. Son olarak ise örgüt politikalarından kaynaklanan gerçek dışı iş beklentileri, çalışma ekibinin sık değiştirilmesi, çelişkili uygulamalar, katı örgüt kuralları ve ücret politikası nedeniyle stres yaşanabilmektedir [21]. Aynı zamanda çalışanlar, işveren/yöneticiler veya çalışma arkadaşlarıyla iletişim sorunları, zayıf örgüt kültürü, yeni teknolojik gelişmeler ve örgütle ortak hedeflerde buluşamamaktan kaynaklanan stresle karşı karşıya kalabilmektedir [22].

Taşımacılık endüstrilerindeki işçiler, profesyonel ve yönetici meslekler dahil olmak üzere diğer mesleklerdeki işçilere göre daha yüksek oranda ruhsal sorunlara sahip olmaktadır [23]. Bir meta-analizden elde edilen sonuçlar, Çin'deki demiryolu çalışanlarının ruh sağlığı açısından sorunlar yaşadığını ve ruh sağlığı ile ilgili çeşitli göstergelerin ulusal ortalamasının altında olduğunu ortaya koymaktadır [24]. Demiryollarında çalışan personelin yaşadığı bu sorunların örgütsel süreçlerle ilişkili olduğu yönünde çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Örneğin, demiryolu çalışanlarında iş yükünün yoğun olduğunu ve tükenmişliğin görüldüğünü ortaya koyan çalışmalar vardır [25]. Türkiye'de demiryolu işçileri ile yapılan bazı çalışmalarda da benzer sonuçlar ele edilmiştir. Örneğin, demiryolu çalışanlarının yüksek gerilim hatlarına, gürültüye ve iş kazalarına maruz kalma risklerinin yüksek olduğu, çalışma koşullarının zorlayıcı olduğu (fiziksel olarak zorlayıcı ortamlarda yoğun ve düzensiz çalışma saatleri, düşük ücret vb.) ve bu nedenle iş tatminlerinin düştüğü ifade edilmiştir [26]. Aynı zamanda örgütsel süreçlerde yaşanan bazı zorluklar (personel ilişkileri, yönetim kademesi ile ilişkiler, iş yerinin karmaşık yapısı, iş kazası ile ilgili riskler, mola vermeme vb.) demiryolu çalışanlarında stresi arttırdığından dolayı psikolojik iyilik hali olumsuz etkilenmektedir [27, 28]. Demiryolu çalışanlarının çeşitli travmatik olaylara maruz kalma ihtimalleri de yüksektir. Bunlar arasında intihar girişimleri veya kaza sonucu ölümün meydana geldiği olaylar bulunmaktadır. Bu durum demiryolu çalışanlarında travmatik stres tepkilerinin ortaya çıkmasıyla ilişkili riskleri arttırmaktadır. Bu bağlamda aşırı uyarılmışlık, şok, uyuşma, korku, kaygı, kaçınma, suçluluk, uyku ve iştah sorunları, öfke, gelir ve iş kaybı korkusu gibi travmatik stres tepkileri demiryolu çalışanlarında artış göstermektedir [5]. Tüm bu olumsuz etkiler demiryolu çalışanlarında depresyon ve kaygı düzeylerinde artışa ve intihar düşüncelerinin yoğunlaşmasına yol açmaktadır [29].

Demiryolu çalışanları sosyal yaşamlarında da çalışma koşullarından kaynaklı pek çok stres faktöründen etkilenmektedir. Bu etkiler çoğunlukla aile ile olan ilişkilerde ortaya çıkmaktadır

[30]. Özellikle uzun çalışma saatleri bulunan ve uzun mesafeli yolculuklar yapan demiryolu işçileri, aileleri ile daha az zaman geçirmektedir [31]. Vardiyalı çalışma biçimi demiryolu çalışanlarının aile ilişkilerini ve sosyal yaşamlarını olumsuz yönde etkilemektedir [32]. Benzer biçimde Altundaş ve arkadaşlarının [26] çalışmasına göre hafta sonu veya diğer resmi tatillerde demiryolu personelinin mesai yapması sosyal aktivitelere katılımı engellemektedir. Demiryolu işçilerinin bulunduğu ailelerde yaşanan bu sorunlar boşanma oranlarının yükselmesine yol açmaktadır [33]. Ayrıca literatürdeki çalışmalarda demiryolu işçilerinin özlük hakları sebebiyle ailelerin ekonomik yönden de olumsuz etkilendikleri belirtilmektedir. Örneğin, Uyanık ve Yüksel [34] tarafından yapılan bir araştırmada Türkiye’deki demiryolu işçilerinin düşük ücretle çalışıyor olmalarından dolayı ailelerin geçim sorunları yaşadığı raporlanmaktadır. Demiryolu çalışanlarının yaşadığı bu çok yönlü sorunların çözülmesinde sosyal hizmet mesleğinin önemli bir yeri bulunmaktadır. Bu kapsamda öncelikle iş yerinde sosyal hizmetin temel çerçevesinin ortaya konulması faydalı olacaktır.

3. İş yerinde sosyal hizmet

Sosyal hizmet, insan davranışı kuramları ve sistem teorisinden faydalanarak bireylerin çevreleriyle etkileşime girdiği durumlarda devreye giren bir bilim dalıdır. Bireyin, eş, çocuklar, akrabalar, iş çevresi, okul çevresi, arkadaşlar ve komşular gibi birbirinden farklı sosyal sistemlerle kurduğu etkileşim dikkate alınarak birey, çevresi içinde değerlendirilir. Sosyal sistemlerin bir ya da birkaçında yaşanan zorluklar diğer sistemlerde de aksaklıkların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bireylerin gündelik yaşamlarının büyük bir kısmını geçirdikleri iş ortamlarından kaynaklanan problemler bireyin sosyal çevre ile ilişkisini olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda bireyin dahil olduğu sosyal sistemlerdeki problemlerin de iş hayatına yönelik olumsuz yansımaları olmaktadır. Örneğin, Bates ve Thompson [35] iş yerinde örgütsel stres, zorbalık ve tacizle karşı karşıya kalanlar ile işveren ve diğer çalışanlarla çatışmalı ilişkiler içerisinde olanların ciddi düzeyde psikososyal riskler taşıdığını ifade etmektedir. Bu psikososyal risklerin yönetilememesi gerek çalışanların biyopsikososyal yönden sağlığını olumsuz etkilemekte gerekse örgüt içerisinde iş verimliliğini düşürmektedir [36]. Sosyal hizmet uzmanları iş yerlerinde psikososyal açıdan risk altında olan çalışanlara yönelik koruyucu ve önleyici iş yerinde sosyal hizmet uygulamaları gerçekleştirmektedir [37].

İngilizcede ‘occupational social work’ olarak ifade edilen iş yerinde sosyal hizmet uygulama alanı ulusal literatürde ‘endüstriyel sosyal hizmet ve mesleki sosyal hizmet’ gibi isimlerle kavramsallaştırılmaktadır [38]. Solmaz ve Kutlu [39] bu kavramlardan endüstriyel sosyal hizmetin, üretim sektörü, sanayi ve fabrika ortamlarını çağrıştırmaları ve mesleki sosyal hizmetin, sosyal hizmetin iş yerindeki uygulamalarını bütünüyle yansıtamaması nedeniyle bu alan için iş yerinde sosyal hizmet kavramsallaştırmasının önerildiğini ifade etmiştir. Çalışmamızda da alanı tüm yönleriyle kapsayan bir kavram olması bakımından iş yerinde sosyal hizmet kavramının kullanılması uygun görülmüştür.

İş yerinde sosyal hizmet, sosyal hizmet uzmanlarının çalışan yönetimine müdahale ederek, doğrudan sektördeki personel yöneticilerine ve dolaylı olarak da örgütsel gelişime yardımcı olma konusunda beceri ve uzmanlıklarını genişlettiği alanlardan biridir. İş yerinde sosyal hizmet, çalışanlara sorunları hakkında konuşabileceği ve dinlenebileceği profesyonel gizlilikle korunan güvenli bir alan sunmaktadır. Bu yeri doldurulamaz derecede değerli bir hizmettir. İş yerinde sosyal hizmet uygulamaları sosyal hizmetin koruyucu ve önleyici uygulamaları için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Buradaki öncelikli amaç örgütün kar elde etmesi değil, çalışanların refahının sağlanmasıdır. Bireylerin iş yerini etkilediği; iş yerinin de çalışanlardan etkilendiği giderek artan bir biçimde kabul görmektedir. Bu nedenle çalışanların kullandıkları iletişim biçimleri ve kurumun yönetilme biçimi ile ilgili temel bir anlayışa sahip olmak gerekmektedir. İşçiler ve sorunları iş yerinin kültürü ve bütünsel arka planı kavranarak daha iyi anlaşılabilir. Önceki dönemlerde sosyal hizmet uzmanlarının iş yerindeki rol ve sorumlulukları önceden fark

edilmiş olmasına rağmen; çalışanların refahına yönelik müdahalelerinin iş yerinin ekonomik potansiyeline katkı sağlayabileceği öngörülememiştir. Ancak ilerleyen dönemlerde iyi formüle edilmiş bir sosyal hizmet müdahalesinin üretim ve satış programlarına olan etkisi giderek daha fazla hissedilmiştir. Sosyal hizmet uzmanları çalışanların iş yerlerine yönelik olumlu tutumlarını geliştirmeye yardımcı olmaktadır. Üretimin niceliğini ve niteliğini çalışanların işe olan tutumu belirlemektedir. Bu tutumdaki gelişim üretkenliği dolayısıyla da kazancı artırıcı etkiye sahip olacaktır [40].

İşyerlerinde çalışanlara yönelik uygulamalar yürüten meslek elemanları arasında sosyal hizmet uzmanları dışında endüstri mühendisleri, insan kaynakları uzmanları, psikologlar, iş yeri hekimleri, hemşireler vb. bulunmaktadır. Maiden [41] da, sosyal hizmetin çalışanlarla uygulama yürütmek üzere iş yerlerine giren tek meslek olmadığını; ancak sosyal hizmet uzmanlarının niteliklerinin iş yerinde etkili uygulamalar gerçekleştirebilmek için özellikle uygun olduğunu savunmaktadır. Sosyal hizmetin odağı olan çevresi içinde birey yaklaşımı iş yerinde sosyal hizmetin temelini oluşturmaktadır. İş yerinde sosyal hizmet diğer ortamlarda da sunulan uygulamaları ve becerileri kapsamakla birlikte örgütün yapısı ve hizmetlerin sunum biçimi bakımından birbirlerinden ayrılmaktadır.

İş yerinde sosyal hizmet birçok farklı odağı olan müdahalelerden oluşur. Maiden [41], iş yerinde sosyal hizmeti üç kategoride tanımlamıştır. Bu müdahaleler:

1. Politika, planlama ve yönetim: Doğrudan bireye yönelik danışmanlık içermeyen, çalışanlara yardım programlarının koordinasyonu, kurumsal sosyal sorumluluk programları, eğitim, kariyer geliştirme politikalarının formülasyonu ve etkili eylem programları,
2. Birey, aile ve özel nüfus gruplarına yönelik doğrudan hizmetler: Krize müdahale, kişisel sorunların değerlendirilmesi, alkol, uyuşturucu ve ruh sağlığı sorunlarının tedavisi için yönlendirme, kişisel sorunlara yönelik kısa süreli danışmanlık, çocuk ve yaşlı bakımı, sendikalaşma, emeklilik danışmanlığı ve nakil/görev yeri değişikliği hizmetleri,
3. Doğrudan hizmetler ile yönetim ve politika formülasyonunu birleştiren uygulamalar: Bireysel olarak çalışanlara, bakmakla yükümlü oldukları kişilere ve işverenlere yönelik tüm uygulamalardır.

İş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının bir kısmı 'çalışan destek programları'dır. Bu programlarda çalışanların sağlık, evlilik, aile, alkol ve madde bağımlılığı, çalışma yaşamında karşılaşılan sorunlar, psikolojik sağaltım, krize müdahale ve kariyer planlaması gibi konularda destek sunulmaktadır [42]. Böylece çalışanların iş verimini arttırmayı hedefleyen programlar uygulanmaktadır [43, 44]. Çalışan destek programlarının uygulandığı iş yerlerinde çalışanlara aile, çocuk, eş ve evlilik sorunları, psikolojik sorunlar, sosyal çevre ve iş kaynaklı stres, hasta, engelli, çocuk ve yaşlı bakımı, ev içi şiddet, HIV/AIDS danışmanlığı gibi konularda destek sağlanmaktadır. Bu programların üretkenliğinin artması, işe devamsızlığın azalması, stres kaynaklı hastalık izinlerinin azalması, çalışanların moral ve motivasyonlarının yükselmesi ve de çalışanlar arasındaki iletişimin artması gibi olumlu sonuçları bulunmaktadır. Bu programların çalışanlara yönelik iyileştirici etkisinin yanı sıra işverenler açısından da avantajlı yönleri bulunmaktadır [45].

İş yerinde sosyal hizmet uygulamalarından bir diğeri ise 'çalışan hizmet modelidir'. Bu model çalışanın psikososyal sorunlarının çözülmesinin çalıştığı kurum veya üyesi olduğu sendikaya aidiyet geliştirmesi ile ilişkili olduğunu öne sürer. Sosyal hizmet uzmanı çalışanlar ile işverenler/yöneticiler arasındaki sorunların çözümünde her iki tarafın da kazanç sağlamasını gözeten mesleki uygulamalar yürütmektedir. Bir diğer uygulama modeli olan 'işveren ve çalışan modelinin' odağı ise işveren ve yöneticilerdir. Sosyal hizmet uzmanları bu modelde kurum politikalarının belirlenmesinde rol oynamaktadır. 'Kurumsal sorumluluk modelinde' doğrultusunda ise sosyal hizmet uzmanları iş yerlerinin toplum kalkınmasını hedefine aldığı kurumsal sosyal sorumluluk projelerinde rol oynamaktadır. Hizmet alan kitleyi odağına alan

'tüketiciye hizmet modelinde' ise tüketici haklarına ve özel gereksinimli nüfus gruplarına yönelik uygulamalar yürütülmektedir. Diğer uygulama modellerinden toplumu hedef alan makro düzeyde uygulamalar yürütülmesiyle farklılaşan 'kamu politikaları modelinde' savunuculuk ve sosyal aksiyon faaliyetleri gerçekleştirilmektedir [37].

Sosyal hizmet uzmanları çalışanların psikososyal sorunlarını kanıta dayalı olarak değerlendirip teşhis etmektedir. Kanıta dayalı uygulamalar bilgi ve kanıt sağlama yönleriyle sosyal hizmet uygulamaları için yol gösterici olmaktadır [46]. Sosyal hizmet uzmanları çalışanların psikososyal sorunlarının tespitinin ardından bu sorun alanlarının çözümünde etkinliği araştırmalarla kanıtlanmış, koruyucu, önleyici, terapötik, rehabilite edici vb. müdahale yöntemlerini uygulamaya koymaktadır.

Sosyal hizmet uzmanlarının uygulamalarını yürütürken üstlendikleri birçok mesleki rol ve işlevleri bulunmaktadır. Sosyal hizmet uzmanları çalıştığı ortam ve sorun grubuna göre aracı, savunucu, danışman/klinisyen, vaka yöneticisi, iş yükü yöneticisi, süpervizör/personel geliştirici, yönetici, sosyal değişim aktörü, öğretici/eğitici, araştırmacı/değerlendirmeci ve profesyonellik rollerinden biri ya da birkaçını birlikte kullanabilmektedir [47, 48]. İş yerinde sosyal hizmet uygulamalarında çalışanın ve iş yerinin ihtiyacına uygun olan mesleki rol ve işlevler yerine getirilmektedir.

İş yerinde çalışan yaşlılar, kadınlar, eski hükümlüler, bağımlılık öyküsü olanlar, engelliler, kronik hastalık tanısı olanlar, psikiyatrik tanısı olanlar, tek ebeveynler, boşanmış olanlar vb. dezavantajlara sahip olan gruplar, psikososyal desteğe ve sosyal hizmet müdahalelerine diğer çalışanlardan daha çok ihtiyaç duymaktadır. Bu gruplardan engelli ve kronik hastalık tanılıların bakım, tedavi ve erişilebilirlik ihtiyaçları ön plana çıkarken, kadınlar toplumsal cinsiyete dayalı roller nedeniyle iş dışındaki bakım emekleri nedeniyle daha çok yıprandıkları için dezavantaj yaşayabilmektedirler. Yine bu gruplardan yaşlılar, eski hükümlüler, bağımlılık öyküsü bulunanlar, engelliler, psikiyatrik tanısı bulunanlar, boşanmış olan kadınlar iş yerinde ayrımcılığa maruz kalma riski daha yüksek olan gruplardandır [37, 49, 50].

4. Demiryolu çalışanlarına yönelik iş yerinde sosyal hizmet uygulamaları

Demiryolu işçileri ile gerçekleştirilen sosyal hizmet müdahaleleri tüm dünyadaki iş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının miladını oluşturmaktadır. Bu açıdan bakıldığında iş yerinde sosyal hizmetin kökenlerinde demiryolu işçilerinin gereksinimlerinin karşılanmasına yönelik motivasyon bulunmaktadır. İş yerinde sosyal hizmet ilk kez 1930'ların ortalarında Güney Afrika'da demiryolu işçilerine yönelik uygulanmaya başlanan özelleşmiş bir sosyal hizmet alanıdır. Tarihsel açıdan bakıldığında, sosyal hizmet uzmanlarının demiryolu çalışanlarının yaşadıkları sorunların çözümünde ve gereksinimlerin karşılanmasında önemli olduğu görülmektedir [51].

Sosyal hizmet uzmanları demiryolu çalışanları ile yaptıkları uygulamalarda mikro (demiryolu çalışanı), mezzo (demiryolu çalışanın ailesi, iş çevresi ve arkadaşlar vb.) ve makro (örgüt, topluluk, sendikalar, dernekler, meslek örgütleri vb.) düzeyde müdahalelerde bulunur. Sosyal hizmet uzmanları iş yerinde sosyal hizmet uygulamalarını yürütürken vakanın yapısına göre uygun olan mesleki rol ve işlevleri gerçekleştirmektedir [48]. Sosyal hizmet uzmanları demiryolu kuruluşlarında yürüttükleri uygulamalarda mesleki rol ve işlevlerini şu biçimlerde yerine getirmektedir:

Savunuculuk rolünü kullanarak çalışanların hakkı olan hizmetlere ve kaynaklara ulaşmasını amaçlar. Sosyal hizmet uzmanları çalışanların hakkını savunurken gerektiği hallerde kuruma, diğer çalışanlara, yöneticilere ya da hizmet sağlayıcılara karşı da hak savunuculuğu yapması gerekebileceğinin de bilincinde olmalıdır.

Sosyal hizmet uzmanları demiryolu çalışanlarının başa çıkma stratejilerini geliştirmelerinde yardımcı olmak üzere uygun psikososyal müdahale yöntemlerini kullanarak terapötik ilişki kurar. Çalışanların sosyal işlevselliğini sağlamak için danışman ve klinisyen olarak rol alır. Bu rolüyle çalışanların travma, şiddet, kaza ve intihar gibi kriz anlarını yönetmede kullanacakları başa çıkma stratejilerini geliştirmelerinde yardımcı olur.

Öğretici ve eğitici rolüyle demiryolu çalışanlarına yönelik sosyal yaşam, aile ilişkileri, iletişim becerileri, öfke kontrolü vb. ilişkin konularda eğitimler düzenleyerek davranış değişikliği sağlama ve önleyici hizmetler sunma işlevini görür.

Sosyal hizmet uzmanları vaka yöneticisi rolü ile çalışanların ve ailesinin psikososyal ve ekonomik özelliklerinin belirlenmesi ve topluma oryantasyonu, değerlendirilmesi, hizmetlerin planlanması işlevlerini yerine getirir. Sosyal hizmet uzmanları hizmetlerle bağlantı kurarak aracı olma, destek olma, vakanın durumunu takip etme ve kurum tarafından sağlanan hizmet ve uygulamaları izleme ve koordine etme işlevlerini üstlenir.

Aracı rolünde ekipteki demiryolu kuruluşunda çalışan diğer mühendis, memur, hekim, psikolog, insan kaynakları uzmanı vb. meslek profesyonelleri, yönetim, diğer kurum ve kuruluşlar ile sosyal hizmet kurumları arasındaki etkileşimi kuvvetlendirmek üzere bağlantı kurma rolünü kullanır.

Sosyal hizmet uzmanları gerektiğinde vakanın sosyal hizmet kurumlarına bildirimini için gerekli olan kayıt ve raporları tutar. Bu raporları gerekli kurumlara iletir ve gizlilik ilkesine uygun olarak dosyalar. Çalışma planı hazırlar, zaman yönetimi ve çalışmalarında kalitenin sürdürülmesi için iş yükü yöneticiliği rolünü yerine getirir.

Süpervizör ve personel geliştirici rolü ile çalışanların oryantasyonu, personel yönetimi, süpervizyon ve konsültasyon takibi yapar. Sosyal hizmet öğrencilerinin uygulama süpervizörlüğü görevini gerçekleştirerek demiryollarında iş yerinde sosyal hizmet alanında uygulama becerisi edinmelerini destekler.

Yönetici rolüyle iş yerinde yönetim, kurum içi ve kurum dışı eşgüdüm, politika ve program geliştirme, program değerlendirme çalışmalarını yürütür.

Sosyal hizmet uzmanları iş yerlerinde araştırmacı/değerlendirmeci rolü ile çalışanlar için fiziksel ve psikososyal yönden sorun oluşturabilecek risk alanlarını tespit edip, iyileştirici ve geliştirici düzenlemelerin yapılandırılmasında rol oynar.

İş yerinde sosyal hizmet müdahalelerinin etkinliğini ve yeterliliğini öz değerlendirme yaparak tespit eder. Kişisel, mesleki gelişim ve mesleğinin güçlendirilmesi işlevleriyle mesleki profesyonel olarak rolünü icra eder.

5. Sonuç

Demiryolu çalışanları iş yaşamını etkileyebilen örgütsel süreçler, fiziksel şartlar, iş yerinin yapısal özellikleri ve kurumsal politikalar gibi pek çok risk faktörü ile karşılaşmaktadır. Bu yönüyle demiryolu çalışanları fiziksel, psikolojik ve sosyal yönlerden çeşitli gereksinimlere sahiptir. Fiziksel açıdan kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, işitme kaybı, diyabet ve kardiyovasküler hastalık riski demiryolu çalışanlarında yüksektir. Psikososyal açıdan yüksek stres, depresyon, kaygı, ikincil travmatik stres, intihar gibi ruh sağlığı sorunları, tükenmişlik, aile içi sorunlar (iletişim sorunları, boşanma, bakım sorunları vb.) görülmektedir. Yaşlı, engelli, kadın vb. çalışanlar da iş yaşamındaki dezavantajları ve ayrımcılığa uğrama risklerinin fazla olması nedeniyle psikososyal yönden desteklenme ihtiyacı duymaktadır. Demiryolu çalışanlarının

karşılaştığı bu sorunların çözümünde iş yerinde sosyal hizmet uygulamaları etkili çözümler sunmaktadır. İş yerinde sosyal hizmet uygulamaları kapsamında demiryolu çalışanlarının psikososyal gereksinimlerinin karşılanması amaçlanmakta ve böylece sosyal işlevselliklerinin kazanılması sağlanmaktadır. Demiryolu çalışanlarıyla yürütülen İş yerinde sosyal hizmet uygulamaları kapsamında sosyal hizmet uzmanları savunucu, danışman, klinisyen, eğitici, öğretici, aracı, bağlantı kurucu, yönetici, süpervizör, değerlendirmeci, araştırmacı gibi rol ve işlevleri üstlenmektedir. Bu bağlamda sosyal hizmet uzmanları demiryolu çalışanları ile kanıta dayalı koruyucu-önleyici, iyileştirici ve rehabilite edici mikro, mezo ve makro düzeylerde iş yerinde sosyal hizmet uygulamaları yerine getirilmektedir. İş yerinde sosyal hizmet uygulamaları Türkiye’de giderek yaygınlaşmaktadır. Bu doğrultuda hem çalışanların iyilik halini hem de örgütsel gelişimi desteklemedeki olumlu etkileri nedeniyle ülkemizde iş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının farklı branşlardan yoğun bir çalışan portföyüne sahip demiryolu sektöründe de işlerlik kazanması önerilmektedir.

Bu çalışma kapsamında demiryolu sektöründe görev yapan personelin güçlendirilmesi amacıyla bazı öneriler sunulabilir. Farklı görev sahalarında çalışan demiryolu işçilerinin psikososyal sorunlarının çözülmesi ve gereksinimlerinin karşılanması amacıyla iş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının yürütülmesi önerilmektedir. Bu kapsamda TCDD bünyesinde kurulabilecek sosyal servisler aracılığıyla sosyal hizmet uzmanlarının istihdam edilmesi sağlanabilir. Sosyal hizmet uzmanları sosyal servislerde koruyucu, önleyici ve tedavi edici mesleki müdahaleler gerçekleştirebilirler. Koruyucu ve önleyici hizmetler kapsamında sosyal hizmet uzmanları demiryolu işçilerinin karşılaşılabilecekleri psikososyal risklerin tespitinde ve önlenmesinde rol üstlenebilir. Tedavi edici mesleki müdahaleler kapsamında ise demiryolu işçilerinin iş ve aile yaşamında karşılaştıkları sorunların çözülmesi amacıyla uygulamalar gerçekleştirilebilir. Bireyle, grupta ve ailelerle yapılabilecek bu çalışmalar danışmanlık, eğitim, savunuculuk, kaynak bulma ve bağlantı kurma gibi sosyal hizmet uygulamalarını içerebilir. Sosyal hizmet uzmanları demiryolu işçilerinin iş yerinde karşılaşılabilecekleri sorunlardan olan stres, tükenmişlik, mobbing, çatışma, şiddet, insan hakkı ihlalleri ve taciz gibi konuları ele alan mesleki müdahale stratejileri geliştirebilir. Bu bağlamda psikoeğitim programları, çalışana destek uygulamaları, grup çalışmaları ve hizmet içi eğitimler düzenlenebilir.

Kaynakça

- [1] A. Bracciali, “Railway wheelsets: history, research and developments”, *International Journal of Railway Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 23-52, Jan. 2016.
- [2] D. A. Deveci ve D. Çavuşoğlu, “İntermodal demiryolu taşımacılığı: Türkiye için fırsatlar ve tehditler”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, vol. 5, no. 1, pp. 93-120, Mart 2013.
- [3] TCDD. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Available: <https://www.tcdd.gov.tr/kurumsal/hakkinda> [Accessed: 15-Oct-2022].
- [4] Ulaşan ve Erişen Türkiye Raporu, “Demiryolu Sektörü”, 2018. Available: <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/demiryolu/demiryolu.pdf> [Accessed: 15-Oct-2022].
- [5] C. Bardon, and B. L. Mishara, “Systematic review of the impact of suicides and other critical incidents on railway personnel”, *Suicide and Life-Threatening Behavior*, vol. 45, no. 6, pp. 720-731, Apr. 2015.
- [6] J. I. Morgan, R. Abbott, P. Furness, and J. Ramsay, “UK rail workers' perceptions of accident risk factors: an exploratory study”, *International journal of industrial ergonomics*, vol. 55, pp. 103-113, 2016.
- [7] T. W. Taris, and W. B. Schaufeli, *Individual well-being and performance at work: A conceptual and theoretical overview*, Well-being and performance at work, Psychology Press, pp. 15-34, 2014.
- [8] P. A. Kurzman, *Occupational social work*. National Association of Social Workers and Oxford University Press, 2013.
- [9] EVA Avrupa Çevre Dostu Taşımacılık Akademisi Raporu, A guide to identifying and preventing psychosocial risks at work in the railway sector, 2013. https://www.cer.be/sites/default/files/publication/PSR_RAIL_A_guide_to_identifying_and_preventin_g_psychosocial_risks_at_work_EN.pdf

- [10] A. Aguirre, and J. Foret, “Irregularity of working hours in railway worker and types of complaints”, *International archives of occupational and environmental health*, vol. 65, no. 6, pp. 367-371, March 1994.
- [11] K. Ganasegeran, J. M. Menke, V. M. Challakere Ramaswamy, R. Abdul Manaf, A. M. Alabsi, and S. A. R. Al-Dubai, “Level and determinants of knowledge of symptomatic knee osteoarthritis among railway workers in Malaysia”, *Biomed research international*, vol. 9, no. 1, pp. 30-45, Jan. 2014.
- [12] D. Zdrengea, L. Poantă, and D. Gaita, “Cardiovascular risk factors and risk behaviors in railway workers. Professional stress and cardiovascular risk”, *Romanian journal of internal medicine= Revue roumaine de medecine interne*, vol. 43, no. 1-2, pp. 49-59, Jan. 2005.
- [13] A. Graziani, A. De Luca, A. Mazzantini, M. Montalti, N. Mucci, V. Cupelli, and G. Arcangeli, “Cardiovascular risk factors and metabolic shift workers in a population of railway workers”, *Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia*, vol. 34, no. 3, pp. 186-188, March 2012.
- [14] C. Dong, H. Zeng, B. Yang, Y. Zhang, and Z. Li, “The association between long-term night shift work and metabolic syndrome: a cross-sectional study of male railway workers in southwest China”, *BMC Cardiovascular Disorders*, vol. 22, n. 1, pp. 1-7, 2022.
- [15] M. Rööslı, M. Egger, D. Pfluger, and C. Minder, “Cardiovascular mortality and exposure to extremely low frequency magnetic fields: a cohort study of Swiss railway workers” *Environmental Health*, vol. 7, no. 1, pp. 1-7, July 2008.
- [16] D. Henderson, and S. S. Saunders, “Acquisition of noise-induced hearing loss by railway workers”, *Ear and hearing*, vol. 19, no. 2, pp. 120-130, Apr. 1998.
- [17] A. Lie, M. Skogstad, T. S. Johnsen, B. Engdahl, and K. Tambs, “Noise-induced hearing loss in a longitudinal study of Norwegian railway workers”, *BMJ open*, vol. 6, no. 9, pp. 1-6, Sep. 2016.
- [18] P. Landon, P. Breyse, and Y. Chen, “Noise exposures of rail workers at a North American chemical facility”, *American journal of industrial medicine*, vol. 47, no. 4, pp. 364-369, Apr. 2005.
- [19] C. Capanni, S. Sartori, G. Carpentiero, and G. Costa, “Work ability index in a cohort of railway construction workers”, *International Congress Series*, vol. 1280, pp. 253–257, June 2005.
- [20] X. Zhang, G. Chen, F. Xu, K. Zhou, and G. Zhuang, “Health-related quality of life and associated factors of frontline railway workers: A cross-sectional survey in the Ankang Area, Shaanxi Province, China”, *International journal of environmental research and public health*, vol. 13, no. 12, pp. 1192, 2016.
- [21] F. Luthans, *Organizational Behavior*, New York: McGraw-Hill, pp. 404, 1992.
- [22] S. Altan, “Örgütsel yapıya bağlı stres kaynakları ve örgütsel stresin neden olduğu başlıca sorunlar”, *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, vol. 2, no. 3, pp. 137-158, Nov. 2018.
- [23] S. A. R. Al-Dubai, K. Ganasegeran, R. Elkalmi, M. Alshakka, and N. Ghanem, “Perceived stress among Malaysian Railway workers”, *The Malaysian Journal of Medical Sciences: MJMS*, vol. 23, no. 5, pp. 38, Oct. 2016.
- [24] X. Yi, Y. Liu, J. Liao, D. Dou, and K. Peng, “Changes in Chinese Railwayman’s Mental Health (1988–2009): A Cross-Temporal Meta-Analysis”, *J. Beijing Jiaotong Univ. (Social. Sci. Ed.)*, vol. 9, pp. 47-53, 2010.
- [25] Y. Jiang, C. Wu, T. Hu, M. Chen, W. Liu, Y. Zhou, Z. Chen, and X. Xu, “Association for combined exposure to job strain, shift work on mental health among Chinese railway workers: a cross-sectional study”, *BMJ open*, vol. 10, no. 10, pp. 1-7, Oct. 2020.
- [26] E. Altundaş, G. Arslan, Z. Akingöl, N. Yazıcı, A. Varol, C. Turan, and S. Kalaça, “Demiryolu İşçilerinin Çalışma Koşullarından Kaynaklanan Sağlık Sorunları”, *TTB Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi*, vol. 10, no. 37, pp. 36-43, Ağustos 2010.
- [27] Ö. Canpolat, “Çalışanların stres düzeylerini etkileyen faktörler ve iş sağlığı hemşiresinin stres ile baş etmede etkililiği”, Master Thesis, Kocaeli University Institute of Science, Kocaeli, 2006.
- [28] A. Ö. Eyimaya and A. Tezel, “Evaluating occupational stress levels of the railway workers”, *Florence Nightingale Journal of Nursing*, vol. 29, no. 1, pp. 40–55, Feb. 2021.
- [29] A. Seidler, J. Hegewald, A. L. Seidler, M. Schubert, M. Wagner, P. Dröge, ... and H. Zeeb, “Association between aircraft, road and railway traffic noise and depression in a large case-control study based on secondary data”, *Environmental research*, vol. 152, pp. 263-271, 2017.
- [30] N. Mohan, and A. Sivaraman, “A Study on Occupational Stress among Railway Employees with Special Reference to Thrissur Railway Station”, *JRA-International Journal of Management and Social Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 53-61, July 2017.
- [31] T. Urhonen, A. Lie, and G. Aamodt, “Associations between long commutes and subjective health complaints among railway workers in Norway”, *Preventive medicine reports*, vol. 4, pp. 490-495, Sep. 2016.

- [32] C. L. Drake, T. Roehrs, G. Richardson, J. K. Walsh, and T. Roth, “Shift work sleep disorder: prevalence and consequences beyond that of symptomatic day workers”, *Sleep*, vol. 27, no. 8, pp. 1453-1462, Jan. 2004.
- [33] T. A. Ayoola, “Exploration of Literary Fiction as Historical Source for the Construction of Socio-Cultural History of Railway Workers in Nigeria”, *Lagos Historical Review*, vol. 19, pp. 17-36, 2019.
- [34] Y. Uyanık ve A. Yüksel, “Demiryolu İşçilerinin Çalışma Yaşamlarında Karşılaştıkları Güçlükler Üzerine Nitel Bir Çalışma”, *HAK - İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, vol. 10, no. 28, pp. 391-408, 2021.
- [35] J. Bates, and N. Thompson, “Workplace well-being: an occupational social work approach”, *Illness, Crisis and Loss*, vol. 15, no. 3, pp. 273-284, July 2007. <https://doi.org/10.1177%2F105413730701500308>
- [36] R. Portuné, “Psychosocial risks in the workplace: an increasing challenge for German and international health protection”, *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, vol. 63, no. 2, pp. 123-131, June 2012.
- [37] U. Yanardağ ve M. Zubaroglu Yanardağ, “İşyerinde sosyal çalışmayı Türkiye için düşünmek”, *Çalışma ve Toplum*, vol. 4, no. 67, pp. 2249-2270, Ekim 2020.
- [38] G. Şimşek. ve F. Altun, “Kurumsal Sosyal Sorumluluğun İşyerinde Sosyal Hizmet Bağlamında Değerlendirilmesi”, *Toplum ve Sosyal Hizmet*, vol. 32, no.3, pp. 1061-1077, Temmuz 2021.
- [39] U. Solmaz ve İ. Kutlu, “İşyerinde Sosyal Hizmet Mümkün mü? Farklı Ülkelerdeki İşyerinde Sosyal Hizmet Uygulamaları”, *Türkiye Sosyal Hizmet Araştırmaları Dergisi*, vol. 5, no. 2, pp. 172-185, Aralık 2021.
- [40] S. M. Parast, and H. S. Niya, “The roles of occupational social workers in workplace: With regard to social capital”, *MAGNT Research Report*, vol. 3, no.1, pp. 1118-1123, Jan 2015.
- [41] R. P. Maiden, “The evolution and practice of occupational social work in the United States”, *Employee Assistance Quarterly*, vol. 17, no. 1-2, pp. 119-161, Oct. 2001.
- [42] F. Altun, “İş yerinde sosyal hizmet uygulamalarının çalışanların iş tatminine ve örgütsel bağlılığına etkisi”, Doktora Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkileri Anabilim Dalı, İÜ, 2019.
- [43] C. Altuntaş, “Çalışan destek programları”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 12, no. 1, pp. 57-75, Ocak 2010.
- [44] J. A. Ritte, F. Halaevallu, and V. Ofahengau, *Careers in social work*, New York: Springer Publications, 2009.
- [45] V. Sutherland, and C. Cooper, *Strategic stress management: An organizational approach*, London: MacMillan Press, 2000.
- [46] M. Çay, “Vakalarda kanıta dayalı uygulama ve kanıtlara erişim”, Z. Uğurlu, M. Çay, U. Yanardağ (Eds.), *Sosyal Hizmette Vaka Temelli Öğrenme*, İstanbul: Yeniinsan Yayınevi, pp. 39-59, 2022.
- [47] A. Aktaş, “Çalışma Hayatında Kadınlara Karşı Psikolojik Taciz: Türkiye'deki Durum Ve İşyerinde Sosyal Hizmet Odağında Önerilen Çözüm Mekanizmaları”. *Uluslararası Hakemli Beşeri ve Akademik Bilimler Dergisi*, vol. 3, no. 10, pp.6-28, Ekim 2014.
- [48] B. W. Sheafor, and C. J. Horejsi, *Sosyal Hizmet Uygulaması* (1. Baskı). (Çev Ed: Baran Çiftci D.) Ankara: Nika Yayınevi, 2014.
- [49] S. Özen ve Ç. Özbek, “Çalışma yaşamında yaşlılık: Yaşlı çalışanlar ve insan kaynakları uygulamaları”, *Çalışma ve Toplum*, vol. 53, no. 2, pp. 547-572, 2017.
- [50] Y. Can ve N. B. Aksu, “Boşanma Sürecinde ve Sonrasında Kadın”, *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 15, no. 58, pp. 888-902, 2016.
- [51] A. V. Breda, “The scope of occupational social work in South Africa”, *Social Work Practitioner-Researcher*, vol. 21, no. 3, pp. 281-297, Spring 2009.

Özgeçmiş**Zilan UĞURLU**

2006 yılında Mimar Sinan Üniversitesi Sosyoloji ve 2013 yılında Ankara Üniversitesi Sosyal Hizmet lisans, 2009 yılında İstanbul Üniversitesi Adli Bilimler yüksek lisans, 2020 yılında Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Klinik Odaklı Sosyal Hizmet doktora eğitimini tamamlamıştır. 2021'den beri Başkent Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Sosyal Hizmet Bölümü'nde doktor öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları çocuklarla sosyal hizmet, kadın çalışmaları, adli ve tıbbi sosyal hizmettir.

E-Posta: zilanugurlu@baskent.edu.tr

**Merve Deniz PAK GÜRE**

Başkent Üniversitesi Sağlık Kurumları İşletmeciliği ve Sosyal Hizmet lisans, 2017 yılında Başkent Üniversitesi Sosyal Hizmet ve Ankara Üniversitesi Aile Danışmanlığı yüksek lisans, 2021 yılında Hacettepe Üniversitesi Sosyal Hizmet doktora eğitimini tamamlamıştır. Başkent Üniversitesi Sosyal Hizmet Bölümü'nde 2016-2019 yılları arasında araştırma görevlisi, 2019-2022 yılları arasında öğretim görevlisi, 2022'den beri de doktor öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları ailelerle ve gruplarla sosyal hizmet, tıbbi ve psikiyatrik sosyal hizmet, travma ve kriz durumlarında sosyal hizmettir.

E-Posta: mdpak@baskent.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Zilan UĞURLU: Kavramsallaştırma, Yazma-Gözden Geçirme ve Düzenleme, İnceleme, Kaynaklar. Merve Deniz PAK GÜRE: Kavramsallaştırma, Yazma-Gözden Geçirme ve Düzenleme, Görselleştirme, Kaynaklar, Kontrol.



Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Termografik Muayene ile Kontrolü

Seyid Fehmi DİLTEMİZ*¹, Ersin EROĞLU²

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havaacılık Bilimi ve Teknolojileri Bölümü, Eskişehir, Türkiye

*fdiltemiz@ogu.edu.tr

(Alınış/Received: 11.11.2022, Kabul/Accepted: 23.01.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Endüstriyel ihtiyaçlarda artış ve yeni mühendislik malzemelerinin gelişmesiyle birlikte her türlü makine ve araçta teknolojik gelişmeler büyük bir hız kazanmıştır. Raylı sistem teknolojilerinde seyahat sürelerinin azalması amacıyla yüksek hızlı araçların geliştirilmesini sağlamıştır. Bu araçların artan hızı ile yapısal olarak daha dayanıklı malzemelerin araştırılması ortaya çıkmıştır. Metalik malzemeler, özgül dayanım kapasiteleri, şekillendirilebilirlikleri ve yüksek iletkenlikleri nedeniyle raylı sistem uygulamalarında ihtiyaçları karşılamamaktadır. Alternatif olarak kompozit malzemelerin kullanımı bulunmaktadır. Ancak kompozit malzemelerin kullanımını sınırlayan etmenler vardır. Bunlardan biri tahribatsız kontrol metodlarının metalik malzemelere göre zor ve karmaşık olmasıdır. Tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan Termografik (TR) analiz yöntemi kompozitlerin muayenesinde kullanılmaktadır. Hızlı, düşük maliyet ve işlem kolaylığı TR'nin avantajlarını arasındadır. Bu çalışma iki kısımdan meydana gelmektedir. İlk bölümünde raylı sistem araçlarında kullanılan kompozit yapısal bileşenler hakkında literatür araştırılması yapılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında, raylı sistemlerde kullanılan katmanlı polimer matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Termografik yöntemi ile bu numunelerin tahribatsız kontrolü incelenmiştir. İncelemenin sonunda, üretilen kompozit parçalarda termografik test metodunun kusur tespitinde başarılı olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kompozit malzemeler, Termografi, Yüksek hızlı tren, Raylı sistem kompozit malzemeleri, Tahribatsız muayene

Thermographic Testing of Composite Materials Used in Rail System Vehicles

Abstract: With the increase in industrial needs and the development of new engineering materials, technological advancements have gained great momentum in all types of machinery and vehicles. High-speed vehicles have been developed in rail system technologies to reduce travel times. With the increasing speed of these vehicles, the research for structurally more durable materials has emerged. Metallic materials do not meet the requirements due to their specific strength capacities, formability, and high conductivity. Alternatively, the use of composite materials is found. However, there are factors that limit the use of composite materials. One of these is that non-destructive control methods are difficult, and complex compared to metallic materials. Thermographic (TR) analysis method, which is one of the non-destructive examination methods, is used in the examination of composites. Fast, low-cost and ease of process are among the advantages of TR. This study consists of two parts. In the first part, literature research on composite structural components used in rail system vehicles was carried out. In the second part of the study, layered polymer matrix composite specimens which are used in railway systems were produced. The non-destructive control of these specimens was examined by the thermographic method. As a result of the examination, it was observed that the thermographic test method was successful in detecting defects in the composite parts produced.

Keywords: Composite materials, Thermography, High speed train, Rail vehicles composite materials, Non-destructive inspection

Atıf için/Cite as: S. F. Diltemiz, E. Eroğlu, "Raylı sistem araçlarında kullanılan kompozit malzemelerin termografik muayene ile kontrolü" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 186-198, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1202657

1. Giriş

Kompozit malzemeler uzun yıllardır kara, deniz ve hava araçlarında kullanıldığı gibi demiryolları araçlarında da kullanılmaktadır. Her bir araçta kullanım yeri ve ihtiyaca göre, kompozit malzemelerin avantajlarından faydalanılmaktadır. Kompozit malzemeler uzun yıllardır demiryolu endüstrisindeki belirli uygulamalar için rutin olarak kullanılmaktadır.

İngiltere'nin, Güney Bölge banliyösünde, 1950'lerin başından itibaren geleneksel metal kaplı ahşap kapıların yerine, yorulma ömrünün en az iki kat olan cam elyaf takviyeli plastik (CTP) içeren kapılar kullanılmaktadır [1].

Karmaşık üç boyutlu kalıplanmış profillerin, kabin gövde yapısal bileşenlerinin ve araç iç kısımların imalatında, yüksek sertlik-ağırlık oranına sahip kompozit paneller günümüz raylı araçlarında kullanılmaktadır. Araştırma kuruluşları ve kompozit malzeme üreticileri tarafından demiryolu araçları için kinematik kapaklar, ön gövde, binış ve iniş kapıları, dış yan duvar panelleri, tavan dış panelleri, yan alt panelleri, bojiler, zemin altı yapılar, iç havalandırma tavan panelleri, iç duvar panelleri, masalar, bagaj rafları, koltuklar ve tekerlek setleri gibi daha gelişmiş kompozit yapılara yönelik araştırmalar ise halen yürütülmektedir [2].

Kompozit sandviç yapılar, hafif ve nispeten kalın bir ara tabaka (çekirdek) ile ayrılmış iki ince fakat sert yüzey katmanından oluşur [3]. Yüzey katmanları, daha yüksek elastik özelliklere bağlı olarak, bükülme ve düzlem içi hareketlere dayanırken, kesme yükleri çekirdek tarafından karşılanır [4]. Bu nedenle kompozit sandviç yapılar, havacılık yapıları, yüksek hızlı deniz araçları, trenler ve yarış arabaları gibi ağırlığın minimumda tutulması gereken yüksek performanslı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Bununla birlikte, zayıf yangın direnci kritik bir sorundur [6]. Yanıcı olmaları nedeniyle, polimer kompozit kaplamalar genellikle yangına maruz kaldıklarında katmanlarının arası ayrılır, tabakalaşma oluşur, tutuşur ve yanar. Ateş/alev koruması olmadan, sandviç kompozitler büyük miktarda ısı ve toksik duman salınımı ile yanabilir, bu da kullanımını sınırlar ve yüzey katmanının ve çekirdeğin ayrışması nedeniyle yapısal arızaya neden olabilirler [7].

Kompozitlerin yanmaya karşı direnç özelliklerini geliştirmek için katkıların eklenmesiyle polimer matrisinin modifikasyonudur [8]. Çeşitli çalışmalarda Tetrabromobisphenol A (TBBPA), Alüminyum Tri-hidroksit (ATH), Amonyum polifosfat (APP), Silikonlar gibi alev geciktirici katkı maddeleri eklenmesi, kompozit malzemelerin yangına karşı olan özelliklerini başarıyla geliştirmiştir [9], [10], [11].

Demiryolu endüstrisi için, fenolik reçineler, düşük seviyede zehirli dumanlar ile yanmaya karşı dirençlidir. Bu nedenle tipik olarak Londra Metrosu gibi tünel gibi kapalı alanlarda çalışmak üzere tasarlanmış raylı araçlar için kullanılırlar [12].

Kompozit malzemelerin üretim kaynaklı hatalarının yanı sıra, hizmet ömrü boyunca çalışma koşullarından kaynaklanan çeşitli hasarları ile de karşılaşmaktadır. Yapıların hasarlarını karakterize etmek ve gerekli tedbirleri almak için çeşitli tahribatsız muayene yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Kompozit malzemelerin üretim yönteminin, geleneksel üretim yöntemlerden farklı olması ve güvenlik gereksinimlerinden dolayı belirli periyotlarda kontrol edilmesi şarttır. Kompozit malzemelerin yapışma kontrolü için Fokker yapışma testi, akustik emisyon, ultrasonik, X-ray/nötron radyografi, shearografi, termografi, görsel muayene; kaçak testi ve tap test gibi geleneksel tahribatsız muayene yöntemleri kullanılmaktadır [14]. Bu kontrol yöntemleri çeşitli olmakla beraber hepsinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu yöntemlerin kullanım

yerleri ve hassasiyetleri açısından farklılık olmakla beraber kontrol edilecek malzeme ve aranılan hataya göre metot seçimi yapılmaktadır.

Kompozit malzemelerin gelişmesinin bir sonucu olarak, büyük yapısal kompozit malzemeler seri imalat sistemlerde üretilmektedir. Gerek ihtiyaç duyulan iş gücünün azaltılması gerekse üretim hızını arttırmak için, üretim esnasında temassız termografi kontrolleri kullanılmaktadır [15].

Kompozit malzemelerin kusurlarının tespit etmek için termografinin etkinliğini Avdelidis ve ark. [16] incelemiştir. Termografi analiz yöntemi ile incelenen tüm örneklerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tekniğin avantajları, yüzey veya yakın yüzey kusurları için hızla geniş alanların kontrol edilebilmesi ve kolayca yorumlanabilir sonuçlar üretmesidir. Dezavantajları ise, başarısının kusur derinliğine ve boyutuna bağlı olmasıdır.

Termografi, NAS410 ve EN4179 gibi uluslararası NDT standartlarında tanımlanmıştır. Geçmişte termografi ekipmanı maliyeti yüksek olmasına rağmen, yakın zamanda geliştirilen portatif sistemler daha uygun fiyatlarla temin edilebilmektedir [17].

Bu çalışmada ilk olarak, raylı sistem araçlarında kullanılan kompozit yapıları parçaları literatür yönüyle irdelenmiştir. Ayrıca raylı sistemlerde kullanılan polimer matrisli kompozitlerde sık rastlanılan hata tiplerinin termografi ile tespit edilebilirliği deneysel olarak test edilmiştir.

2. Raylı Sistem Yapılarında Kullanılan Kompozit Yapılar

Araştırmacılar ve kompozit malzeme üreticileri tarafından kompozit malzemelerin yapısal bileşenler olarak kullanım avantajları tespit edilmiştir. Bu nedenle kullanım alanlarının artması sonucu raylı sistem uygulamalarında kompozitlerin kullanımı son yıllarda oldukça artmıştır. Mevcut uygulamalarda raylı sistem araçlarında kompozitlerin kullanımı büyük ölçüde kabin gövdesi ve koltuk parçalarındadır. Yüksek sertlik / ağırlık oranı gerektiren diğer iç bağlantı parçaları ve paneller gibi karmaşık üç boyutlu profillere sahip bileşenlerle sınırlıdır. Ayrıca ray traverslerinde kompozit malzemelerin kullanımı da araştırılmaktadır [18]. Raylı sistem yapılarında kullanımı yaygın olan, örnek parçalar sırasıyla maddeler halinde ele alınmıştır.

2.1. Uzay kafes yapısı

Özellikle hafif raylı toplu ulaşım araçlarından tramvay ve metro kabinlerinde gövde destek parçalarının ağırlık azaltılması ve yüksek mukavemet gereksiniminden dolayı fiber takviyeli kompozit uzay kafes yapıları kullanılması ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır [19].

Fiber destekli kompozitlerin endüstriyel kullanımı, son on yılda yapısal uygulamalar için büyük oranda artmıştır. Mukavemet özelliklerinin örgü açısına bağımlılığı, yapılara özgü optimizasyon yoluyla ağırlığın düşürülmesi için avantaj sağlamaktadır. Singh ve ark. tarafından yapılan çalışmada optimize edilmiş kompozit tasarım, metal tasarımına kıyasla yaklaşık % 15,7 ağırlık kazanımı sağlamıştır [19].

2.2. Demiryolu aksı

Demir yolu aksı, demir yolları üzerinde seyahat eden raylı sistemler taşıtının, ray üzerinde bulunan tekerlerinin bağlı olduğu yapısal bileşen olup, demiryolu akslarının hafifletilmesi potansiyeli, öncelikle bir raylı taşıtın aksının yay olmadan ağırlığının azaltılması araştırılmıştır [20]. Raylı aracın, en çok gerilmeye maruz kalan bileşenlerinden biri olan yaysız aks kütlelerini azaltılması; ray hasarını, enerji tüketimini, emisyon değerlerini ve toplam işletme maliyetlerini azaltmaya yardımcı olacak ve daha hafif bir taşıt elde edilecektir [21], [22], [23]

Ray tekerlek takımı hafiflemesi açısından, bir yük vagonu ile ilgili Shahverdi vd. [24] tarafından fizibilite çalışması yayınlanmıştır. Ayrıca British Rail Gelişmiş Yolcu Treni'nin geliştirilmesi sırasında bir ray aksının hafiflemesine için karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin kullanımını araştırılmıştır [1].

Kompozit demiryolu aksı tasarımı için çeşitli tasarım konseptleri geliştirilmiştir. Bu konseptler yorulma dayanımını arttırmak için matris olarak epoksi reçine ile takviye edici karbon fiber kullanılmasına dayanmaktadır [21].

2.3. Ön kabin

Yüksek hızlı trenlerin gelişimi ile ön kabinin hücum kenarında yer alan yüzeylerin darbe dayanımı, hafiflik, aerodinamik tasarım, üretilebilirlik ve endüstriyel estetik tasarım ihtiyaçlarından dolayı kompozit malzeme kullanım ihtiyacı doğmuştur. 200 km/s hıza ulaşan hızlı trenlerde cam elyaf takviyeli poliüretan çekirdekli çift kaplama yüzeyli sandviç kompozit malzemeden imal edilmiş ön kabin tasarımı kullanılmıştır [1].

Kompozitlerin günümüzde kabin ön uçları için makul bir seçim olduğuna örnek, Adtranz tarafından tedarik edilen C20 Stockholm metro aracı için verilen kararda görülmektedir. Ön kabinin karmaşık şekli, üreticiyi kompozit malzeme kullanımına yöneltmiştir. Kabin, tünel operasyonları için yangın güvenliği gerekliliklerini yerine getirirken, genel sertliğe katkıda bulunacak şekilde tasarlanmıştır [2].

2.4. Kapılar

Raylı sistem araçlarında personel, yolcu ve yük kapıları mekanik olarak tekrarlı yükleme altında olduğundan, yorulma hasarı oluşmaktadır. Yorulma ömrü ile bağlantılı olarak bu kapıların kullanım ömrü hesaplandığında; güvenli ve bakım maliyeti etkinliği açısından 1950'lerde İngiltere banliyö kapılarının dökme alüminyum veya çelik yerine cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemeden üretilmesi halinde yorulma ömrünün en az iki kat fazla olduğu görülmüştür [1]. İspanyol raylı sistemler üreticisi CAF firması tarafından, İngiliz demiryolu işletmeleri için, tren setlerinin vagon aralarındaki geçiş kapıları, alüminyum dış kaplamalı bal peteği çekirdekli sandviç yapıdan imal edilmiştir [25].

2.5. Zemin panelleri

Zemin panelleri kabin tabanında bulunan uzun boyutlu yürüyüş ve yük taşıma amacıyla tasarlanan yapısal bileşenlerdir. Yüksek hızlı trenlerin artan hızı ile artan araç içi gürültü, sorunu yeni bir problemi ortaya çıkarmaktadır. Yüksek hızlı bir trende en gürültülü yerler genellikle vagonun uç kısımlarındadır [26]. Bu alandaki önemli ses kaynakları; boji bölgesindeki tekerlek / ray gürültüsü, aerodinamik gürültü ve titreşimdir [27]. Başlıca gürültü aktarım yolları ise havadan gelen ses ve zeminden gelen yapı kaynaklı sestir [28].

Yüksek hızlı bir trenin kompozit zemini büyük ve karmaşıktır. Dışarıdan içeriye doğru olan sandviç yapıdaki malzemeler titreşim sönümlenme kaplaması, alüminyum ekstrüzyon destek parçaları, ahşap destek kirişleri, titreşim sönümlenme kaplaması, ses emici malzemeleri, ses yalıtım malzemesi, ahşap zemin ve zemin kaplamasından oluşur. Kompozit malzemelerin zemin panellerinde kullanılması ile özellikle ses ve titreşim yalıtımının sağlanması amaçlanmaktadır [29].

2.6. Boji

Raylı sistemler aracının bojisi, araç gövdesinin ağırlığını destekler, tekerlekleri üzerinde barındırır ve titreşimleri sönmeler [30]. Bojinin ağırlığı, toplam araç ağırlığının yaklaşık %37'sini oluşturur. Özellikle, boji ağırlığının yaklaşık %20'sini oluşturan boji çerçevesi, aracın gövdesi tarafından dikey yük, frenleme ve hızlanma yükü, burulma yükü ve çekiş yükü gibi ağır statik ve dinamik yükleri desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle, yekpare çelik (özellikle bir yük arabası) veya kaynaklı yapılarla boji çerçeveleri üretmek yaygındır. Bu tür boji çerçeveleri ağırdır [31]. Geleneksel boji yapısı, ağırlığı azaltmak için kaynaklı bir çelik kutu olarak üretilmiştir. Kompozit boji de dış form olarak geleneksel olana benzer. Kompozit bojiler, cam/epoksi önceden reçine emdirilmiş eyaflardan, ribler ve köpük ara tabaka (çekirdeklerden) imal edilir.

2.7. Gövde - kabin

Raylı sistemlerde gövdenin hafif tasarıma sahip olabilmesi için kompozitler kullanılmıştır. Bu sayede daha hafif araçlar üretilebilmiş ve faydalı yük kapasitesinde artış sağlanarak veya hafif aracın mevcut demiryolu altyapısı üzerindeki zararlı etkisini azaltarak fayda sağlanmıştır. Kore'de kullanılan bir raylı sistem gövdesinde, sandviç kompozit bir yapının, paslanmaz çelikte birlikte hibrit bir tasarımı kullanılmaktadır [32]. Ağırlığı en aza indirmek için sandviç kompozit yapıdan yararlanılırken, elektrikli ekipmanın kolay montajı ve tasarım modifikasyonu için çelik alt çerçeve kullanılmıştır.

3. Raylı Sistemlerde Kullanılan Kompozitlerin Tahribatsız Kontrol Yöntemleri

Raylı sistemlerde de kullanılan kompozitlerin tahribatsız muayenesi, seyahat güvenliğinin sağlanması açısından kritik seviyede önemlidir. 1998 yılında Almanya'da meydana gelen ve 101 kişinin ölümü, 88 ağır toplam 194 yaralanması ile sonuçlanan hızlı tren kazası, tahribatsız muayene tekniklerinin uygun kullanılmaması sonucu meydana gelmiştir. Kompozit bir parça olmamakla beraber, tren tekerleğindeki imalat kaynaklı kusur, ultrasonik tekniklerin uygun şekilde kullanılmaması nedeniyle tespit edilememiş, sonuçta tekerlek yapısal bütünlüğünü kaybederek trenin yüksek hızda raydan çıkmasına neden olmuştur [33]. Bu olay, raylı sistemlerde tahribatsız tekniklerin uygun kullanımı ve güvenilirliğinin yüksek olması gerekliliğinin önemini vurgulamaktadır. Kompozit malzemelerde sık karşılaşılan kusurlar, katmanlar arası ayrılma, çarpılma, darbe, yük kaynaklı hasarlar (çökme, ezilme, fiber kırılması vb.), yüzey çatlakları, erozyon şeklinde sıralanabilir [34].

Kompozitlerin kontrolünde ilk olarak akla gelen tahribatsız muayene metodu görsel muayenedir. 3 boyutlu tarayıcılar, CMM ve diğer hassas ölçüm aletleri ile kompozit malzemelerin ölçüsel değişimleri görülebilir. Yüksek çözünürlüklü kameralar, basit optik büyüteçler yardımıyla; fiber yönelimi, çarpılma, darbe, yük kaynaklı hasarlar (çökme, ezilme, fiber kırılması vb.), yüzey çatlakları vb. süreksizlikler şiddetleri ve konumlarıyla birlikte tespit edilirler [34].

Radyografik test ile bal peteği yapılarda bulunabilen su absorpsiyonu, katmanlar arası ayrılma (delaminasyon) kusurları değerlendirilebilmektedir. Radyasyon kaynağı olarak günümüzde genellikle X ışın katot tüplerinden yararlanılmaktadır [35].

Ultrasonik test tekniği kompozitlerde yaygın olarak kullanılır, katmanlar arası ayrılma, fiber kırıkları, boşluk, çatlak gibi kompozit kusurlarının tespiti yapılabilmektedir [35]. Proben, test parçası ile tam teması (kuplaj) ultrasonik kontrolü yavaşlatan ve hassasiyeti üzerinde etkili olan bir faktördür. Son zamanlarda kompozitlerin ultrasonik kontrolünde daldırma (immersion) tekniği kullanılarak yapılan çalışmalarda, piezo kristal ultrasonik probun test parçasıyla temas etme gerekliliği ortadan kaldırılmaktadır [36]. Yaygın kullanılan bu tekniklerin yanında, akustik emisyon metodu ray testi ile çatlakların tespiti ve rüzgâr türbin kanatçıklarının kontrolünde kullanılmaktadır. Bir diğer test yöntemi olan Fiber Bragg Grating testi ile raylı sistem

tekerleklerinin ve havacılık parçalarının kontrolünde kendine yer bulmaktadır [35], [37], [38], [39], [40].

Kızılötesi termografi, yüzey sıcaklıklarını bir nesneden, bir nesneye doğru, bir nesneden ve/veya bir nesneye akarken ölçen veya haritalayan NDE tekniğinden biridir. Parça içerisinde yer alan süreksizliklerin, kusursuz bölgelerle arasındaki ısı geçirgenlik farklarından yararlanarak, tespit edilebilmesine olanak tanır. İç anomaliler, sıcaklık değerlerindeki değişim veya termal görüntülerde kusurları/anomalileri ‘sıcak/soğuk noktalar’ olarak göstermek için gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanarak tanımlar. Kompozit malzemelerin tahribatsız muayenesinde termografi; yukarıda bahsedilen tekniklere göre daha yüksek işlem hızı, yerinde denetleme imkanı, ısı iletim farkları ile iç kusurların tespiti, çözünürlük, hassasiyet gibi yönleriyle öne çıkmakta ve ultrasonik kontrol gibi tekniklerin yerini almaktadır [41], [42]. Bu yaklaşımda, kısa bir termal darbe, metal ve karbon-karbon malzemeleri gibi yüksek iletkenlik malzemesi için birkaç milisaniyeden, grafit-epoksi katmanlı yapılar gibi düşük iletkenlik numuneleri için birkaç saniyeye kadar sürer. Malzemenin sıcaklığı ilk termal darbeden sonra hızla değişir, çünkü termal difüzyon ile yayılır. Elde edilen termal görüntüler, görüntü işleme gibi teknikler kullanılarak işlenir.

Kompozit malzemelerin tahribatsız muayenesi, metalik malzemelere göre daha zor ve karmaşıktır. Bu durumun başlıca nedenleri; kompozitlerin metallere göre homojen olmaması, her yerinde aynı özellik göstermemesi, metalik malzemelerdeki kadar tahribatsız muayene deneyiminin bulunmaması, kompozit yapıların tamir sonrası muayenesinin zor olması, çoğu teknikte parça üzerine yollanan sinyallerin saçılması şeklinde sayılabilir [42], [43].

4. Metot

Deneysel çalışma ile termografik kontrolün etkinliği, farklı kompozit hata türlerinde incelenmiştir. Bu amaçla bir ölçüm düzeneği tasarlanarak, numuneler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir.

4.1. Araştırma yöntemi

Yapılan deneysel uygulamada termografik analiz yöntemi ile sıcaklık değerlerindeki değişim veya termal görüntülerde kusurları/anomalileri ‘sıcak/soğuk noktalar’ olarak göstermek için gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanılmıştır. Belirli hata tipleri içeren ve raylı sistemlerde sık kullanılan fiber takviyeli plastik matrisli kompozit malzemelerdeki kusurların tespit edilebilmesi için, ısı plakası kullanılarak test parçaları ısıtılmış ve sıcaklık dağılımı Optris PI 400 model termal kamera ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmada; katmanlar arası yabancı madde, katmanlar arası yüksek ısı iletkenlik farkları, boşluk ve katman kalınlık değişimleri gibi sık karşılaşılabilen kusurların termografi ile tespit edilebilirliği incelenmiştir.

4.2. Örnek kompozit malzeme seçimi ve üretim yöntemleri

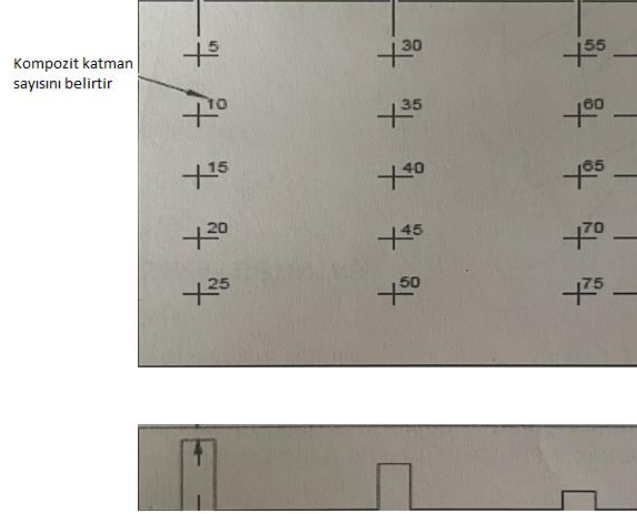
Örnek malzemelerin üretilmesi için raylı sistem iç yapılarında kullanılan hafifliğin ve yüksek mukavemet özelliğinden dolayı önceden reçine emdirilmiş karbon bezi kullanılmaktadır. Ham malzeme olarak Hexcel M70 önceden epoksi reçine emdirilmiş 3K-70-PW karbon bezi kullanılmıştır [44]. 3K-70-PW stil karbon fiber dokuma özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. 3K-70-PW dokuma özellikleri

| Stil | Dokuma | Çözgü sayısı | Atkı sayısı | Doldurma ve Çözgü İpliği | Ağırlık (g/m ²) | Kalınlık (mm) |
|------|--------|--------------|-------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|
| 3K | Plain | 11.5 | 11.5 | AS4GP 3K | 193 | 0,22 |

4.3. Test parçaları ve üretim yöntemleri

Deneylerde kullanılan numuneler, önceden reçine emdirilmiş malzemenin 0/90/-45/+45° yönlerinde ve 80 kat olarak temiz oda koşullarında el yatırması ve vakum çantası yöntemi kullanarak, otoklav fırınında kürlleme işlemi uygulanması ile üretilmiştir. Şekil 1’de gösterilen test numunesi üzerinde farklı kalınlıkların tespiti için uygun katmanlar oluşturulmuştur.

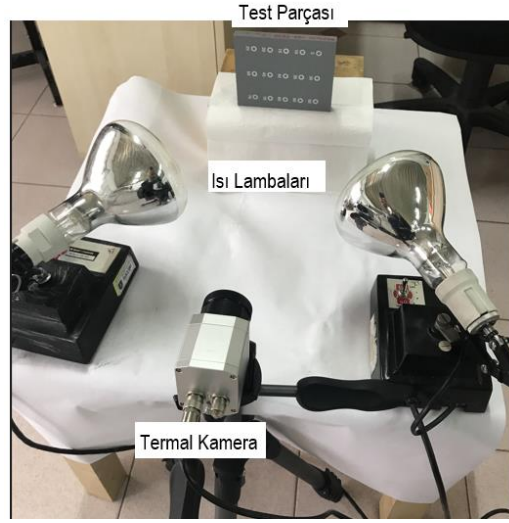


Şekil 1. Karbon epoksi 80 katmanlı test numunesi

Test parçaları için seçilen ham malzemenin şekillendirilip nihai ürüne getirilmesi için 3 farklı üretim yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem sırası ile el yatırması yapılarak parçanın şekli verilmiş, açık kalıplama yapılacağı için vakum çantası yöntemi ile fazla reçinenin alınması ve daha homojen bir yapının oluşması sağlanmış ve önceden reçine emdirilmiş ham malzemenin matris/reçinesinin kür olması için otoklav yöntemi uygulanmıştır. Numuneler, Tenny Engineering Otoklav fırınında 5 C°/dk ısıtma/soğutma hızı ile 175 C°’de 2 saat kürlendirilmiş ve oda sıcaklığına soğutulmuştur. Otoklav fırınında kür süresinde 1,37 bar basınç, 0,83 bar vakum uygulanmış, ayrıca kalıp malzeme üzerine yerleştirilen termoçift vasıtası ile kür döngüsü sıcaklığı takip edilmiştir.

4.3. Test düzeneği

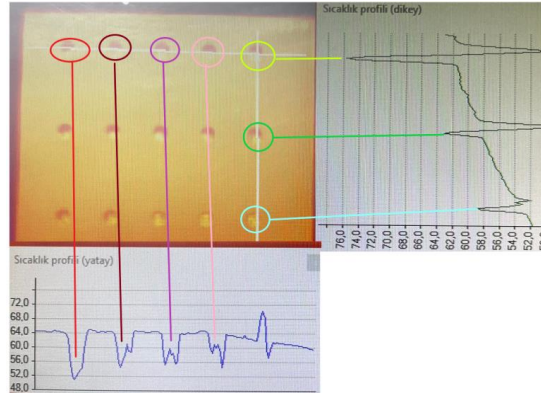
Termografik muayenenin raylı sistemler kompozit yapılarında kontrolünün yapılabilmesi için çeşitli ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer termal uyarım açısından pasif olan (ısı kaynağı olmayan) test parçaları kontrol edilecek ise, termal kameradan sıcaklık değişimlerinin gözlemlenebilmesi için, harici bir ısı kaynağı kullanılmaktadır. Dijital olarak elde edilen ve geriye dönük olarak tekrarlı bir şekilde kontrol yapılabilmesi ve verinin saklanabilmesi amacıyla termal kamera, bilgisayar ve depolama birimi kullanılmaktadır. Ayrıca, kameranın sabitlenmesi için kamera sabitleme ayağı (tripod), kablo bağlantıları gibi yardımcı ekipmanlardan yararlanılmıştır. Şekil 2’de hazırlanan test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2. Test düzeneği

5. Bulgular

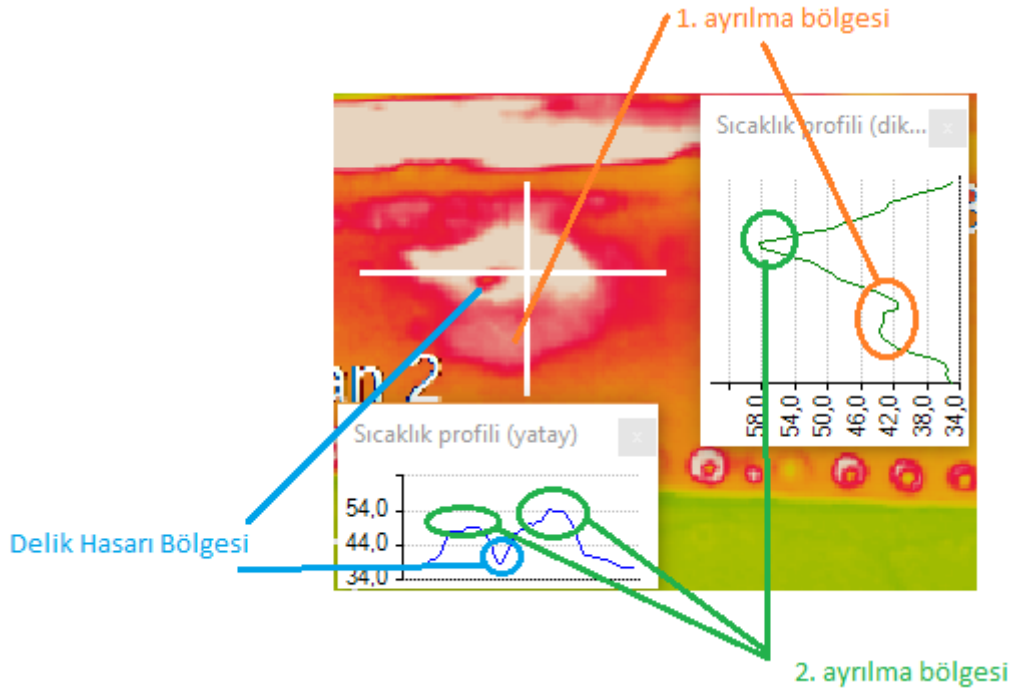
Birinci test parçasında, üretim esnasında farklı kalınlıklardaki katman sayılarının belirlenebilmesi, ayrıca en fazla kaç katmana kadar tespit yapılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla 5-10-15-20-25-30-60 kat ölçüm sonuçları incelenmiştir.



Şekil 3. Test parçası termografik sonuçları

Şekil 3'te birinci test parçasının termografik test sonucu görülmektedir. Yatay ve düşey doğrultudaki sıcaklık ölçüm profilleri(°C), resmin alt ve sağında yer alan grafiklerde görülmektedir. Termal kamera yönünde yüzey düzlemi aynı olmasına rağmen katman kalığı arttıkça ısıl kapasite düştüğünden daha soğuk bölgeler tespit edilmiştir.

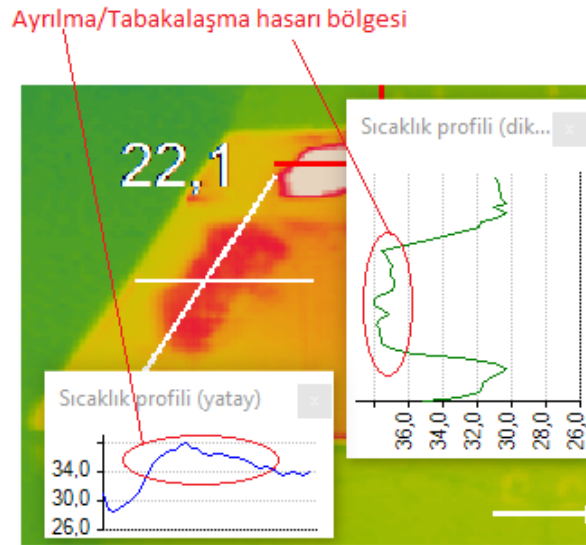
İkinci test parçasında, birinci test parçasının tersi düşünülerek termal kamera yüzeyinde farklı kalınlıkların termal görüntüsü incelenmiştir ve katmanlı kompozit levhada delik hasarı görüntüsü incelemek amaçlanmıştır.



Şekil 4. İkinci test parçası delik hasarı (Yatay ve düşey doğrultudaki sıcaklık ölçüm profilleri(°C)'dir.)

Şekil 4'te gösterildiği gibi ikinci test parçasında delik hasarı olan bölgede çevre yapılara göre daha yüksek sıcaklık tespit edilmiştir, burada aynı ısıl kapasite beklenirken düşen ağırlık/hacim oranından dolayı sıcaklık farkının artmış olduğu görülmektedir. Yatay ve düşey doğrultudaki sıcaklık ölçüm profilleri(°C)'dir.

Üçüncü test parçasında katmanlı kopmpozit yapılarında sıklıkla karşılşın bir diğer hasar tipi olan ayrılma/tabakalaşma hasarının termografik olarak görüntüsü Şekil 5'te incelenmiştir. Tabakalaşma olan bölgelerde ısıl enerjinin yoğunluğunun arttığı ve ayrılan katman ısıl iletkenliği düştüğünden bölgelerin lokal olarak daha sıcak bölgeler olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. Ayrılma/Tabakalaşma hasar tespiti örneği (Yatay ve düşey doğrultudaki sıcaklık ölçüm profilleri(°C)'dir.)

Üzerinde üç farklı tipte hata oluşturulan test numunelerinin tümünde, termografik kontrol hataları, hızlı bir şekilde konumlarıyla beraber tespit edebilmiştir. Bu durum, termografik kontrol tekniğinin büyük ilgi çekmesi ve ultrasonik C Scan gibi daha yavaş metotlara göre alternatif olarak kullanımına dair görüşleri de desteklemektedir [41], [42].

6. Sonuç

Bu çalışmada, önceden reçine emdirilmiş karbon elyafı dokumadan katmanlı olarak imal edilen raylı sistem araçları gövde iç panellerinde kullanılan kompozit deney numuneleri incelenmiştir. Kompozit malzemelerin raylı sistemlerde yüksek rijitlik, mekanik dayanım, ağırlıkta tasarruf gibi avantajlarla öne çıkmaktadır.

Raylı sistemlerde yaygın kullanılan fiber takviyeli plastik matrisli kompozit malzemelerde görülebilen farklı katman kalınlıkları, delik ve ayırma/tabakalaşma hasarı incelenmiştir. Numunelerdeki hasarları termografik değerlendirme performansının elde edildiği bir çalışma yapılmıştır.

Raylı sistemlerde kullanılan kompozit malzemelerde termografinin etkinliğinin incelenmesi amacıyla farklı katman kalınlıklarının tespit edilebilirliği ile nüfusiyet kalınlığının tespit edilmesi, delik hasarının tespit edilebilirliği ve son olarakta ayırma/tabakalaşma hasarlarının incelenmesi amacıyla test malzemeleri hazırlanmış ve termografik kontrol ile kusur tespitinin etkinliği incelenmiştir. İncelenilen bu kusur tipleri, raylı sistem kompozitlerinde sık karşılaşılabilecek kusurlardır.

Hazırlanan test düzeneğinde, termografik olarak bu hataların tümünün tespit edilebildiği gözlenmiştir. Üretilen kompozit test parçaları, raylı sistem panellerinde kullanılan malzemelerden yapıldığı için, gerçek raylı sistem parçalarında termografik kontrolün uygulanabilirliği de gösterilmiştir. Termografik kontroller ile karmaşık, sökümü zor kompozit tren parçalarının hızlı ve ekonomik tahribatsız testleri mümkün olacaktır.

Test edilen kompozit malzemelerinde, dahili hasarlar incelenmiş olup, gelecek çalışmalarda; malzeme dış yüzeylerinde bulunabilecek hasarların da termografik tekniklerle kontrol edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, raylı sistemlerde kullanılan kompozitlerde bulunabilecek farklı malzeme, parça geometrilerinin ve hata türlerinin de belirlenecek yeni test parametreleri ile termografik metotlarla tespitinde çalışmalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.

Kaynakça

- [1] J. Batchelor, "Use of fibre reinforced composites in modern railway vehicles," *Materials and Design*, vol. 2, no. 4, pp. 172–182, 1981, doi: 10.1016/0261-3069(81)90017-0
- [2] M. Robinson, E. Matsika, and Q. Peng, "Application of composites in rail vehicles," in *ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2017, doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.03965-5
- [3] T. Li and L. Wang, "Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials," *Composite Structures*, vol. 175, pp. 46–57, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.05.001
- [4] H. Y. Sarvestani, A. H. Akbarzadeh, H. Niknam, and K. Hermenean, "3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance," *Composite Structures*, vol. 200, pp. 886–909, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.04.002
- [5] A. Zinno, E. Fusco, A. Prota, and G. Manfredi, "Multiscale approach for the design of composite sandwich structures for train application," *Composite Structures*, vol. 92, no. 9, pp. 2208–2219, Aug. 2010, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2009.08.044
- [6] M. Kim, J. Choe, and D. G. Lee, "Development of the fire-retardant sandwich structure using an aramid/glass hybrid composite and a phenolic foam-filled honeycomb," *Composite Structures*, vol. 158, pp. 227–234, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.09.029

- [7] A. Hörold, B. Schartel, V. Trappe, M. Korzen, and J. Bünker, "Fire stability of glass-fibre sandwich panels: The influence of core materials and flame retardants," *Composite Structures*, vol. 160, pp. 1310–1318, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.11.027
- [8] C. Zhu *et al.*, "Fire performance of sandwich composites with intumescent mat protection: Evolving thermal insulation, post-fire performance and rail industry testing," *Fire Safety Journal*, vol. 116, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103205
- [9] M. Rakotomalala, S. Wagner, and M. Döring, "Recent Developments in Halogen Free Flame Retardants for Epoxy Resins for Electrical and Electronic Applications," *Materials 2010, Vol. 3, Pages 4300-4327*, vol. 3, Aug. 2010, doi: 10.3390/MA3084300
- [10] F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J. M. Lopez-Cuesta, and P. Dubois, "New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 63, no. 3, pp. 100–125, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.MSER.2008.09.002
- [11] M. Bar, R. Alagirusamy, and A. Das, "Flame retardant polymer composites," *Fibers and Polymers* 2015 16:4, vol. 16, no. 4, pp. 705–717, Jun. 2015, doi: 10.1007/S12221-015-0705-6
- [12] P. J. Mistry, M. S. Johnson, and U. I. K. Galappaththi, "Selection and ranking of rail vehicle components for optimal lightweighting using composite materials:," <https://doi.org/10.1177/0954409720925685>, vol. 235, no. 3, pp. 390–402, Jun. 2020, doi: 10.1177/0954409720925685
- [13] A. Poudel, K. R. Mitchell, T. P. Chu, S. Neidigk, and C. Jacques, "Non-destructive evaluation of composite repairs by using infrared thermography", *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 3, pp. 351–363, Mar. 2015, doi: 10.1177/0021998315574755
- [14] B. Ehrhart, B. Valeske, and C. Bockenheimer, *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, Woodhead Publishing, 2013
- [15] T. Ullmann, R. Aoki, and T. Schmidt, "Lock-in Thermography for Process Integrated Non-destructive Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Aircraft Structures," in *10th International conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 2010, pp. 781-788
- [16] N. P. Avdelidis, B. C. Hawtin, and D. P. Almond, "Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites," *NDT and E International*, vol. 36, no. 6, pp. 433–439, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0963-8695(03)00052-5
- [17] Quality Magazine, "Active Thermography for Nondestructive Composites Testing", July, 2013, [Online]. Available: <https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing>, [Accessed: Apr. 26, 2022]
- [18] F. Çeçen , B. Aktaş , H. Öztürk , İ. Ş. Öztürk and M. B. Navdar , "Karbon-Fiber Plaka Donatılı Traverslerin, B70-Tipi Öngerilmeli Beton Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 97-110, Jan. 2022, doi:10.47072/demiryolu.1028740
- [19] A. Singh, Z. Gu, X. Hou, Y. Liu, and D. J. Hughes, "Design optimisation of braided composite beams for lightweight rail structures using machine learning methods," *Composite Structures*, vol. 282, p. 115107, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.115107
- [20] P. J. Mistry, M. S. Johnson, S. Li, S. Bruni, and A. Bernasconi, "Parametric sizing study for the design of a lightweight composite railway axle," *Composite Structures*, vol. 267, p. 113851, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113851
- [21] J. J. Carruthers, M. Calomfirescu, P. Ghys, and J. Prockat, "The application of a systematic approach to material selection for the lightweighting of metro vehicles," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 223, no. 5, pp. 427–437, Sep. 2009, doi: 10.1243/09544097JRRT279
- [22] CER - The Community of European Railways, "Moving towards sustainable mobility summary a strategy for 2030 and beyond for the european railway sector", [Online]. Available: https://www.cer.be/sites/default/files/publication/CER-UIC_Sustainable_Mobility_Strategy_SUMMARY.pdf, [Accessed: Apr. 14, 2022].
- [23] V. Giannella, R. Sepe, A. Borrelli, G. de Michele, and E. Armentani, "Numerical investigation on the fracture failure of a railway axle," *Engineering Failure Analysis*, vol. 129, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ENGFANAL.2021.105680
- [24] M. Shahverdi, T. Good, G. Hannema, and R. Paradies, "Towards Noise and Weight Reduction by Application of FRP wheelsets for Freight Cars," *19th International Wheelset Congress*, Italy, 2019
- [25] "Metal composite doors for UK rail," *Reinforced Plastics*, vol. 64, no. 1, pp. 8-8, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.REPL.2019.12.021

- [26] J. Zhang, X. biao Xiao, X. zhen Sheng, R. Fu, D. Yao, and X. song Jin, "Characteristics of interior noise of a Chinese high-speed train under a variety of conditions," *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 18, no. 8, pp. 617–630, Aug. 2017, doi: 10.1631/JZUS.A1600695
- [27] C. Mellet, F. Létourneaux, F. Poisson, and C. Talotte, "High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 293, no. 3–5, pp. 535–546, Jun. 2006, doi: 10.1016/J.JSV.2005.08.069
- [28] H. M. Noh, "Contribution analysis of interior noise and floor vibration in high-speed trains by operational transfer path analysis," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 8, pp. 1–14, Aug. 2017, doi: 10.1177/1687814017714986
- [29] J. Zhang, D. Yao, R. Wang, and X. Xiao, "Vibro-acoustic modelling of high-speed train composite floor and contribution analysis of its constituent materials," *Composite Structures*, vol. 256, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113049
- [30] J. S. Kim, "Fatigue assessment of tilting bogie frame for Korean tilting train: Analysis and static tests," *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 8, pp. 1326–1337, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.10.007
- [31] J. S. Kim and H. J. Yoon, "Structural behaviors of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains under critical load conditions," in *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 2375–2380, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.391
- [32] J. S. Kim, S. J. Lee, and K. B. Shin, "Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody," *Composite Structures*, vol. 78, no. 4, pp. 468–476, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.11.006
- [33] Wikipedia, "Eschede_derailment", [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Eschede_derailment, [Accessed, June, 26, 2022]
- [34] S. Fotouhi, F. Pashmforoush, M. Bodaghi, M. Fotouhi, "Autonomous damage recognition in visual inspection of laminated composite structures using deep learning", *Composite Structures*, vol. 268, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113960
- [35] C. J. Hellier, *Handbook of nondestructive evaluation*, New York, USA, McGraw Hill, 2020
- [36] A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, S. Marzano, M. D. Piccioni, "Mechanical characterization of CFRP composites by ultrasonic immersion tests: Experimental and numerical approaches", *Composites Part B: Engineering*, vol. 66, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.04.024
- [37] D. Xu, P.F. Liu, Z.P. Chen, "Damage mode identification and singular signal detection of composite wind turbine blade using acoustic emission", *Composite Structures*, vol. 255, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112954
- [38] Q. Hao, Y. Shen, Y. Wang, J. Liu, "An adaptive extraction method for rail crack acoustic emission signal under strong wheel-rail rolling noise of high-speed railway", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 154, 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107546
- [39] S. Mishra, P. Sharan, K. Saara, "Real time implementation of fiber Bragg grating sensor in monitoring flat wheel detection for railways", *Engineering Failure Analysis*, vol. 138, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106376
- [40] D. D. Kumar, S. S. Raj, V. Sivananth, V. Ramkumar, "Damage detection in Aerospace structures using Chirped fiber Bragg grating", *Materials Today: Proceedings*, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.149
- [41] R. Yang, Y. He, "Optically and non-optically excited thermography for composites: A review", *Infrared Physics & Technology*, vol. 75, p. 26-50, 2016, doi: 10.1016/j.infrared.2015.12.026
- [42] Composites UK, "How can composites be monitored?", [Online]. Available: <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/properties/inspection>, [Accessed: 25. June-2022].
- [43] A. Ghobadi, "Common Type of Damages in Composites and Their Inspections". *World Journal of Mechanics*, 7, 24-33, 2017, doi: 10.4236/wjm.2017.72003
- [44] Hexcel, "Hex Force Reinforcements" [Online]. Available: https://lindberg-lund.no/wp-content/uploads/2018/06/Hexcel_Handbok_fiberprodukter.pdf, [Accessed, September 19, 2022]
- [45] A. Shimamura, Y. Hotta, H. Hyuga, M. Hotta, K. Hirao, "Improving the thermal conductivity of epoxy composites using a combustion-synthesized aggregated β -Si₃N₄ filler with randomly oriented grains", *Scientific Reports*, Vol. 10, 14296, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71745-w>
- [46] X. Pan, M. G. Debije, J. Schenning, W. Cees, M. Bastiaansen, "Enhanced Thermal Conductivity in Oriented Polyvinyl Alcohol/Graphene Oxide Composites", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 13, 28864, 2021, doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06415>

Özgeçmiş**Seyid Fehmi DİLTEMİZ**

1973 yılında Malatya’da doğmuştur. 1994 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 1999-2020 yılları arasında Hava İkmal Bakım Merkez Komutanlığında Malzeme Laboratuvarında çalışmıştır. 2011 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümünde doktora çalışmasını, 2020 yılında Amerika Birleşik Devletleri Calstate Üniversitesinde doktora sonrası araştırmasını tamamlamıştır. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Görevlisi olarak çalışmalarını yürütmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

E-posta: fdiltemiz@ogu.edu.tr

**Ersin EROĞU**

1985 yılında Eskişehir’de doğmuştur. 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2007-2012 yıllarında Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.’de Tasarım Mühendisi olarak çalışmıştır. 2012 yılından beridir 1. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğünde Kompozit Malzeme Sistem Mühendisi olarak çalışmaktadır. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Havacılık Bilimi ve Teknolojisi A.B.D. doktora çalışmasına devam etmektedir.

E-posta: ersineroglu@hotmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Yük Vagonu Tamire Tutma Verilerinin Analizi

Ömür AKBAYIR^{ID}, Elif DESTİCİOĞLU^{ID}, Mehmet FİDAN^{ID}

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

*elifsenturk@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 24.11.2022, Kabul/Accepted: 24.01.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Emniyetli ve ekonomik yük treni işletmeciliği için yük vagonlarının bakımı önemlidir. Bu çalışmada 2019 ve 2022 yılları arasında bakım verilerinin bulunduğu listeden farklı açılardan analizler yapılmıştır. Bu analizlerdeki amaç demiryollarında sahip olunan kısıtlı iş gücü nedeniyle verimli bir bakım planı için önceliklerin belirlenmesidir. Verilerin istatistiksel analizi ile en çok görülen arıza tipleri belirlenmiş, bu arıza tiplerinin hangi vagonlarda görüldüğü paylaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu araçları, Bakım planlaması, İstatistiksel analiz

Analysis of Irregularities Data on Freight Wagons

Abstract: Maintenance of freight wagons is important for safe and economical freight train operation. In this study, analyzes were made from different perspectives from the list of maintenance data between 2019 and 2022. The purpose of these analyzes is to determine the priorities for an efficient maintenance plan due to the limited workforce in the railways. With the statistical analysis of the data, the most common types of malfunctions were determined, and it was shared in which wagons these malfunction types were seen.

Keywords: Railway vehicle, Maintenance planning, Statistical analysis

1. Giriş

Müşteri taleplerinin hızla değişmesi ile firmalar rekabet güçlerini arttırmak için çalışmalar yapmaktadırlar. Piyasadaki rekabetçi ortamda kar elde edebilmek maliyet yönetimi üzerine çalışmalar yapmakla gerçekleştirilebilir. Bu maliyet çalışmalarından biri de bakım maliyetleridir. İşletmelerde ekipman ve araçları en verimli şekilde kullanabilmek planlı çalışma koşullarına bağlıdır [1]. Araçların durma sürelerini en aza indirmek, belirli periyotlarda eskime, yıpranma kontrolü, arıza nedenlerini ortadan kaldırmak ve bu şekilde araçların ömrünü uzatmak planlı bakım çalışmaları ile mümkündür.

Literatürde bakımların yönetilmesi ve bakım maliyetinin düşürülmesi için çalışmalar mevcuttur. Kütahya ve Eskişehir de yapılan bir çalışmada, bakım yönetiminin ürün maliyeti üzerine etkisi incelenmiştir [2]. Bakım yönetim süreci incelenerek maliyetlere olumlu yönde etkiyecek faktörler incelenmiştir. Burada öncelikli olarak yedek parça yönetimi ve doğru bakım uygulamaları üzerinde yapılabilecek iyileştirmeler çalışılmıştır.

Demiryolu hattının mevcut bakım planındaki sorunların incelendiği ve analizinin yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Yol bakımındaki planlama süreçlerini etkileyen ana faktörler dikkate alınarak veriler analiz edilmiştir. Birleştirilmiş altyapı sistem verilerine göre üst yapının mevcut bakım planlamasının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Planlanan bakım çalışmalarının her zaman gerçekleşene karşılık gelmediği anlaşılmıştır. Teknolojik altyapı, atölyelere gidiş dönüş zamanları, planlanan ve gerçekleşen işçilik maliyetleri arasında %26 lık bir fark olduğu analizler sonucu tespit edilmiştir. Bu farkı azaltmak adına bazı uygulamalar yapılmalıdır. Bir işin fonksiyonel olarak gerçekleştirilmesi için iş gücü maliyetleri, ek zaman katsayıları, araç

Atıf için/Cite as: Ö. Akbayır, E. Desticioğlu, M. Fidan, "Yük vagonu tamire tutma verilerinin analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 199-210, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1209503

yoğunluğu, atölyelerin iş yapabilme yetenekleri gibi ek faktörler de göz önünde bulundurularak bakım planlamaları yapılmalıdır [3].

Demiryolu ağlarının altyapısını iyi durumda tutmak için düzenli bakım gereklidir. Bu da bakım faaliyetlerini gerçekleştiren ekiplere güvenli çalışma alanları sağlayan bakım planı ile mümkündür. Park halindeki yolcu trenleri ve planlı yük trenleri için problemleri ve hat çalışanları için iş yükünü dikkate alarak hem tren operatörleri hem de bakım çalışanları için bakım planları tasarlanmıştır. Burada karma tam sayılı programlama modeli kullanılmıştır. Bakım planı hazırlanırken tren operatörleri engelleri, bakım firmalarının pratik sınırlamaları, düz hatlar, havai kablolama gibi kriterler dahil edilmiştir. Önerilen bakım programı modelinin bakım faaliyetlerini çoğunlukla geceye aktardığı ve hem bakım firmalarının iş yükünü hem de tren operatörlerinin toplam engelinin önemli ölçüde azalttığı görülmüştür [4].

Demiryollarında bakım aktiviteleri üzerine yapılan farklı bir çalışma da etkin ve verimli bir bakım planı oluşturulması üzerinedir. Bakım maliyetlerine, işletme politikaları, bütçe kısıtları, müşteri beklentileri ve kısa ve orta vadeli taşıma planları etki etmektedir. Etkin bir bakım planı oluşturmak için yük vagonlarının kritiklik seviyeleri AHP-COPRAS kombinasyonu ile belirlenerek, yıllık bakım planı oluşturulmuştur. Bu çalışma sayesinde taşıma faaliyetlerini minimum düzeyde etkileyecek bir bakım planı oluşturulmuştur [5].

Demiryolu araçlarında RAMS verilerini kullanarak bakım ve arıza maliyetlerinde iyileştirmeler yapılmıştır. RAMS kelimesinin açılımı baş harflerden gelmektedir. Bunlar güvenilirlik (R), kullanılabilirlik (A), sürdürülebilirlik (M) ve emniyet (S) kelimelerinden gelmektedir. Raylı sistem araçlarında gerçekleşen arızaların verileri alınarak RAMS yöntemleriyle incelenmiştir. Bu analizler detaylı incelenerek arızaların kök nedenlerine bakılmış, bakım maliyetlerini azaltmak amacıyla verilerin nasıl kullanılacağı açıklanmıştır [6].

Paris-Est Üniversitesi'nde 2015'te yapılan bir çalışmada az görülen arıza olaylarının tahmini için tren verilerinde zamansal seri dataları değerlendirilip, kullanılmıştır. Trenler, konumsal ve zamansal koordinatlarıyla gerçek zamanlı veri akışı sağlayan akıllı sensörlerle donatılmıştır. Etkili bir kestirimci bakım süreci için nadir eğim ve çekiş arızalarını tahmin etmeye yarayacak kuralları belirleme ve çeşitli metodolojileri araştırma ve geliştirme amaçlanmıştır. Zamansal seri datalarının veri madenciliği ile değerlendirilmesi üzerine çalışılmıştır [7].

Bakım planlaması ve maliyetleri üzerine yapılan çalışmaların yanında demiryolları vagonları için bakım yerleri seçimi üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Demiryollarının kullanımının artmasıyla bakım atölyelerindeki kapasite ve mevcut vagonları depolama alanlarında da problemler yaşanmaya başlanmıştır. Gece saatlerinde bakım yerlerinde oluşan kapasite problemlerinin azaltılması için bakımların gündüz yapılması düşünülmüş ancak personel ve bakım atölyesi seçimi zor olmuştur. Burada bakım yeri seçimi için karma tam sayılı programlama modeli ile çalışma yapılmıştır. Bu modelle birlikte Hollanda Demiryollarında araç sirkülasyonu için gündüz saatlerinde bakım faaliyetlerinin önemli bir bölümünün gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. Analiz de çalışma süresi bakım planlaması için önemli bir girdi oluşturmaktadır. Analizler sonucunda konum seçimi farklı uzunluklardaki bakım planlama hatları ve farklı girdi setleri için tutarlı olduğu görülmüştür. Günlük yapılan bakımlar göz önünde bulundurularak en yüksek iş yüküne sahip bakım atölyesi belirlenmiştir. Tüm vagon birimleri dahil en büyük senaryo için 20 bakım yeri açılırsa, faaliyetlerin en az %30,1'lik ortalama gündüz payı elde edilebileceği hesaplanmıştır. Burada yapılan çalışmada bazı sınırlamalar tanımlanabilir. Analiz planlanan bakım verileri üzerinden yapılmıştır. Burada olası kesintiler hesaba katılmaz. Kesintiler nedeniyle demiryolu araçlarının değişimi bakım sırasında sıklıkla değişir ve sonuç olarak sağlanan optimum bakım programı ve optimum bakım yeri seçimi her zaman en doğru olan olmayabilir. Süreler ve bakım aralıkları pratikte farklılıklar gösterebilir. Kesintiler, vagon tipleri gibi yeni kriterlerde eklenerek formülasyon geliştirilebilir [8].

Teknoloji çağının en büyük olgusu, büyük verilerin analiz edilmesi ve bu verilerin hedefler doğrultusunda kullanılmasıdır [9]. Çevremizde bilgisayarın olduğu her ortamda anlık veriler oluşmaktadır. Sürekli iyileştirme için verilerin toplanması ve düzenlenmesi için yapılan çözümler veri analizi olarak adlandırılır. Veriler analiz edilerek anlam kazanmakta ve ilgili konu hakkında problem çözme ve karar vermek için kullanılabilir duruma gelmektedir. İstatistik ile veriler bilgiye çevrilip kullanılabilir hale getirilmektedir.

Literatür incelendiğinde bakımla ilgili demiryolu sektörüne ilişkin çalışmaların demiryolu üstyapısı ve altyapısı ile ilgili olduğu görülmektedir. Demiryolu araçları üzerine özellikle yük vagonları odağında yapılmış çalışma çok azdır. Bu çalışmada Türkiye’de ilk defa yük vagonlarına ilişkin tamire tutma verileri incelenmiştir. Bakım giderlerini büyük ölçüde azaltacak sonuçlara ulaşılmıştır.

2. Metot

Vagonların Tek Tip Kullanım Sözleşmesi (GCU) EK 9’da tamire tutma nedenleri listelenmiştir [10]. Söz konusu dokümanda tamire tutma nedenleri komponent bazında 8 grup altına toplanmıştır. Bunlar: 1. Yürüyüş aksamı, 2. Süspansiyon, 3. Fren, 4. Vagon şasesi ve boji şasesi, 5. Tampon ve çekme tertibatı, 6. Vagon gövdesi, 7. Yükler ve konteynerler, 8. Özel hususlar. Toplamda yaklaşık 1000 adet tamire tutma nedeni bulunmaktadır.

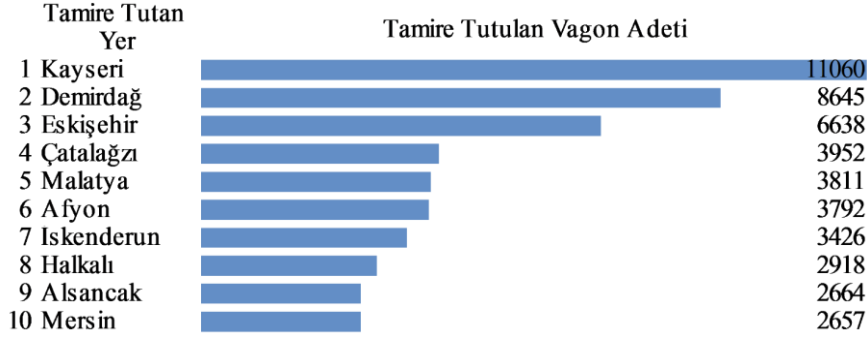
TCDD Taşımacılık AŞ Vagon Teknisyenleri tarafından vagonları tamire tutmak için GCU Ek 9’da bulunan kodlar kullanılmaktadır. GCU Ek 9’da yaklaşık 1000 adet tamire tutma nedeni bulunmaktadır. Söz konusu kodlar Kurumsal Kaynak Yönetimi (KKY) Araç Bakım Yönetim Sistemi (ABYS) modülüne girilmektedir.

Bakım maliyetlerini düşürmek için öncelikle yapılması gereken mevcut bakım verilerini incelemektir. Bakım verilerini incelerken; “Tamire Tutma Tarihi”, “Tamire Tutulan Vagon Numarası”, “Tamire Tutan Yer” ve “Tamire Tutma Nedeni” bilgilerini iyi analiz etmek gerekir. Bu çalışma da istatistiksel analiz yapılırken, 2019, 2020, 2021 ve 2022 yıllarındaki 74357 adetlik tamire tutma kaydı kullanılmıştır. Veri, pivot tablolar vasıtasıyla anlamlı bir şekilde çözümlenmeye, özetlenmeye ve raporlanmaya çalışılmıştır.

Veriler incelenirken yapılan varsayım ve kabuller şunlardır: Tüm işyerlerinin verileri eksiksiz ve doğru girdiği varsayılmıştır. Tamirlik arızaların değerlendirmesi, sadece vagon tiplerine göre yapılmış olup; hız, taşınan yük miktarı, yol şartları, dinamik etkiler gibi kök sebepler ve bunlara yönelik iyileştirme çabaları dikkate alınmamıştır. Vagonların çalıştığı güzergahların eğim değerleri, o hatta kullanılan lokomotiflerde dinamik frenin bulunup bulunmaması, çalışma koşulları, bakım talimatlarına uyulmaması, yoğun kullanım, vagonun yaşı, dizilerde yeni vagonların eskilerle birlikte çalışması gibi hususlar dikkate alınmamıştır. Çalışmada TCDD Taşımacılık AŞ ‘nin verileri işlenmiş olup, TÜRASAS Bölge Müdürlüklerinden herhangi bir veri kullanılmamıştır.

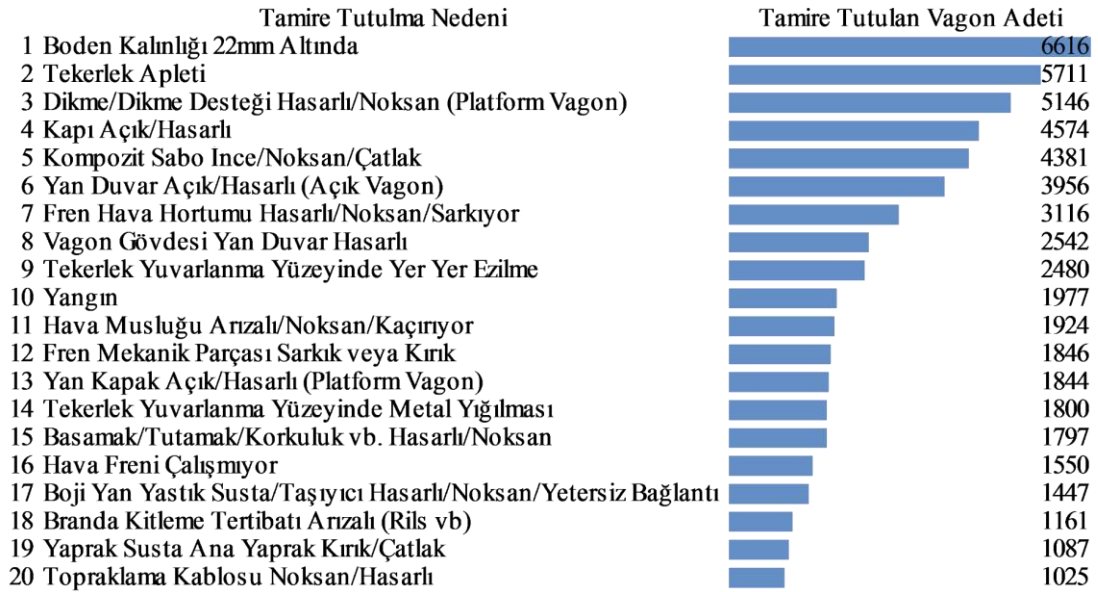
3. Bulgular

Yük vagonları kullanımları sırasında demiryolu şebekesindeki çeşitli noktalardan geçerken Vagon Teknisyenleri tarafından göz ile muayene edilmekte, gerekirse ölçülmekte ve tamire tutulmaktadır. 2019-2022 yıllarında 150 ve üstü vagon tamire tutan 36 işyeri bulunmaktadır. En çok vagon tamire tutan ilk 10 yer Şekil 1.’de verilmiştir. 2019-2022 yıllarında Kayseri, Demirdağ ve Eskişehir sırasıyla 11060, 8645, 6638 adet vagonu çeşitli nedenlerden dolayı tamire tutmuştur.

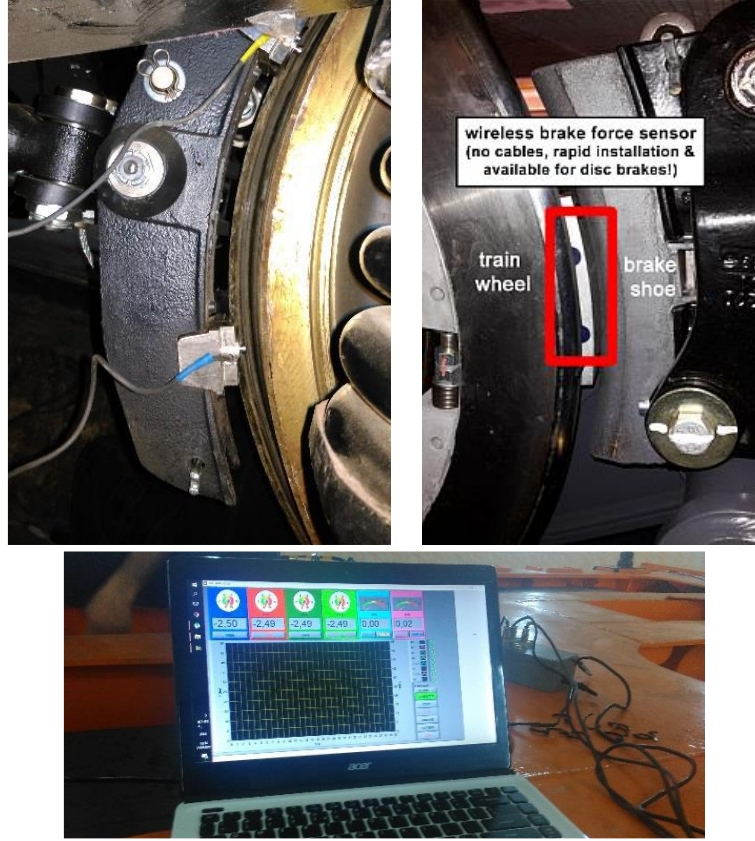


Şekil 1. Tamire tuttukları vagon adetlerine göre en çok vagon tamire tutan 10 yer

Tamire tutulan vagon âdetine göre tamire tutulma nedenleri Şekil 2.'de verilmiştir. GCU Ek 9'da yaklaşık 1000 adet tamire tutma nedeni bulunmaktadır. Şekil 2.'de ilk 20 tanesi verilmiş olması olup, Türkiye'de bunlardan yaklaşık 100 tanesi kullanılmıştır. Şekil 2.'de görüleceği üzere 2019-2022 yıllarında "Boden Kalınlığı 22mm Altında" gerekçesi ile 6616 adet vagon tamire tutulmuştur. "Tekerlek Apleti" gerekçesi ile tamire tutulan vagon sayısı 5711 adettir. Söz konusu iki nedenden dolayı tamire tutulan vagonların tekerlekleri torna edildikten sonra servise verilebilmektedir. En çok Çatalağzı, Kayseri ve Afyon'da "Boden Kalınlığı 22mm Altında" ve "Tekerlek Apleti" gerekçeleri ile vagon tamire tutulmuştur. Buradan genel olarak Çatalağzı, Kayseri ve Afyon'da tekerlekleri torna yapmaya yönelik imkânların geliştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılabılır. "Tekerlek Apleti" gerekçesiyle açık ara en çok Çatalağzı'ndan vagon tamire tutulmuştur. Çatalağzı'nda ilk olarak sabolara gelen fren kuvvetinin ölçüldüğü test cihazının kullanılması önem arz etmektedir. Fren yüzdesi ve hesapları hatalı vagonları Şekil 3.'de görülen ölçüm cihazıyla tespiti mümkün olacaktır. Çatalağzı'nda ikinci olarak UIC 543-1 Ek B'de bulunan "Kontrol Listesi" ne göre bilgisayarlı fren test cihazı ile kontrol imkânı geliştirilmelidir. Apletinin işletmecilik hatası mı vagonda bulunan teknik bir kusurdan mı kaynaklandığı belirlenmelidir.



Şekil 2. Tamire tutulan vagon adetlerine göre en çok tamire tutulma nedenleri



Şekil 3. Sabo basma kuvveti ölçme testi [11-12]

TCDD Taşımacılık AŞ'nin yük vagonu parkında 16475 adet yaklaşık 50 tipte ticari yük vagonu bulunmaktadır. Şekil 4. a'da TCDD Taşımacılık AŞ'nin yük vagonu parkında bulunan vagonların tip bazında adeti verilmiştir. Şekil 4. a'da görüleceği üzere bunlardan 2188 adeti Fals (665 0 331/2708) tipinde yük vagonudur. Şekil 4. b'de ise tip bazında tamire tutulan vagon adeti bulunmaktadır. TCDD Taşımacılık AŞ parkında en çok bulunan Fals (665 0 331/2708) tipi, aynı zamanda açık ara en çok tamire tutulan yük vagonu tiptir.

Tip bazında tamire tutulan vagon adeti tip adetine bölündüğünde, Fals (665 0 331/2708), Fas (637 7 001/330) ve Falns (644/664 1 001/531) tiplerinin sırasıyla 9,1, 7,7 ve 6,6 değerlerine sahip olduğu hesaplanmıştır. İkinci sıraya yerleşen Fas (637 7 001/330) tipi, Şekil 4. b) 'de ilk 10 sıralamasında bulunmamaktadır. Buradan Fas (637 7 001/330) tipinde vagon sayısı az olmasına rağmen, tamire çok tutulduğu anlaşılmaktadır. Fas (637 7 001/330) tipinin ya çok kullanıldığı ya da ekonomik ömrünü tamamladığı düşünülebilir.

| Vagon Tipi | Adet | Vagon Tipi | Tamire Tutulan Vagon Adeti |
|----------------------------------|------|------------------------------|----------------------------|
| 1 Fals (665 0 331/2708) | 2188 | 1 Fals (665 0 331/2708) | 19973 |
| 2 Ks (330 1 001/2650) | 1206 | 2 Ks (330 1 001/2650) | 6370 |
| 3 Hbbillnss (246 1 001/999) | 975 | 3 Sgss (456 8 923/9772) | 4470 |
| 4 Eanoss (TSI) (537 9 192/80066) | 871 | 4 Falns (644/664 1 001/531) | 3364 |
| 5 Sgss (456 8 923/9772) | 828 | 5 Es (552 0 002/1902) | 3167 |
| 6 Es (552 0 002/1902) | 785 | 6 Rilnss (354 6 001/476) | 3038 |
| 7 Ks (330 2 652/3252) | 582 | 7 Hbbillnss (246 1 001/999) | 2920 |
| 8 Els (513 3 005/650) | 546 | 8 Ks (330 2 652/3252) | 2778 |
| 9 Falns (644/664 1 001/531) | 512 | 9 Rgns (TSI) (381 6 001/500) | 2684 |
| 10 Ss (470 0 001/501) | 490 | 10 Falns (664 1 532/891) | 1939 |

a)

b)

Şekil 4. a) Tip Bazında vagon adeti b) Tip bazında tamire tutulan vagon adeti

Şekil 5. a’da Fals (665 0 331/2708) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Fals (665 0 331/2708) tipi en çok “Boden Kalınlığı 22mm Altında” olduğu gerekçesiyle tamire tutulduğundan yoğun kullanıldığı anlaşılmaktadır. Fals (665 0 331/2708) tipinde; “Yan Duvar Açık/Hasarlı (Açık Vagon)”, “Kapı Açık/Hasarlı, Vagon Gövdesi Yan Duvar Hasarlı” gerekçeleriyle sırayla 2340, 1805, 1249 adet vagon tamire tutulmuştur. Söz konusu tamire tutma nedenleri genel olarak vagonun gövdesi/sandığı ile ilgili fiziksel hasarlardır. Buradan iki sonuca ulaşılabilir: Fals (665 0 331/2708) tipi vagonlara yükleme boşaltma sırasında gövdesine/sandık kısmına çok sık zarar verilmektedir. Fals (665 0 331/2708) tipi vagonların gövdesi/sandık kısmı yapısal olarak zayıf ve cidar açıklıkları fazladır. Bundan sonra üretilecek bu tip vagonlarda daha kalın profil veya Hardox gibi daha mukavemetli yapı çeliği kullanılmasını veya cidar açıklıklarının azaltılmasını tavsiye etmekteyiz. 1259 adet ile diğer dikkat çeken tamire tutma nedeni “Fren Hava Hortumu Hasarlı/Noksan/Sarkıyor” gerekçesidir. Buradan kullanılmayan hava hortumlarının yerine asılmadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 5. b’de Ks (330 1 001/2650) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Ks (330 1 001/2650) tipi en çok tamire tutulan tip sıralamasında ikinci olmuştur. Ks (330 1 001/2650) tipinde; “Dikme/Dikme Desteği Hasarlı/Noksan (Platform Vagon)” ve “Yan Kapak Açık/Hasarlı (Platform Vagon)” gerekçeleriyle sırasıyla 2352 ve 1073 adet vagon diğer nedenlere göre açık ara fazla tamire tutulmuştur. Söz konusu tamire tutma nedenleri genel olarak vagonun dikme ve yan kapakları ile ilgili fiziksel hasar veya noksanlıklardır. Buradan Ks (330 1 001/2650) tipi yük vagonlarının kullanımı sırasında dikme ve yan kapaklarına zarar verildiği sonucuna ulaştık.

Şekil 5. c’de Sgss (456 8 923/9772) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Sgss (456 8 923/9772) tipinde; “Tekerlek Apleti” ve “Tekerlek Yuvarlanma Yüzeyinde Yer Yer Ezilme” gerekçeleriyle tamire tutulan vagon miktarı diğer nedenlere göre fazladır. Buradan Sgss (456 8 923/9772) tipi yük vagonlarında epidemik fren arızası olabileceği sonucuna ulaştık.

Şekil 5. ç’de Falns (644/664 1 001/531) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Falns (644/664 1 001/531) tipinde; “Tekerlek Apleti” gerekçesiyle 1069 adet vagon diğer nedenlere göre açık ara fazla tamire tutulmuştur. Buradan Falns (644/664 1 001/531) tipi yük vagonlarında epidemik fren arızası olduğu sonucuna ulaştık. Kaynak [13] deneysel olarak epidemik fren arızasını doğrulamaktadır. Kaynak [13], 664 1 223-3 nolu vagon için Şekil 3.’ de görülen ölçüm cihazı ile yapılan kontrolde sabo baskı kuvvetinin normalin iki katı olduğunu göstermektedir. Verilerin incelendiği dört yıllık zaman aralığında; 31756641175, 81756641839, 31756641168, 31756641197, 31756641245, 81756642103, 31756641250, 31756641155 numaralı vagonlar “Tekerlek Apleti” gerekçesiyle sırasıyla 27, 17, 17, 17, 15, 14, 14, 14 kez tamire tutulmuştur. Söz konusu tipteki vagonların fren yüzdelerinin hatalı olduğu açıktır ve sabolara gelen kuvvetin ölçülmesi suretiyle fren yüzdelerine bakılması gerekmektedir.

Şekil 5. d’de Es (552 0 002/1902) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Es (552 0 002/1902) tipindeki yük vagonları malzeme yorulmasına dayanan “Fren Mekanik Parçası Sarkık veya Kırık”, “Yaprak Susta Ana Yaprak Kırık/Çatlak”, “Dingil Kutusu Hasarlı/Yağ Sızdırıyor” ve “Perno/Menot Kırık/Noksan/Çıkmış” gibi gerekçelerle tamire tutulmuştur. Buradan Es (552 0 002/1902) tipi yük vagonlarının ekonomik ömrünü tamamladığı ve artık ıskat edilmesi gerektiği sonucuna ulaştık.

Şekil 5. e’de Rilnss (354 6 001/476) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Rilnss (354 6 001/476) tipinde; “Branda Kitleme Tertibatı Arızalı (Rils vb)” gerekçesiyle 650 adet vagon diğer nedenlere göre açık ara fazla tamire tutulmuştur. Buradan

Rilnss (354 6 001/476) tipi yük vagonlarının kullanımı sırasında branda kitleme tertibatına zarar verildiği sonucuna ulaştık.

Şekil 5. f'de Hbbillnss (246 1 001/999) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Hbbillnss (246 1 001/999) tipinde; “Kapı Açık/Hasarlı” ve “Açılabilir Çatı Açık/Kızaktan Çıkmış/Kitleme Tertibatı Hasarlı (Kapalı Vagon)” gerekçeleriyle sırasıyla 603 ve 202 adet vagon tamire tutulmuştur. Buradan Hbbillnss (246 1 001/999) tipi yük vagonlarında epidemik kapı açma/kapama tertibatı arızası olabileceği veya kullanım kaynaklı olduğu sonucuna ulaştık.

Şekil 5. g'de Ks (330 2 652/3252) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Ks (330 2 652/3252) tipinde; “Dikme/Dikme Desteği Hasarlı/Noksan (Platform Vagon)”, “Yan Kapak Açık/Hasarlı (Platform Vagon)”, “Yan Duvar Açık/Hasarlı (Açık Vagon)” ve “Menteşe/Perno/Civata Hasarlı (Platform Vagon)” gerekçeleriyle sırasıyla 922, 459, 133 ve 97 adet vagon tamire tutulmuştur. Söz konusu tamire tutma nedenleri genel olarak vagonun dikme ve yan kapakları ile ilgili fiziksel hasar veya noksanlıklardır. Buradan Ks (330 2 652/3252) tipi yük vagonlarında Ks (330 1 001/2650) tipinde olduğu gibi kullanımı sırasında dikme ve yan kapaklarına zarar verildiği sonucuna ulaştık.

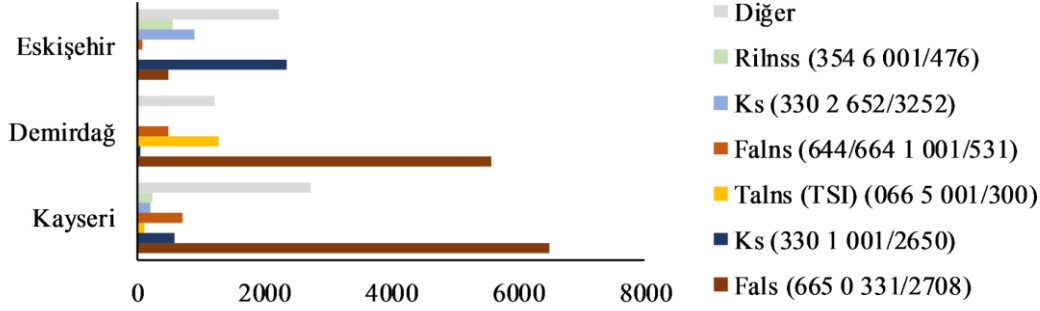
Şekil 5. ğ'da Rgns (TSI) (381 6 001/500) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Rgns (TSI) (381 6 001/500) tipi diğer vagonlardan farklı olarak TSI sertifikasına sahiptir. Rgns (TSI) (381 6 001/500) tipi en çok “Boden Kalınlığı 22mm Altında” ve “Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak” gerekçeleri ile tamire tutulmuştur. Rgns (TSI) (381 6 001/500) tipinde kompakt fren sistemi kullanıldığından sabolar sadece bojinin iç tarafından tekere basmaktadır. Bu durumun “Boden Kalınlığı 22mm Altında” ve “Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak” gerekçelerinin miktarına etkisi incelenmelidir. İlk beş tamire tutma nedeni arasında “Dikme/Dikme Desteği Hasarlı/Noksan (Platform Vagon)” ve “Yük Bağlama Tertibatı Hasarlı/Gevşek/Uygun Değil” gerekçeleri görülmektedir. Konteyner kitleme tertibatının yaylı olması “Yük Bağlama Tertibatı Hasarlı/Gevşek/Uygun Değil” sayısını artırmıştır.

Şekil 5. h'de Falns (664 1 532/891) tipinde kaç adet vagonun hangi gerekçelerle tamire tutulduğu verilmiştir. Falns (664 1 532/891) tipinde; “Tekerlek Apleti” gerekçesiyle 551 adet vagon diğer nedenlere göre açık ara fazla tamire tutulmuştur. Buradan Falns (664 1 532/891) tipi yük vagonlarında epidemik fren arızası olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. İlk beş tamire tutma nedeni arasında “Kapı Açık/Hasarlı”, “Yan Duvar Açık/Hasarlı (Açık Vagon)” ve “Vagon Gövdesi Yan Duvar Hasarlı” gerekçeleri bulunmaktadır. Söz konusu hasarlara kullanım hatası, cidar açıklığının fazla olması ve dikme olmaması neden olmaktadır. Falns (664 1 532/891) tipinde Falns (644/664 1 001/531) tipiyle benzer sonuca ulaştık.

| Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti | Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti |
|--|----------------------------|---|----------------------------|
| Boden Kalınlığı 22mm Altında | 3112 | Dikme/Dikme Desteği Hasarlı/Noksan (Platform Vagon) | 2352 |
| Yan Duvar Açık/Hasarlı (Açık Vagon) | 2340 | Yan Kapak Açık/Hasarlı (Platform Vagon) | 1073 |
| Kapı Açık/Hasarlı | 1805 | Yan Duvar Açık/Hasarlı (Açık Vagon) | 212 |
| Fren Hava Hortumu Hasarlı/Noksan/Sarkıyor | 1259 | Menteşe/Perno/Civata Hasarlı (Platform Vagon) | 207 |
| Vagon Gövdesi Yan Duvar Hasarlı | 1249 | Fren Mekanik Parçası Sarkık veya Kırık | 182 |
| a) Fals (665 0 331/2708) | | b) Ks (330 1 001/2650) | |
| Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti | Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti |
| Tekerlek Apleti | 739 | Tekerlek Apleti | 1069 |
| Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak | 466 | Kapı Açık/Hasarlı | 319 |
| Tekerlek Yuvarlanma Yüzeyinde Yer Yer Ezilme | 410 | Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak | 223 |
| Dikme/Dikme Desteği Hasarlı/Noksan (Platform Vagon) | 402 | Fren Balatası Noksan/Çatlak | 199 |
| Boden Kalınlığı 22mm Altında | 347 | Yan Duvar Açık/Hasarlı (Açık Vagon) | 165 |
| c) Sgss (456 8 923/9772) | | ç) Falns (644/664 1 001/531) | |
| Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti | Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti |
| Fren Mekanik Parçası Sarkık veya Kırık | 331 | Branda Kitleme Tertibatı Arızalı (Rils vb) | 650 |
| Yaprak Susta Ana Yaprak Kırık/Çatlak | 268 | Tekerlek Apleti | 346 |
| Dingil Kutusu Hasarlı/Yağ Sızdırıyor | 263 | Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak | 185 |
| Perno/Menot Kırık/Noksan/Çıkılmış | 223 | Tekerlek Yuvarlanma Yüzeyinde Metal Yığılması | 207 |
| Vagon Gövdesi Yan Duvar Hasarlı | 169 | Kapı Açık/Hasarlı | 179 |
| d) Es (552 0 002/1902) | | e) Rilnss (354 6 001/476) | |
| Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti | Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti |
| Kapı Açık/Hasarlı | 603 | Dikme/Dikme Desteği Hasarlı/Noksan (Platform Vagon) | 922 |
| Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak | 250 | Yan Kapak Açık/Hasarlı (Platform Vagon) | 459 |
| Açılabilir Çatı Açık/Kızıktan Çıkılmış/Kitleme Tertibatı Hasarlı | 202 | Yaprak Susta Ana Yaprak Kırık/Çatlak | 147 |
| Tekerlek Apleti | 199 | Yan Duvar Açık/Hasarlı (Açık Vagon) | 133 |
| Yangın | 198 | Menteşe/Perno/Civata Hasarlı (Platform Vagon) | 97 |
| f) Hbbillnss (246 1 001/999) | | g) Ks (330 2 652/3252) | |
| Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti | Tamire Tutulma Nedeni | Tamire Tutulan Vagon Adeti |
| Boden Kalınlığı 22mm Altında | 622 | Tekerlek Apleti | 551 |
| Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak | 506 | Kapı Açık/Hasarlı | 217 |
| Dikme/Dikme Desteği Hasarlı/Noksan (Platform Vagon) | 225 | Boden Kalınlığı 22mm Altında | 174 |
| Yangın | 214 | Yan Duvar Açık/Hasarlı (Açık Vagon) | 150 |
| Yük Bağlama Tertibatı Hasarlı/Gevşek/Uygun Değil | 143 | Vagon Gövdesi Yan Duvar Hasarlı | 89 |
| ğ) Rgns (TSI) (381 6 001/500) | | h) Falns (664 1 532/891) | |

Şekil 5. Tamire tutma nedenlerine göre tamire tutulan vagon adetleri

Şekil 6.'de en çok vagon tamire tutan Kayseri, Demirdağ ve Eskişehir, tamire tuttukları vagon tiplerine göre ele alınmıştır. Kayseri'de 2019-2022 yılları arasında en çok Fals (665 0 331/2708) tipi yük vagonu tamire tutulmuştur. Demirdağ'da ise en çok Fals (665 0 331/2708) ve Talns (TSI) (066 5 001/300) tipi yük vagonu tamire tutulmuştur. Eskişehir'de Ks (330 1 001/2650) ve Ks (330 2 652/3252) tipi yük vagonu tamire tutulmuştur. Genel olarak Kayseri ve Demirdağ Fals tipi vagonları, Eskişehir Ks tipi vagonları diğer tiplere göre açık ara fazla tamire tutmuştur.



Şekil 6. Kayseri, Demirdağ ve Eskişehir'in en çok tamire tuttukları vagon tipleri

Yeni kullanılmaya başlanan Y25Lsod tipi bojilerin “Boden Kalınlığı 22mm Altında” gerekçesiyle tamire tutulma sayısını önemli ölçüde azaltacağını düşünmekteyiz.

“Yangın” gerekçesi ile tamire tutulan vagon sayısı Şekil 2.'de görüleceği üzere onuncu sıradadır. Frende kaldığı için saboların tekerlere sürtmesi ile meydana gelen aşırı ısınmanın sisteme 1.2.2. kodu ile girilmesi gerektiği halde 8.2.3. kodu ile girildiği düşünülmektedir. Bu nedenle Vagon Teknisyeni Temel Eğitim kursu ders programına; SAP KKY ABYS'ye GCU EK 9'daki tamire tutma kodlarının doğru girilmesine ilişkin ilave yapılmasını tavsiye ediyoruz.

4. Sonuç

Demiryolu Tren İşletmeleri (Railway Undertaking) ve Zilyetler (Keeper) için bakım giderleri en büyük üç harcamadan biridir. Günümüzde bakım verilerinin SAP tabanlı sistemlerde tutulması ayrıntılı incelemeye imkân vermektedir.

Bu çalışmada genelden özele gidilmiştir. İlk olarak tamire en çok vagon tutan yerler ve tamire tutulma nedenleri belirlenmiştir. Kayseri, Demirdağ ve Eskişehir sırasıyla en çok vagon tamire tutan yerlerdir.

Açık ara en çok “Boden Kalınlığı 22mm Altında” ve “Tekerlek Apleti” gerekçeleriyle vagon tamire tutulmuştur. Buradan yedek parça olarak tekerlek gövdesi tüketiminin oldukça fazla olduğunu gördük. Bu nedenle ilk önemli tavsiyemiz tekerlek gövdesi tüketimini azaltmaya yönelik çalışma yapılması gerektiğidir.

Çatalağzı, Kayseri ve Afyon'da en çok “Boden Kalınlığı 22mm Altında” ve “Tekerlek Apleti” gerekçeleri ile vagon tamire tutulduğundan söz konusu yerlerde tekerlekleri torna yapmaya yönelik imkânların geliştirilmesi gerekmektedir. Çatalağzı'nda açık ara en çok “Tekerlek Apleti” gerekçesiyle vagon tamire tutulduğu için; Çatalağzı'nda sabolara gelen fren kuvvetinin ölçüldüğü test cihazının kullanılması gerekmektedir. En önemli ikinci tavsiyemiz fren kuvvetinin ölçüldüğü test cihazının başta Çatalağzı olmak üzere birkaç yerde olması gerektiğidir.

Üçüncü önemli tavsiyemiz; TSI sertifikasına sahip olmayan vagonlar için P10 pik döküm sabo yerine, LL tipi kompozit sabo kullanılmaması yönündedir. Eğer illa kullanılmak isteniyor ise

ERA/TD/2009-02/INT dokümanında belirtilen UIC onaylı LL tipi kompozit sabo üreticilerinden temin edilmelidir.

Vagon tipi bazında diğer tavsiye ve tespitlerimiz aşağıda sıralanmıştır:

- TCDD Taşımacılık AŞ parkında en çok Fals (665 0 331/2708) tipi vagon bulunmakta olup, söz konusu tip haliyle en fazla tamire tutulan tip sıralamasında ilk sıradır. Fals (665 0 331/2708) ve Falns (664 1 532/891) tipi genel olarak vagonun gövdesi/sandığı ile ilgili hasarlardan dolayı tamire tutulmaktadır. Genel olarak cevher vagonlarına üstten iş makinası kepçesiyle yükleme yapılmaktadır. İş makinası kepçesinin içindeki cevher/dökme hamule yüksekte vagon içine bırakıldığı için vagon gövdesi/sandığı zarar görmektedir.
- En çok tamire tutulan tip sıralamasında Ks (330 1 001/2650) ikinci sıradır. Ks (330 1 001/2650) ve Ks (330 2 652/3252) tiplerinin dikme ve yan kapakları ile ilgili fiziksel hasar veya noksanlıklar dikkat çekmektedir. Söz konusu tipteki vagonların kullanımı sırasında dikme ve yan kapaklarına zarar verilmektedir. Hasarlar özellikle poz çalışması esnasında ray ve travers yüklemelerinde meydana gelmektedir.
- Rgns (TSI) (381 6 001/500) tipinde kompakt fren sistemi kullanıldığından sabolar sadece bojinin iç tarafından tekere basmaktadır. Bu durumun “Boden Kalınlığı 22mm Altında” ve “Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak” gerekçelerinin sayısına etkisi incelenmelidir.
- Falns (644/664 1 001/531) tipinde ise epidemik fren arızası olduğunu, Sgss (456 8 923/9772) tipinde epidemik fren arızası olabileceğini düşünmekteyiz. Özellikle Falns (644/664 1 001/531) tipi vagonların fren yüzdesi ile ilgili sorun olduğunu bu nedenle sabolara gelen fren kuvvetinin mutlaka ölçülmesini ve UIC 544-1 ‘e göre fren hesaplarının yeniden yapılmasını tavsiye etmekteyiz.
- Malzeme yorulmasına bağlı nedenlerden dolayı tamire tutulduğu için Es (552 0 002/1902) tipi yük vagonlarının ekonomik ömrünü doldurduğunu düşünmekteyiz.
- Rilnss (354 6 001/476) tipi vagonların açılıp kapatılmasıyla ilgili kullanıcılara eğitim verilmesi gerekmektedir. Söz konusu vagonlarda branda tertibatı karşılıklı iki kişi tarafından açılıp kapatılması gerekirken, genelde tek taraflı iş makinaları ile kapatılmaya çalışılması neticesi hasarlanmalar oluşmaktadır.
- Hbbillnss (246 1 001/999) tipi vagonlarda kapı açma/kapama tertibatında ve Rgns (TSI) (381 6 001/500) tipi vagonlarda dikme ve konteyner kitleme tertibatında kullanım hatası yanında epidemik arızalar olabileceği sonucuna ulaştık.

Son olarak; GCU Ek 9 dördüncü başlık altında bulunan kalite yönetim sisteminin kullanılması bu çalışmada elde edilen benzer tespitlerin daha kolay ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

Uluslararası standartlarda demiryolu araçlarının ömrünün 20-30 yıl arasında olduğu varsayılmaktadır. Ülkemizde kullanılan yük vagonlarının tip bazında LCC (Life Cycle Costing-Yaşam Dönemi Maliyetlemesi) hesaplaması yapılabilir. Bu çalışmanın devamı olarak, makine öğrenmesi ve gruplama yöntemleriyle benzer veriler daha detaylı analiz edilebilir. Yapılacak çalışmalarda vagonun yaptığı km, yaşı vb diğer veriler dikkate alınabilir.

Teşekkür

Bu çalışma TCDD Taşımacılık AŞ'nin 04.10.2021 tarih ve E-30614766-204.02.99-128179 sayılı onayı ile yapılmıştır. Çalışmaya önderlik eden TCDD Taşımacılık AŞ Genel Müdür Yardımcısı Erol ARIKAN, Daire Başkanı Murat DURUKAN, Şube Müdürü Kamil BAYATLI, Mühendis Hasan ÖZDEMİR ve Teknik Şef İsmail İNAN'a teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] K. Kaya, "Raylı sistem araçlarında RAMS verilerini ve tekniklerini kullanarak, araç performansını, bakım ve arıza giderlerini iyileştirmek," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, 2003.
- [2] H. C. Öteyaka, M. Ö. Öteyaka, R. Köse, "Ürün maliyetini azaltmak için ideal bakım yönetimi," *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 56–60, 2018.
- [3] D. A. Kovenkin, V. A. Podverbnyy, "Issues of planning work on the current maintenance of the railway track," *Transportation Research Procedia*, vol. 61, pp. 636–640, 2022.
- [4] F. Nijland, K. Gkiotsalitis, E.C. van Berkum, "Improving railway maintenance schedules by considering hindrance and capacity constraints," *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, vol. 126, pp. 103–108, 2021, doi: 10.1016/j.trc.2021.103108.
- [5] S. Özdemir, E. C. Özcan, "AHP, COPRAS ve tamsayı programlama entegrasyonu ile demiryolu araçlarında bakım planlaması," *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 12, ss. 1-12, 2020, doi:10.47072/demiryolu.678580.
- [6] T. Kadioğlu, T. Toprak, "Raylı sistem araçlarında RAMS verilerini ve tekniklerini kullanarak, araç performansını, bakım ve arıza giderlerini iyileştirmek," *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 19, sayı. 38, ss. 190-207, 2020.
- [7] W. Sammouri, "Data mining of temporal sequences for the prediction of infrequent failure events: application on floating train data for predictive maintenance," Doktora Tezi, Université Paris-Est, 2015.
- [8] J., Zomer, N., Bešinović, M. M.de, Weerdt, R. M. P., Goverde, "The Maintenance location choice problem for railway rolling stock," *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 20, pp. 100268, 2021, doi: 10.1016/j.jrtpm.2021.100268.
- [9] F. Öge, "Hafif raylı sistem araçlarında bakım iyileştirmesi," Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, 2015.
- [10] General Contract of Use for Wagons (GCU), 2022.
- [11] Yük vagonlarında kullanılan fren sistemleri eğitimi, Wabtec, Eskişehir, 2022.
- [12] PRODAT, "brake force sensors," 2023. [Online]. Available: https://www.prodat.de/EN/products/brake_force_sensors/ [Accessed January 24, 2023]
- [13] Sabo baskı kuvveti testi raporu, RAYVAG, Adana, 2018.

Özgeçmiş



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

**Elif DESTİCİOĞLU**

1987 yılında Bursa da doğmuştur. Lise eğitimini Bursa Atatürk Lisesi'nde ve lisans eğitimini 2011 yılında Anadolu Üniversitesi'nde Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimine Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde devam etmektedir. 2018 yılından beri Canray Ulaşım Sistemleri A.Ş. şirketinde çalışmaktadır.

E-Posta: elifsenturk87@gmail.com

**Mehmet FİDAN**

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Yüksek lisans ve doktora eğitimini Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksek Okulu Raylı Sistemler Elektrik-Elektronik Programında doktor öğretim üyesi olarak çalışmakta ve yine aynı alanda akademik çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: mfidan@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ömür AKBAYIR: Verilerin temini, Verilen analizi, Sonuçların yorumlanması, Gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme, Kontrol. Elif DESTİCİOĞLU: Kaynaklar, Metodoloji, Verilerin analizi, Yazma, Görselleştirme, Sonuçların yorumlanması. Mehmet FİDAN: Metodoloji, İnceleme, Kontrol.



Petri Net Modeling and Controller Design of Unistar CSV24 Point Machine

Aslı SOYİÇ LEBLEBİCİ 

*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü,
Eskişehir, Türkiye*

*aleblebici@ogu.edu.tr

(Alınış/Received: 03.01.2023, Kabul/Accepted: 27.01.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2023)

Abstract: Railway transportation has become essential in transportation systems because of its fast, safe, cheap and environmentally friendly structure. The safe navigation of trains depends on the correct design of the signaling system and its components. Developing technology also brings about changes in the standards used in rail transportation systems such that the railway safety standards recommend using Petri Nets in the modeling of point machines, which are the most basic actuators of signaling systems. The working principle of point machines can be easily explained with Discrete Event Systems (DES). In this study, a model was created for the Unistar CSV24 point machine, which is widely used in Turkey, by using Petri Nets. The validation of obtained model was verified using the TAPAAL interface. Electromechanical and Programmable Logic Control (PLC) solutions are presented to control the verified model. Siemens TIA PORTAL was used to obtain the PLC block of the point machine.

Keywords: Point machine, Petri Net, TAPAAL, PLC control, Electromechanical control, Unistar CSV24

Unistar CSV24 Makas Motoru için Petri Ağı Modeli Oluşturulması ve Kontrolcü Tasarımı

Öz: Demiryolu taşımacılığı hızlı, güvenli, ucuz ve çevre dostu yapısı sayesinde ulaşım sistemlerinde önem kazanmıştır. Trenlerin güvenli bir şekilde seyir etmeleri ise sinyalizasyon sistemlerinin ve bileşenlerinin doğru tasarlanmasına bağlıdır. Hızla ilerleyen teknoloji raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan standartlarda da değişimleri beraberinde getirmektedir. Öyle ki, demiryolu güvenlik standartları sinyalizasyon sistemlerinin en temel eyleyicisi olan makas motorlarının modellenmesinde Petri Ağlarının kullanılmasını önermektedir. Makas motorlarının çalışma prensibi Ayrık Olay Sistemleri (AOS) ile kolayca açıklanabilmektedir. Bu çalışmada, Türkiye’de de yaygın biçimde kullanılan Unistar CSV24 makas motoru için Petri Ağları kullanılarak model oluşturulmuştur. Elde edilen modelin doğrulaması TAPAAL arayüzü kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulan modelin kontrolü için elektromekanik ve Programlanabilir Lojik Kontrol (PLC) çözümleri sunulmuştur. PLC çözümü için Siemens TIA PORTAL arayüzü kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Makas motoru, Petri Ağı, TAPAAL, PLC kontrol, Elektromekanik kontrol, Unistar CSV24

1. Introduction

Rail transport must satisfy passenger safety and comfort to compete with road or air transportation. Safe rail transportation is possible via the control of verified signalization systems. In railways, signalization systems are used to maintain the safety distance between trains on the same route and to perform crossings safely at the intersections of railway lines. Therefore, a fault in the signalization systems can cause accidents that lead to life-threatening losses [1]. The developing technology uses many software and control algorithms to model signalization systems and components and verify these models. The main components of railway signalization systems can be categorized as: points, signals, rail circuits or axle counters, level crossings, interlocking

Atıf için/Cite as: A. Soyıç Leblebici, “Petri net modeling and controller design of unistar CSV24 point machine,” *Railway Engineering*, no. 17, pp. 211-222, Jan. 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1228712

systems and central traffic control (CTC) [1, 2]. There are level crossings where the railway intersects with the highways. While the rail circuits/axle counters provide information about whether the railway is occupied by any railway vehicle, point machines allocate lines in one direction (reverse or normal) [1, 2, 3]. The data from all these field equipment, alarm conditions, route conditions, and line occupation information are collectors in the CTC. The interlocking between the equipment is managed from this center. Before the use of computer systems in signaling systems, especially in conventional lines, electromechanical control systems with relays were used. These control systems are currently being replaced with today's PLC-controlled computer and software technology to adapt to the newly added lines' signaling systems and control centers [4].

The point machine is the main actuator in the railway signalization system. The route of a railway vehicle may be set with the correct position of the point machines on the route. Then modeling and control of a point machine have significant importance. In railways, the EN50128 standard is used to meet safety conditions, and this standard suggests using Petri Nets in modeling signalization systems and components [3]. The Petri Nets are used to design, analyze and control discrete event systems with graphical and mathematical structures [5, 6]. For this reason, it is possible to see examples of Petri Nets in railways such that in the study [2], a Petri Net model was designed for a railway interlocking system and for this model, the Programmable Logic Control (PLC) block was created. The results were simulated on a small part of a railway. The Petri Net was used for modeling interlocking and signalization systems in [1], and these models were realized by using PLC. The functional safety requirements have been discussed for the Turkish National Railway Signalling Project. Petri Net models of signalization system equipment and software were developed using fail-safe PLCs [7]. Since it was more practical to obtain PLC codes in the SFC language from a Petri Net model, in this study, instead of function block diagrams (FBD) language, the Sequential Function Charts (SFC) language was preferred in coding PLC. The theoretical results for an interlocking system were tested on Interlocking Test Program with a railway field. The study [8] examined the Automation Petri Nets (APN) in railway signalization systems. The advantages of APN in railways were summarized. Then by using the Token Passing Logic method from the designed APN model of a railway yard with two crossover switches, a PLC ladder logic diagram was obtained and presented in the study.

In this study, an electrical point machine was modeled by using Petri Nets. The obtained model deadlock analysis was realized by using TAPAAL interface that presents an environment for editing and simulation of timed-arc Petri Nets. It also provides a verification module that automatically checks bounded timed-arc Petri Net models main structural properties. It is easy to design electromechanical / PLC control logic from validated Petri Net models [9]. Then, an electromechanical control circuit was designed for point machine by using relays. Although the electromechanical control systems support the real-time control, it is not possible to connect computers to relays directly. Therefore, today electromechanical control systems are being placed by PLC controlled systems. Then the PLC block for the point machine was created by using the Siemens TIA PORTAL interface. Since the Unistar CSV24 point machine is widely used in Turkey, all simulations were realized with Unistar CSV24 parameters.

The study is organized as follows: In Section 2, points in railways are summarized. The Petri Net graphical representation and structural behaviours are examined. A Petri Net model for an electrical point machine is studied in Section 3 while in Section 4, the point machine controller is designed by using both electromechanical control method and PLC. Study is concluded with Conclusions section.

2. Points

In railways, points allow the trains to go in the desired direction by changing their direction. A point has three position such that: *normal position*, *reverse position* and an *intermediate position*. The position of point in which the train goes without changing direction is called as the normal position, and the position where it goes by changing direction is called as the reverse position. The intermediate position which may cause trains to derail is used when changing from normal position to reverse position and vice versa. This feature makes the switches a vital element of the railway signalization systems [10].

The points can be classified into two groups such that motorized points that is controlled by an electrical motor and points with detector. While the electrical point machine may be controlled and its position can be seen from the central traffic control (CTC), only the position may be seen from the points with detector. Figure 1 shows widely used electrical point machine Unistar CSV24 structure. In this study, an electrical point machine Petri Net model was discussed for Unistar CSV24 parameters and both electromechanical and PLC controllers design were realized [11].

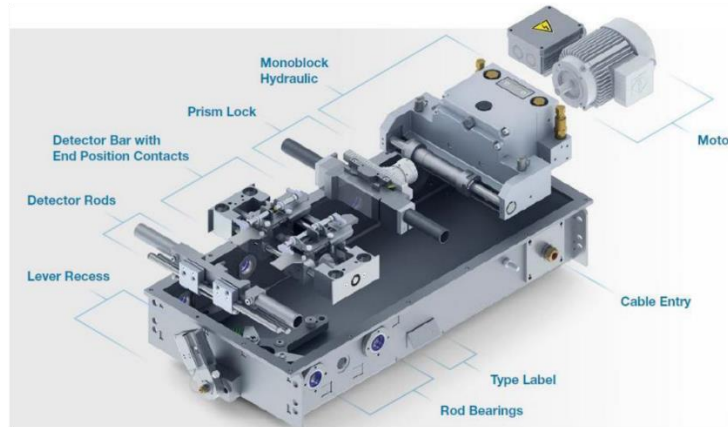


Figure 1. Unistar CSV24 point machine [12]

3. Petri Nets

The Petri Nets are used for modeling, analysis and control of discrete event systems. A Petri Net model consists of places, transitions and connections between them. In a Petri Net model, the circles denote the places (symbolized with P) while the lines show the transitions (named with t). The connections between places and transitions are realized by arrows. The “•” symbol is used for tokens in the graphical representation of Petri Net model. In a Petri Net model, firing of a transition is possible if and only if the number of tokens in the related place are equal to the weight of the arrow in between the place and the transition [5, 6, 7].

The Figure 2 shows an example of a simple Petri Net model that has the structure of $G = (P, T, N, O, m_0)$ which may be explained as below;

- $P = \{P_0, \dots, P_n\}$: The set of places (finite dimension)
- $T = \{t_0, \dots, t_m\}$: The set of transitions (finite dimension)
- $N: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$: The input matrixe from places to transitions
- $O: T \times P \rightarrow \mathbb{N}$: The output matrixe from transitions to places
- $m_0: P \rightarrow \mathbb{N}$: Initial marking

According to the Petri Net model in the figure, since the place P_0 has one token and the weight of the arrow in between place P_0 and transition t_0 , at first only t_0 can be fired. However, the transition t_1 could be fired if and only if the state P_1 has at least two tokens.

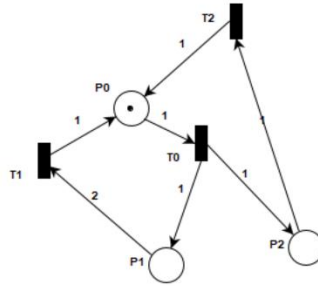


Figure 2. Petri Net model.

The reachability, liveness and deadlock are the three main structural properties of Petri Nets. In a Petri Net model, if the system can return to its initial condition regardless of firing order of transitions, the system is reachable. The liveness property guarantees that system has no deadlock. If a model has deadlock, it is not possible for the system to continue working [6].

The Petri Net models can be designed and analyzed via computer programs such that PNEditor, PNetLab, WoPeD, MATLAB, PIPE2, TAPAAL etc. In this study PIPE2 was used to design Petri Net model of Unistar CSV24 point machine and TAPAAL was used to verify these model.

3.1. The electrical point machine Petri Net model

Since the Unistar CSV24 point machine is suitable for points that are made in Turkey, then it is preferred in the signalization projects of Turkish State Railways (TCDD). The point machine may be controlled either automatically or manually (with a crack handle or manual command). While preparing a route for a train the point machine will be controlled automatically. In automatic control, if the point reach the desired position (reverse / normal) within the given time (for Unistar CSV24 the time is 10 s) the point machine will be locked electrically. In manual control electrical lock is not applied. If the point machine is tried to turn with a crack handle or the point could not reach its final position in given time (either automatic control or manual control) there will be a fault signal on the CTC [11, 13]. Then a Petri Net model was created based on this information and given in Figure 3.

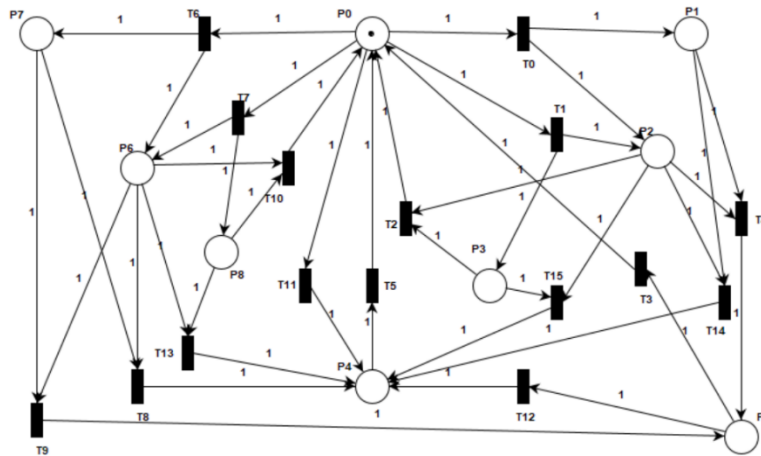


Figure 3. Petri net model of point machine Unistar CSV24

Table 1. Places of the Petri Net model

| Place | Description |
|----------------------|---|
| P_0 (State P_0) | Control Enable |
| P_1 (State P_1) | Automatic control for normal position |
| P_2 (State P_2) | Point machine turns to normal position |
| P_3 (State P_3) | Manuel control for normal position |
| P_4 (State P_4) | Fault |
| P_5 (State P_5) | Point machine locked electrically |
| P_6 (State P_6) | Point machine turns to reverse position |
| P_7 (State P_7) | Automatic control for reverse position |
| P_8 (State P_8) | Manuel control for reverse position |

According to the figure, the places set $P = \{P_0, \dots, P_8\}$ is given in Table 1 while the transition set $T = \{t_0, \dots, t_{15}\}$ is presented in Table 2. The initial marking is given as $m_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ which means that at the beginning there is only one token in place P_0 .

The model is verified to examine deadlock by using TAPAAL software. As a result, there is no deadlock on system and also the system is reachable.

Table 2. Transitions of the Petri Net model

| Transitions | Description | Transitions | Description |
|-------------|--|-------------|---|
| t0 | Turn to normal signal (automatic control) | t8 | The reverse position is not reached in given time (automatic control) |
| t1 | Turn to normal signal (manuel control) | t9 | The reverse position is reached in given time (automatic control) |
| t2 | The normal position is reached in given time (manuel control) | t10 | The reverse position is reached in given time (manuel control) |
| t3 | Point free signal | t11 | Crack handle |
| t4 | The normal position is reached in given time (automatic control) | t12 | Crack handle (while point is locked) |
| t5 | Reset signal | t13 | The reverse position is not reached in given time (manuel control) |
| t6 | Turn to reverse signal (automatic control) | t14 | The normal position is not reached in given time (automatic control) |
| t7 | Turn to reverse signal (manuel control) | t15 | The normal position is not reached in given time (manuel control) |

4. Point Machine Control

An electrical point machine is a mechatronic system that consists of sensors, a controller and actuators. Sensors collect data from the point machine such that “point in reverse position,” “point in normal position,” “point free signal,” and “crack handle”. In an electrical point machine, the actuator part is an electrical motor. ON/OFF controllers may be used to control such a system. The sensors and actuators remain the same even if the controller type changes. In this study, as

an ON/OFF controller, the electromechanical control circuit and PLC block were designed for Unistar CSV24 point machine by using Petri Net model.

4.1. The electromechanical control

The electromechanical term has included both mechanical and electrical systems. In automation systems especially controlling of motors the electromechanical control circuits has been used for many years. The electromechanical relays, time relays and counter relays form the backbone of the electromechanical control circuits. The main advantage of the electromechanical control systems is that it provides real-time control. On the other hand, the connections between computers and relays could not be done directly [14, 15, 16].

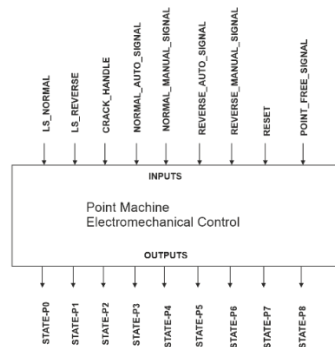


Figure 4. Electromechanical controller for Unistar CSV24

In this study for Unistar CSV24, an electromechanical control circuit was designed using Petri Net model. Figure 4 shows the electromechanical control unit with control circuits in Figures 5 - 6. The inputs and outputs are summarized in Table 3 and Table 4. In this electromechanical control unit for each sensor and CTC command, a relay is used as a memory variable (LS-N, LS-R and R1 – R6). The electromechanical control circuit is designed using the related contacts of these relays. In the control circuit, as shown in Figure 6, T1 and T2 are on delay timers and P0 – P8 are relays that correspond to the states in the Petri Net model. Though the relays can process real-time data (parallel signal processing), in recent years, the relay control has been replaced by PLC technology. The PLC control commands are evaluated based on time (serial signal processing), but PLC is not affected by bad environmental conditions. Also, relays could not communicate with computers directly. In case of possible error, fail-safe PLCs (especially those certified according to Safety Integrated Level – SIL) are preferred, which greatly contribute to ride and passenger safety by protecting the system. Then in this study, a PLC block was created to control Unistar CSV24.

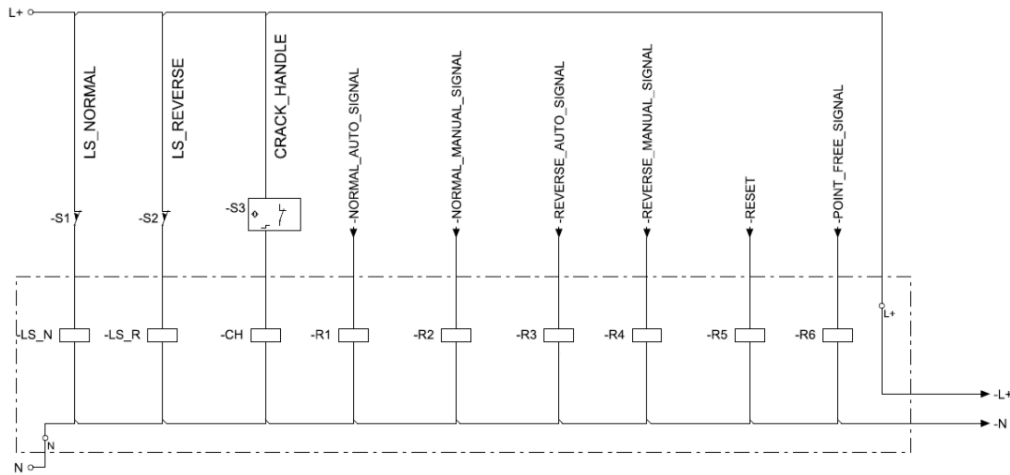


Figure 5. Electromechanical control circuit for Unistar CSV24

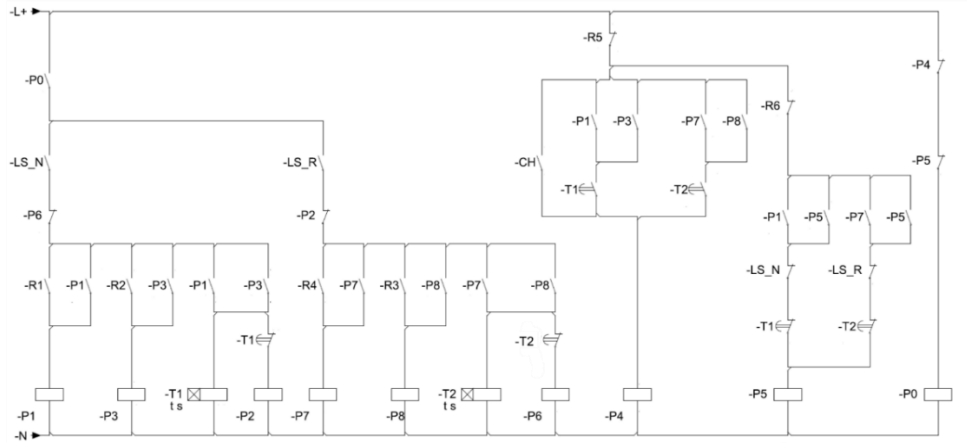


Figure 6. Electromechanical control circuit for Unistar CSV24

Table 3. The Electromechanical control circuit and PLC block Inputs

| Electromechanical Inputs / PLC Inputs | Description | Petri Net Model Variable |
|---------------------------------------|--|--------------------------|
| LS_NORMAL | Point at normal position limit switch | $t_2 t_4$ |
| LS_REVERSE | Point at reverse position limit switch | $t_9 t_{10}$ |
| CRACK_HANDLE | Crack handle sensor | $t_{11} t_{12}$ |
| NORMAL_AUTO_SIGNAL | Turn to normal signal (automatic control) | t_0 |
| NORMAL_MANUAL_SIGNAL | Turn to normal signal (manual control) | t_1 |
| REVERSE_AUTO_SIGNAL | Turn to reverse signal (automatic control) | t_6 |
| REVERSE_MANUAL_SIGNAL | Turn to reverse signal (manual control) | t_7 |
| RESET | Reset | t_5 |
| POINT_FREE_SIGNAL | Point free signal | t_3 |

Table 4. The Electromechanical control circuit and PLC block Outputs

| Electromechanical Outputs/ PLC Outputs | Description | Petri Net Model Variable |
|---|--|-----------------------------|
| P_0 / State P_0 | Control Enable | P_0 |
| P_1 / State P_1 | Automatic control for normal position | P_1 |
| P_2 / State P_2 | Point machine turns to normal position | P_2 |
| P_3 / State P_3 | Manuel control for normal position | P_3 |
| P_4 / State P_4 | Fault | P_4 |
| P_5 / State P_5 | Point machine locked electrically | P_5 |
| P_6 / State P_6 | Point machine turns to reverse position | P_6 |
| P_7 / State P_7 | Automatic control for reverse poisiton | P_7 |
| P_8 / State P_8 | Manuel control for reverse poisiton | P_8 |

4.2. The PLC control

In general, to obtain PLC logic from the Petri Net model Token Passing Logic (TPL) method is suggested [18]. According to this method, if a place has one token, one local variable will be defined. If the number of tokens is greater than one, a counter will be assigned. When the place or transition is related to time, on delay timer will be used. Then, the PLC block for Unistar CSV24 is given in Figure 7, with logic in Figures 8-12. The block was designed in Siemens TIA PORTAL software by using Petri Net model.

According to the PLC block, inputs (from field or CTC command), and outputs (to field or CTC) are given in Table-3 and Table-4. Memory variables (neither input nor output) are also used. The PLC block in Figure 7 consists of 5 parts. The first part of the PLC block shown by Figure 8 corresponds to place P_0 in the Petri Net model, which means that the motor is enabled for control.

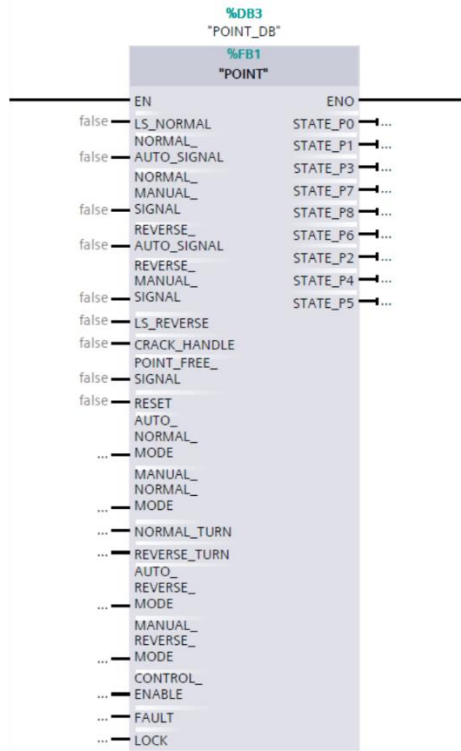


Figure 7. PLC block for Unistar CSV24

Network 2:

% CONTROL ENABLE (INITIAL CONDITION) - STATE P0



Figure 8. PLC block network2 logic for Unistar CSV24

Network 1:

% AUTOMATIC CONTROL FOR POINT MACHINE NORMAL POSITION - STATE P1
 % MANUEL CONTROL FOR POINT MACHINE NORMAL POSITION - STATE P3
 % POINT MACHINE TURNS TO NORMAL POSITION - STATE P2



Figure 9. PLC block network1 logic for Unistar CSV24

Figure 9 and Figure 10 show the motor normal/reverse turnout commands that can be found in the Petri Net model state P2 and P6. The fault signal is generated in Figure 11 while, electrically locking is realized by using the program part in Figure 12.

The Siemens TIA PORTAL is an interface that may be used to program Siemens automation devices. The interface provides writing PLC codes with function blocks defined by standard IEC61131-3 [19]. The results are verified by computer simulations. Similar studies in the literature are generally creating Petri Net models to meet safety standards and creating PLC codes in different languages (ladder logic / FBD / SFC) using these models. In this study, Petri Net model of the point motor was created and PLC block was obtained from this model in FBD language. In this study, unlike the literature, an electromechanical control unit, which is one of the old methods, is also designed. It has been observed that similar methods are used to create a PLC block or electromechanical control unit of a signalization system element with a Petri net. Therefore, it is seen that it is explanatory discussion for railway workers in revising the systems of electromechanically controlled railway lines, in which relays are used, into new generation PLC-controlled systems, in which computers and software are used.

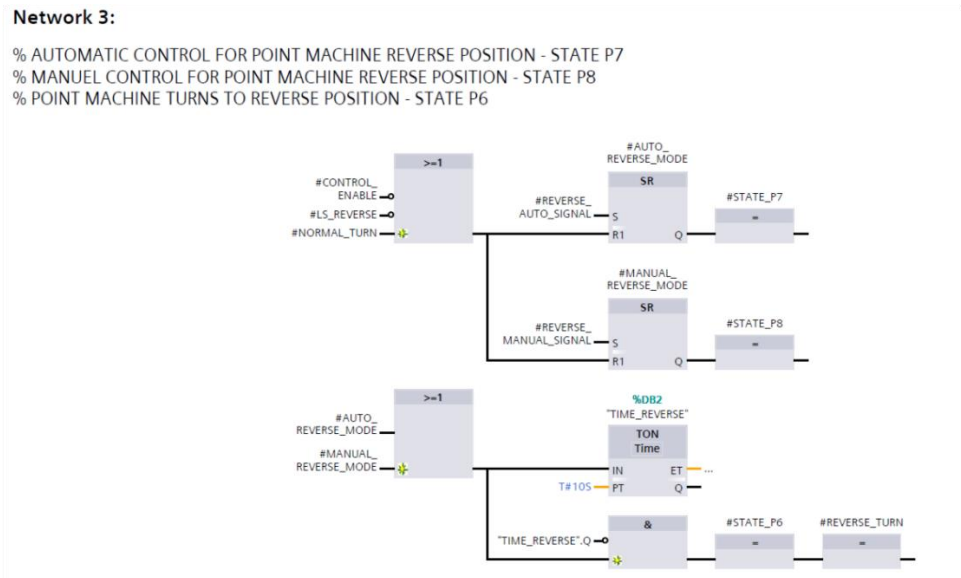


Figure 10. PLC block network3 logic for Unistar CSV24

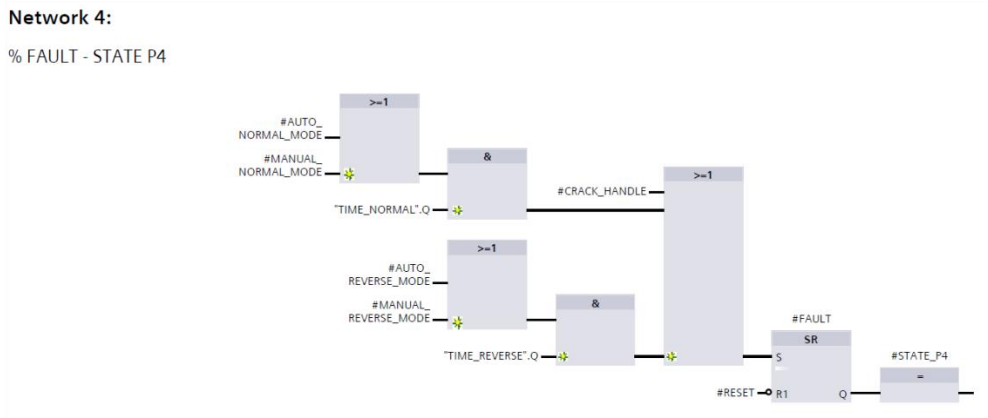


Figure 11. PLC block network4 logic for Unistar CSV24

Network 5:

% POINT MACHINE ELECTRICALLY LOCKED - STATE P5

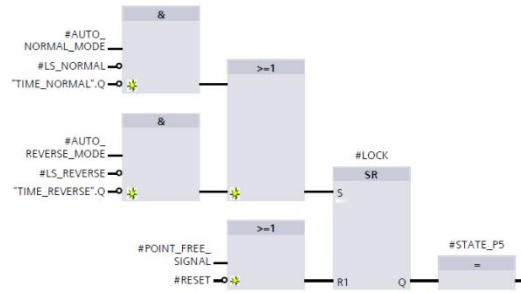


Figure 12. PLC block network5 logic for Unistar CSV24

4. Conclusion

In this study, the Petri Net model of an electrical point machine was obtained. For Unistar CSV24 parameters, the deadlock analysis was applied to the model by using TAPAAL. The deadlock verification of this model has a significant importance to ensure the reliability and continuity of the point machine control. In the past, the electromechanical control method was preferred for point machine control but nowadays PLC control is used. The PLC logic might be set up easily from the validated Petri Net model with token passing logic (TPL) method. In this study, for Unistar CSV24, at first an electromechanical control circuit was designed. Although the electromechanical control method has real time control capability, in this study also a PLC control block was designed by using today's technology. Designed controllers are simulated by using computer programmes. A fail-safe PLC block can be created, based on the PLC control block developed in this study. The point machines also used in the industry such that iron and steel industry or mining industry. The developed control blocks also may be applied to the point machines in the other industrial area.

References

- [1] K. Akın, M. S. Durmuş and M.T. Söylemez, "Demiryolu sinyalizasyon sistemi bileşenlerinin otomasyon petri ağları ile modellenmesi ve PLC ile gerçekleştirilmesi", in TOK'10. *Turkish National Conference on Automatic Control*, Gebze, Turkey, 2010, pp.241-245.
- [2] S. Saygın, İ. Yakın, M.S. Durmuş and M.T. Söylemez, "Petri ağlarıyla demiryolu makas bölgelerinin anlaşılman ve sinyalizasyon tasarımı", in TOK'09. *Turkish National Conference on Automatic Control*, İstanbul, Turkey, 2009.
- [3] M.S. Durmuş and M. T. Söylemez, "Railway signalization and interlocking design via automation Petri Nets", in ASSC2009. *7th Asian Control Conference*, Hong Kong, China, 2009.
- [4] S. Karayanık, "Marmaray Sinyalizasyon Sistemleri", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 4, pp. 71-77, 2016.
- [5] A. Aybar and A. İftar, "Controller design to enforce boundedness, liveness and reversibility in Petri Nets", in IFAC-IMS2003. *7th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Budapest, Hungary, 2003, pp.199-204.
- [6] T. Murata, "Petri Nets: properties, analysis and application", in *Proc. of the IEEE*, vol.77, no.4, pp.541-580, April, 1989.
- [7] M. S. Durmuş, U. Yıldırım and M. T. Söylemez, "The application of automation theory to railway signaling systems: the Turkish national railway signalling project", in *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol.19, no.5, pp. 216 – 223, 2013.
- [8] B. Malakar and B. K. Roy, "Railway fail-safe signalization and interlocking design based on automation petri net", in ICICES2014. *International Conference on Information Communication and Embedded Systems*, Chennai, India, 2014.

- [9] J. Byg, K. Y. Jørgensen and J. Srba. TAPAAL: Editor, Simulator and Verifier of Timed-Arc Petri Nets, in: Liu, Z., Ravn, A.P. (eds) Automated Technology for Verification and Analysis. ATVA 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5799. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [10] M. L. Bliguet and A. A. Kjaer, "Modelling interlocking systems for railway stations", M.Sc. thesis, Department of Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2008.
- [11] E. Dincel, "Anlaşman sistemlerinin hatada güvenli bir plc ile gerçekleştirilmesi", M.Sc. thesis, Control and Automation Engineering Program, ITU, 2013.
- [12] O. Ovalı, "Comparison of constructional aspect of differenet railway point machines", Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, METU, Ankara, Turkey, 2019.
- [13] İ. Yıldırım, "Demiryolu sinyalizasyon sistemlerinin otomat yaklaşımı ile anlaşman tasarımı ve uygulaması", M.Sc. thesis, Electrical Engineering Program, ITU, 2012.
- [14] M. Brown, J. Rawtani and D. Patil, *Practical troubleshooting of electrical equipment and control circuits*. Elsevier, 2005.
- [15] J. Keljik, *Electricity AC/DC motors, controls and maintenance*. DELMAR Cengage Learning, 2013.
- [16] R. Miller and M. R. Miller, *Industrial electricity and motor controls*. Mc Graw Hill Education, 2013.
- [17] B. Hruz and M. C. Zhou, *Modeling and control of discrete event systems with Petri Nets and other tool*. Springer, 2007.
- [18] M. Uzam, A. H. Jones and N. Ajlouni, "Conversion of Petri net controllers for manufacturing systems into ladder logic diagrams," in ETFA '96, *Proceedings 1996 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. Kauai, HI, USA, 1996.
- [19] Siemens Industry, "How do you program the PLC with STEP 7 (TIA Portal) in compliance with the IEC 61131-3 standard?", 2013. [Online]. Available: [https://support.industry.siemens.com/cs/document/50204938/how-do-you-program-the-plc-with-step-7-\(tia-portal\)-in-compliance-with-the-iec-61131-3-standard-?dti=0&lc=en-TR](https://support.industry.siemens.com/cs/document/50204938/how-do-you-program-the-plc-with-step-7-(tia-portal)-in-compliance-with-the-iec-61131-3-standard-?dti=0&lc=en-TR) [Accessed: 25-Jan-2023]

Resume



Aslı SOYİÇ LEBLEBİCİ

Aslı Soyıç Leblebici received her B.Sc. degree from Anadolu University, Eskisehir, Turkey, in 2007. She received her M.Sc. degree from Anadolu University, Eskisehir, Turkey, in 2009. She is currently working as lecturer at Electronics and Automation Department of Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey. Her research interests include mechatronic systems, railway vehicle dynamics, optimization and control systems.

E-mail: aleblebici@ogu.edu.tr

Ethics Statement:

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



On the Dynamic Analysis of Freight Wagon-Track Interaction

Aslı SOYİÇ LEBLEBİCİ¹, Semiha TÜRKAY^{*2}

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Eskişehir, Türkiye

² Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Türkiye

*semihaturkay@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 15.09.2022, Kabul/Accepted: 27.01.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2023)

Abstract: In this study, a six-degrees-of-freedom half-car model for a freight wagon is used to study the ride motions of the vehicle under random rail inputs. As a rail input, the track profiles taken from Federal Railroad-Administration (FRA) international standard are used. A coupled vertical vehicle-track system is formed as a polytopic function of the track roughness parameter and vehicle speed and their influence on the vehicle dynamics is discussed. Then an optimization problem with a single objective function is formulated for a range of track roughness parameters and vehicle speeds. \mathcal{H}_∞ control focuses on obtaining a robustness concerning the uncertainty of the system. So, we used \mathcal{H}_∞ optimization to obtain the solutions while maximizing the trade-off between the respective performance indices. Later, a controller with a fixed speed value is synthesized and the results are compared by using the frequency response plots and the root-mean-square values of the car body accelerations and secondary and primary suspension deflections. The simulation results demonstrate that the active system is effective in improving ride comfort while keeping the rail holding within allowable limits.

Keywords: Wagon, H_∞ control, Speed characteristics, Track roughness parameter

Yük Vagonu-Hat Dinamik Analizi

Öz: Bu çalışmada, bir yük vagonu için altı serbestlik dereceli yarım araç modeli, rassal ray girdileri ile uyarılmış aracın düşey sürüş hareketlerini incelemek için kullanılacaktır. Rassal ray girdisi olarak, Federal Railroad Administration (FRA) uluslararası standardı tarafından tanımlanmış iz profilleri kullanılacaktır. Birleştirilmiş düşey araç-iz sistemi polytopic bir fonksiyon olarak iz pürüzlülük parametresi ve araç hızı cinsinden oluşturulmuştur ve araç dinamiği üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Daha sonra, tek amaçlı optimizasyon problemi, çeşitli araç hızları ve pürüzlülük parametreleri için formüle edilmiştir. \mathcal{H}_∞ denetleyicisi sistemin belirsizliklerini göze alarak gürbüzlük elde etmeyi hedefler. Bu nedenle sonuçlar \mathcal{H}_∞ optimizasyonu kullanılarak, ilgili performans endeksleri arasında en yüksek uzlaşım eğrilerini elde etmek için kullanılmıştır. Çalışmanın son kısmında, sabit hızlı bir denetleyici sentezlenmiştir ve sonuçlar araç gövdesi ivmeleri, ikincil ve birincil süspansiyon deformasyonları için frekans yanıt grafikleri ve kare-kök-ortalama değerleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları, aktif sistemin sürüş konforunu iyileştirirken, ray tutuşunu izin verilen limitlerde korumakta başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Vagon, H_∞ denetleyicisi, Hız karakteristikleri, Hat pürüzlülük indeksi

1. Introduction

Railway transportation is a good solution with its cheaper, safer, and environmentally friendly structure to carry more passengers and goods. To be more preferred, it is needed to increase vehicle speeds. Unlike other transportation systems, vehicle speeds are limited by the track geometry [1]. The existing traditional lines which provide mixed passenger and freight train traffic may not meet the higher speed demands since the track needs to take both freight and passenger train into account, and it must restrict the maximum weight, length, and speed. Although the high costs, building more straight lines which are dedicated to high-speed passenger trains is a solution [2]. Another problem especially for the traditional lines is track maintenance. The vehicle forces that are transmitted from the wheels to the track create ground vibrations which are the main source of track degradations [3]. Although the engineering challenges are greater, especially in high-speed passenger vehicles, the railway industry abstains from applications of active systems in practice because of the high costs and the complexity disadvantages.

The higher speeds on both passenger and freight trains increase the dynamic response of the track. However, unlike passenger trains, freight wagons don't have a primary suspension between the wheels and the bogie frames. The Y25 bogie has been a UIC standard freight bogie since 1967 with the suspension structure as friction dampers and intertwined coil springs. In [4], a bogie-based and car body-based wheel flat detection was evaluated for the Y25 bogie to determine the eventual hardware robustness and signal processing requirements. Here, various vehicle operating conditions and wheel flat defects were simulated to analyze the wheel flat impact propagation throughout the railway vehicle bodies. The studies in [5, 6] show that, at the same speed, the freight train effects on the track dynamic are larger than the passenger trains. Separating the rail lines for freight and passenger vehicles might be a solution. However, the freight trains due to their heavier load still cause ground vibrations, especially in the 4-30 Hz frequency range. In this range of frequencies, if the amplitude of vibration is sufficient, it can be felt and in addition to track degradations it may cause disturbances for people living near the railways and damage to lineside structures [7]. Acceptable sinusoidal vibration levels for various living and working areas are listed in BS 6472 [8] and depend on many factors such as time of day and building usage. An effective solution to overcome the freight train-induced vibrations can be utilized by predicting the vibrations at the source. BS ISO 14837 Part 1 [9] provides guidelines on the essential considerations associated with developing prediction models and shows in outline the stages to be observed for new or modified rail systems. The other suggested solution in the literature is the propagation of the vibration from the source to the receiver or reducing the vibration effects on the receiver as in [10]. Much research has been undertaken to understand the transmission of the vibrations and to find some mitigation methods. A global optimum solution is achieved by implementing active suspensions providing variable suspension parameter features of combined utilization of sensors, controllers, and actuators. In the field of local vehicle measurements, a promising proportional–integral–derivative (PID) type control is utilized [11], where the optimization procedures to enhance the performances of the PID approach while maintaining the required robustness of the controller are used. Zhou et al. [12] proposed a decentralization method to separate the tilting and lateral dynamics based on measurements of lateral acceleration, actuator roll, and suspension deflection. Colombo et al. [13] used a similar approach to [12], in terms of feedforward and feedback combination to test three different control methods, showing that a combination of feedforward, PID, and sky-hook controls could provide the best performance in terms of ride comfort for an acceptable actuation power requirement. However, feedback signals measured on the vehicle can introduce issues in the control application. To counteract this problem, in [14] a robust state estimation based on \mathcal{H}_∞ filtering is introduced to estimate the vehicle body lateral acceleration and true cant deficiency. The \mathcal{H}_∞ filtering was then compared with a standard Kalman filter showing good results. Model-based controls including \mathcal{H}_∞ and linear-quadratic-Gaussian (LQG) can produce better performances but at the same time, they can

suffer from unmodelled behaviors and parameter uncertainties. An interesting application considering a lumped track model is studied in [15], where an LQG control is used effectively to counteract the bounce and pitch motions of the car body. A hybrid control that considers the robust \mathcal{H}_∞ control to overcome the problem of uncertainty on the control parameters is studied in [16]. However, a polytopic representation is one of the most general ways to describe without any conservatism suspension parameter uncertainty. In [17], a state feedback controller is designed based on the parameter-dependent Lyapunov approach and the use of convex optimization algorithms.

The paper is organized as follows: In section 2, a six-degrees-of-freedom (6 DOF) mathematical model for the freight wagon excited with an irregular rail profile is presented. In Section 2, it is shown that the response to the excited oscillations depends on the dynamic properties of the vehicle’s model, driving speed, and rail roughness. The effect of forward velocity and track quality is studied extensively. To ensure complacent riding and a good track holding an active control with \mathcal{H}_∞ state feedback methodology is designed in Section 4. \mathcal{H}_∞ control methodology is chosen since it is used for worst-case scenarios and is going to be adapted to reduce the dominant effect of different speeds on uncertain track surfaces. A convex parameterization of all stabilizing controllers for the polytopic system is defined while the performance specifications are defined in $\mathcal{L}_2/\mathcal{L}_\infty$ norms to obtain the best trade-off. \mathcal{H}_∞ control focuses on obtaining robustness concerning the uncertainty of the system. We used $\mathcal{L}_2/\mathcal{L}_\infty$ norms to maximize the trade-off between the respective/concerned performance indices The simulation results are used to illustrate the effectiveness of the proposed synthesis method in the frequency range of 4-200 Hz. The paper is concluded with concluding remarks in Section 5.

2. The Dynamics of the Freight Wagon

A schematic description of the side view of the Y25 freight wagon is shown in Figure 1 and is going to be used as the basis for the mathematical model of the system, considering both the heave and pitch motions of the car body and bogie masses. Here, the secondary and primary suspensions are represented with coil springs connected in parallel to dry friction dampers and are connected by Lenoir-Link to carry the vertical load to the bogie center. The secondary suspension is aimed to improve the ride quality of the vehicle, while the primary suspension is mainly used for guiding the vehicle. Since only the rigid motion of the vehicle is considered, the primary suspension force F_m is represented by the deflections across the primary springs as

$$F_m = -k_1 x_m - c_1 \dot{x}_m \text{ for } m = 3, \dots, 6.$$

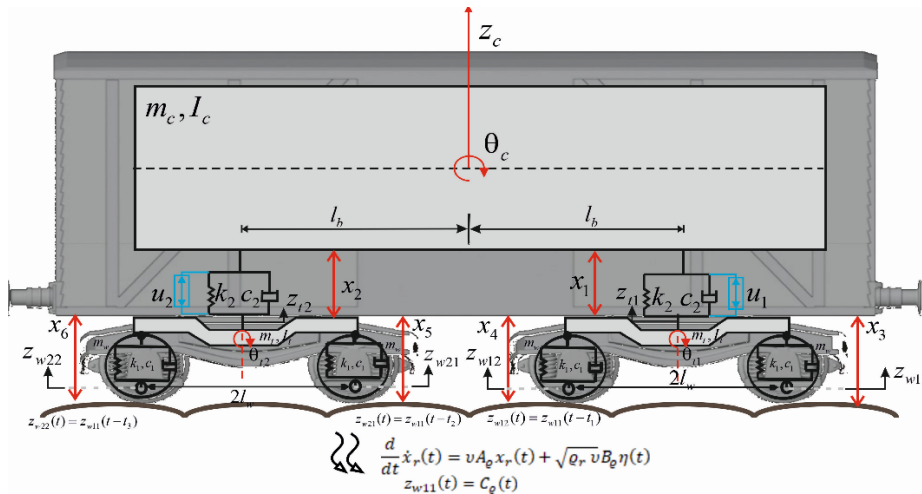


Figure 1. 6 DOF model for a freight wagon with Y25 bogie

The dynamical model can be obtained by using Newton's Laws as in [15-16]. Hence, the state vector $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$, the rail input $z_w = [z_{w11} \ z_{w12} \ z_{w21} \ z_{w22}]^T$, and the control input $u = [u_1 \ u_2]^T$ can be interrelated as in Equation 1,

$$\dot{x} = Ax + B_1 z_w + B_2 u \quad (1)$$

with the state-space triplet (A, B_1, B_2) . The active control is ensured by equipping actuators across the front and rear secondary suspensions to minimize the primary suspension deflections, the car body heave, and pitch accelerations, without causing large suspension deflections at the secondary suspensions. Then, the regulated output vectors $z_\infty = [F_m \ \ddot{z}_c \ \ddot{\theta}_c]^T$ and $z_2 = [x_1 \ x_2]^T$ can be written in terms of the state-space parameters, respectively as follows:

$$z_\infty = C_\infty x + D_\infty z_w + D_\infty u. \quad (2)$$

$$z_2 = C_2 x. \quad (3)$$

The exploited notation used in the figure is listed in Table 1.

Table 1. Vehicle parameters [4]

| Symbol | Description | Value |
|--------|-------------------------------------|--------------------------|
| m_c | Car body mass | 30,078 kg |
| m_t | Bogie mass | 1036 kg |
| m_w | Wheelset mass | 712.5 kg |
| c_1 | Primary damping coefficient | 2000 Ns/m |
| k_1 | Primary spring stiffness | 681,000 kN/m |
| c_2 | Secondary damping coefficient | 10,000 Ns/m |
| k_2 | Secondary spring stiffness | 25,000 kN/m |
| I_c | Car body pitch moment of inertia | 708,850 kgm ² |
| I_t | Bogie frame pitch moment of inertia | 550 kgm ² |
| l_b | Half the distance of bogie centers | 7.1 m |
| l_w | Half of the bogie wheelbase | 0.9 m |
| r_w | The rolling radius of the wheel | 0.46 m |

The vertical vehicle response z_∞ , as can be seen from Equation 2, is primarily a function of vehicle suspension and speed, but is ultimately caused by fluctuations in the rail surface. Accurate vehicle response simulation or an analytical approach to the prediction of ride motions requires the mathematical model of the vehicle to be excited by the irregular rail profile. Traveling on the longitudinal distance $x = vt$ with a constant speed v and no rail jumps happening, will induce random vibrations due to the rail geometry and its surface unevenness. Let's consider the rail profile as a realization of a homogeneous and isotropic random process. Thus, a single autocorrelation function evaluated from any longitudinal track and a single power spectral density function will provide a surface description sufficient for multi-track vehicle response analysis.

Let, $\tilde{z}_{w11}(t) = z_{w11}(vt)$ and define the autocorrelation functions $\mathcal{R}_{\tilde{z}_{w11}}(t)$ and $\mathcal{R}_{z_{w11}}(t)$ with the expected operator $\mathcal{E}\{\dots\}$,

$$\mathcal{R}_{\tilde{z}_{w11}}(t) = \mathcal{E}\{\tilde{z}_{w11}(t)\tilde{z}_{w11}^T(0)\} = \mathcal{R}_{z_{w11}}(vt), \quad (4)$$

and the power spectral density $\mathcal{S}_{\tilde{z}_{w11}}(\omega)$ as the Fourier transform

$$\mathcal{S}_{\tilde{z}_{w11}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{R}_{\tilde{z}_{w11}}(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{R}_{z_{w11}}(vt) e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

Let's make a change of variable $x = vt$ in Equation 5, then

$$\mathcal{S}_{\tilde{z}_{w11}}(\omega) = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{R}_{z_{w11}}(x) e^{-j\frac{\omega}{v}x} dx. \quad (6)$$

Equation 6 implies that the power spectral density $\mathcal{S}_{z_{w11}}(\Omega)$, where the spatial frequency $\Omega = \frac{\omega}{v}$ has a unit radian per meter is equal to

$$\mathcal{S}_{z_{w11}}(\Omega) = v \mathcal{S}_{\tilde{z}_{w11}}(\omega)$$

for ω in radians per second. By using the Wiener-Hopf equation $\mathcal{S}_{z_{w11}}(\Omega)$ can be expressed as an output spectrum of a linear time-invariant filter with a transfer function $G_{z_{w11}}(j\Omega)$, driven by a unit intensity white noise as,

$$\mathcal{S}_{z_{w11}}(\Omega) = G_{z_{w11}}(j\Omega) G_{z_{w11}}(-j\Omega)^T. \quad (7)$$

The rational power spectral functions are generously used by Federal Railroad Administration (FRA) to standardize the rail track profiles for varying roughness ρ_r , and allowable speed limits. A list is provided in Table 2 where the track quality is classified from the worst quality with Class I, to the perfectly smooth one with Class VI [18]. To shape the frequency content of the power spectral density functions given by FRA a linear filter approach defined with Equation 7 will be used. Thus, the rational function that models the rail roughness will be the output of a filter $G_{z_{w11}}(j\Omega)$ with the state-space equations,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \zeta_r(x) &= A_\rho \zeta_r(x) + \sqrt{\rho_r} B_\rho \eta(x), \\ z_{w11}(x) &= C_\rho \zeta_r(x), \end{aligned} \quad (8)$$

excited by white noise $\eta(x)$ of unit intensity.

Table 2. Vehicle speed limits [18]

| Track quality class | ρ_r ($10^{-6}m^{-1}$) | Vehicle speed limit (km/h) |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Class-I | 0.4868 | 16 |
| Class-II | 0.3387 | 40 |
| Class-III | 0.2328 | 64 |
| Class-IV | 0.1566 | 96 |
| Class-V | 0.1058 | 129 |
| Class-VI | 0.07197 | -- |

The rear wheels $z_{w12}(t), \dots, z_{w22}(t)$ will experience the same rail roughness as $z_{w11}(t)$ but with time delays t_1, t_2 , and t_3 , respectively. For control purposes, the time delays may be represented by rational (Pade) approximations. In this study, a second-order Pade approximation denoted by $\Delta(s)$ is sufficiently accurate. Then,

$$z_w = [z_{w11} \ \Delta \ z_{w11}]^T.$$

By using Equations 1–2, 6–8 the auto-correlation function of $z_{\infty}(t)$ can be written as

$$\mathcal{R}_{z_{\infty}}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} T_{z_{\infty}z_w}(j\omega) \begin{bmatrix} G_{\rho} \\ \Delta G_{\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{\rho} \\ \Delta G_{\rho} \end{bmatrix}^* T_{z_{\infty}z_w}^*(j\omega) d\omega, \quad (9)$$

where $T_{z_{\infty}z_w}$ denotes the transfer matrix from z_w to $z_{\infty}(t)$, and

$$G_{\rho} = C_{\rho}(j\omega - vA_{\rho})^{-1} \sqrt{\rho_r v} B_{\rho}, \quad (10)$$

teaming up to construct the augmented ‘vehicle-track’ model, from a single input $\eta(t) \mapsto z_{\infty}(t)$:

$$T_{z_{\infty}\eta} = T_{z_{\infty}z_w}(j\omega) \begin{bmatrix} G_{\rho} \\ \Delta G_{\rho} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

The square root of the elements in the diagonal of $\mathcal{R}_{z_{\infty}}(0)$ is called the root-mean-square (RMS) value and is used as a measure of performance indicators of the vehicle. Three applicable concepts concerning ride comfort, vehicle speed, and track quality are going to be discussed in the next section:

- (i) Improve passenger performance indicators at current speed and track quality;
- (ii) Enhance the speed at maintained performance indicators with no demand on track quality;
- (iii) Allow lower track quality without compromising the performance indicators and speed.

3. The Effect of the Wagon Speed and Track Quality

In the vehicle context, the accelerations serve as indicators of ride comfort, wheel forces as a measure of rail holding, and suspension travels as indicators of vehicle handling. The RMS values of these performance indicators are directly influenced by the forward speed as derived in Equation 10, so their evaluations on various track qualities should be studied. The wagon is tested on profiles in Table 2, at speeds of 0–150 km/h and the results are presented in Figures 2–4.

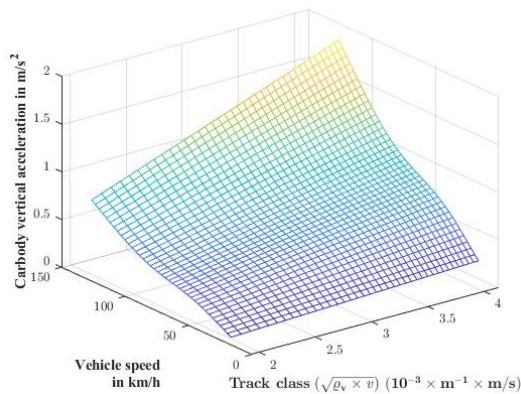


Figure 2a. Effect of vehicle speed and track quality on car body vert. acc.

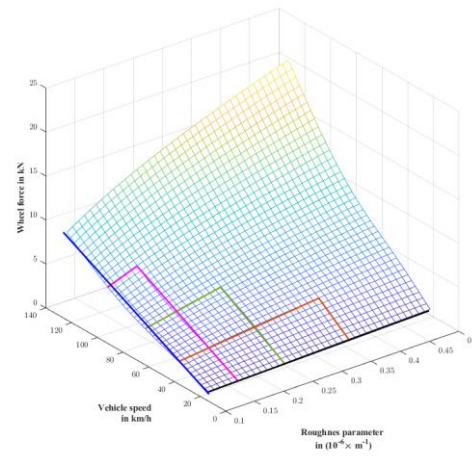


Figure 2b. Effect of vehicle speed and track quality on front wheel-forces

Figures 2a-2b show the trend of decreasing comfort (larger RMS vertical acceleration) with increasing speed, and how the ride comfort changes if a track of given roughness is traversed with different speeds. The levels of comfortable riding can easily be assessed, or how much can the

suspension travels or wheel forces vary so that the ride comfort is still within, for example, 5% of its optimal value can easily be deduced from the figures. In Figure 2b the ride-limiting speeds on different track qualities are shown with horizontal lines while the possible speed regions the vehicle can safely traverse without violating the ride comfort are marked with vertical lines of the corresponding region. For safer driving, the wheel forces should stay inside those regions, since the figures indicate that at higher speeds or on uneven tracks than those outside of the regions, the vehicle may experience severe excitations, which in turn may result in instabilities or the derailment of the wagon. Meanwhile, by inspecting Figures 2-4 together, we can see that on smoother profiles, Class IV-VI for example, the suspension system will be exposed to less damping and can go soft if stayed within the allowable regions. Otherwise, a trend towards increasing stiffness may be observable, since more wheel movements will need increased suspension travel to prevent hitting a bump and rebound stops. From Figure 3 we can observe that when the wagon travels over a track consisting of different roughness sections with a speed setting for a particular one (going in the X direction), a challenging effect on the wheel forces ‘more than two times’ may occur, forcing the ride comfort along with to disrupt as shown in Figure 2a.

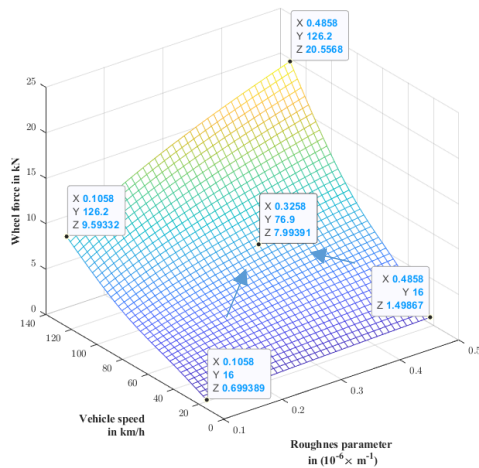


Figure 3. Effect of vehicle speed and track quality on rear wheel-forces

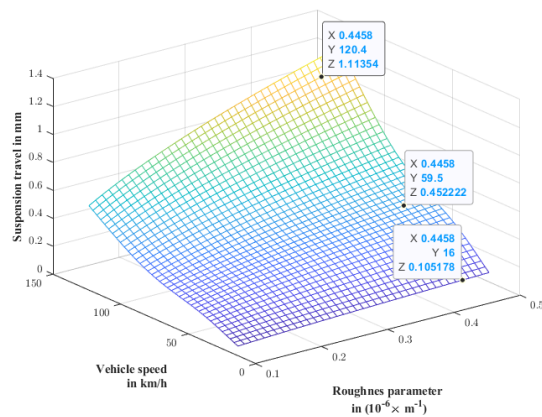


Figure 4. Effect of vehicle speed and track quality on susp. def.

If the vehicle traverses a particular rail profile with constantly increasing speed (going in the Y direction), there will be a firm increment in the wheel forces though not as harsh as in the previous one. Finally, if the wagon travels on constantly smoothing or worsening track sections with increasing speed (going in the arrow direction), the rail holding will be drastic in the latter case. Though an uninterrupted wheel-rail contact may still be ensured, the dynamic wheel load will challenge the static one. This may lead to unreliable circumstances or may cause higher ground vibrations if the freight wagon is driven over a common rail line since the wheel forces for a freight wagon are much larger than the passenger trains'. Let's take it further and investigate the instance if the vehicle traverses a particular rail profile at a prespecified speed with a suspension setting optimized for a different speed (going in the Y direction) as in Figure 4. It is shown that the suspension travel that should be kept below a maximum allowable level will increase sharply, bringing a potential for structural damage and a dramatic deterioration of ride comfort. The vibrations evidently get worse on Class V. Though speed tuning during traveling might be possible by constantly alternating between acceleration, deceleration, constant speed, and stop, the track quality may instantaneously change due to geographical unevenness or degenerated surfaces. So, precise and reasonable speed profiles as in Figures 2-4, obeying the equation of motion concerning the physical constraints of the wagon and the railway geometries, are strongly suggested to be generated from the start station to the end station. However, remains two questions that have to be addressed when determining the optimal “speed-roughness” settings.

- To what extent do the optimal settings vary for a track of given roughness if traversed at different speeds and what levels of ride comfort can be achieved in these cases?’
- If the wagon travels over tracks of different roughness at a specified speed, is there a significant difference in the performance indicators on the same road conditions?’

The next section will seek out for answers to these questions by stepping in from performance analysis of passive suspensions to controller synthesis.

4. \mathcal{H}_∞ Controller Design

The speed of the wagon and the track quality depend on many factors and vary during traveling. In this subsection, assuming that v and q_r take values in some prescribed intervals $[\alpha_i, \beta_i]$, we will design a multi-objective controller with guaranteed performance in this interval. Let $T_{z_\infty \eta}$ in Equation 11 be represented by the following linear time-invariant state-space realization:

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ z_\infty(t) \\ z_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{A} & \hat{B}_1 & \hat{B}_2 \\ \hat{C}_\infty & \hat{D}_{\infty 1} & \hat{D}_{\infty 2} \\ \hat{C}_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}(t) \\ \eta(t) \\ u(t) \end{pmatrix} \quad (12)$$

Polytopic representation is one of the most general ways to describe without any conservatism the physical parameter uncertainty and the matrices \hat{A} and \hat{B}_1 can be separated into,

$$\hat{A} = \hat{A}_0 + q_1 \hat{A}_1 + q_2 \hat{A}_2 \quad \text{and} \quad \hat{B}_1 = \hat{B}_{10} + q_1 \hat{B}_{11} + q_2 \hat{B}_{12},$$

where $(\hat{A}_0, [\hat{B}_{10} \ \hat{B}_{20}], [\hat{C}_\infty \ \hat{C}_2]^T, [\hat{D}_{\infty 1} \ \hat{D}_{\infty 2}; 0 \ 0])$, $(\hat{A}_1, [\hat{B}_{11} \ 0], [0 \ 0]^T, [0 \ 0; 0 \ 0])$, $(\hat{A}_2, [\hat{B}_{20} \ 0], [0 \ 0]^T, [0 \ 0; 0 \ 0])$ are the state-space realizations of the first, second and third vertex of the polytope and $q_1 = \sqrt{q_r v}$, $q_2 = v$. Then, the objective is to design a state-feedback controller shown in Figure 5,

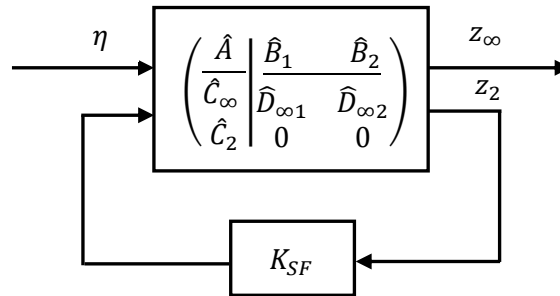


Figure 5. \mathcal{H}_∞ control scheme

by

$$u = K_{SF} x,$$

which provides internal stability of the resulting closed-loop system and minimizes the \mathcal{L}_∞ norm for $\mathfrak{S} > 0$,

$$\begin{aligned} \min_{K_{SF} \in RH_\infty} \quad & \|\mathfrak{S} T_{z_\infty \eta}\|_\infty \\ \text{s. t.} \quad & \|T_{z_2 \eta}\|_2 < \gamma, \quad \gamma > 0, \end{aligned} \quad (13)$$

subject to a permissible travel range of suspensions γ .

Here, RH_∞ denotes the set of real-rational transfer functions which are stable and proper and the weight \mathfrak{S} regulates the trade-off between the vertical acceleration–primary suspension deflection. By the scaling of \mathfrak{S} and γ it is possible to pursue the progress of the solution for certain benchmark values or to force it to satisfy the design requirements. Linear matrix inequalities will be employed to solve the problem in Equation 13 and MATLAB’s LMI Control Toolbox [19] will be used to implement the optimization algorithm. Since knowing the exact value of the roughness parameter increases the controller performance, let’s fix $q_r = 0.1058 \times 10^{-6}$ and confine the speed a freight wagon can ever make on track Class V, between its upper and lower limits. Thus, $q_1 \in [0.0015, 0.0020]$, $q_2 \in [4.44, 35.83]$ m/s can be chosen for the polytopic uncertainty and $\gamma = 8.32 \times 10^{-4}$ m is selected as it is the \mathcal{L}_2 norm of passive suspension deflections. The results are indicated in Figures 6-8 for the car body acceleration, and primary and secondary suspension deflections, respectively. The vertical ride comfort improvements are achieved by incorporating the \mathcal{H}_∞ controller into the vehicle while keeping the suspension deflections at a bay. It is seen that the trend of decreasing comfort with increasing speed as earlier pointed out in Figures 2-4, is very well

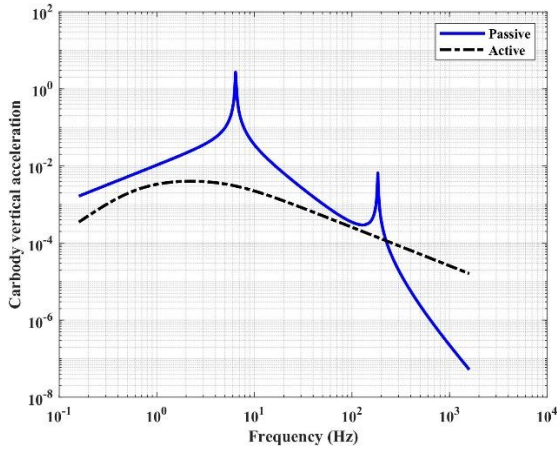


Figure 6. Car body ver. acc. frequency response for track class V

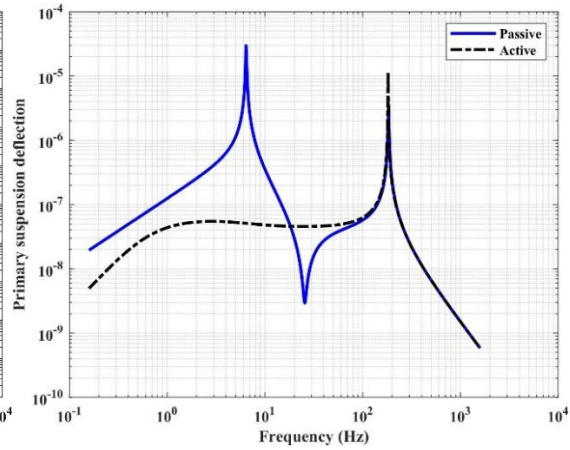


Figure 7. Primary susp. def. frequency response for track class V

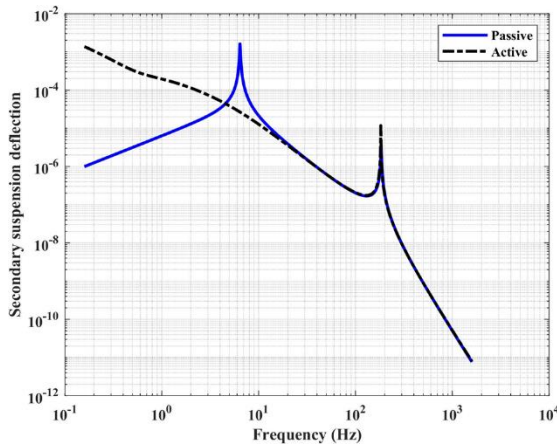


Figure 8. Secondary susp. def. frequency response for track class V

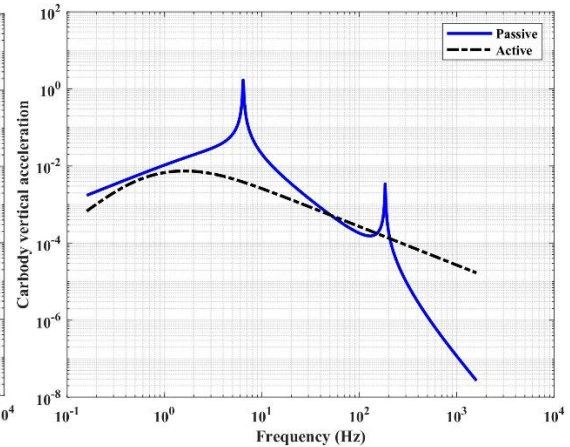


Figure 9. Car body ver. acc. frequency response for track class III

tolerated with this \mathcal{H}_∞ controller. Additionally, all improvements are attained at the low-frequency range which is more sensitive to bending deformations of the freight wagon, showing almost 44% reduction of vertical acceleration compared to the passive one. Let’s assess the performance of this same controller on a worse track quality, for example, Class III. Figure 9 shows that the vibration on ride comfort is still successfully suppressed with a controller which is

designed for smoother riding conditions, and the same conclusion can be extended to all performance indicators but the figures will be omitted for the sake of brevity.

The investigation concerning the ride comfort that could be achieved if the active suspension is designed for various tracks traversed at a specified speed can be expanded by setting $q_1 \in [0.0012, 0.0022]$, and $q_2 = 13.88$. By utilizing the \mathcal{H}_∞ controller at a speed of 50 km/h, the wagon will have the performance evaluations at Figures 10-12. Studying these plots affirms that lesser body movements will result in smaller car body vertical acceleration, but more wheel movements, which will need increased suspension deflection to prevent hitting irregularities on the track. Even though the track quality decreases, severe wheel movements will not occur, since the controller will provide enough damping. Good handling requires a stiff suspension, whereas a soft suspension provides a better ride comfort. This remarkable compromised solution presented in the figures is only possible because of the polytopic formulation of the optimization problem in Equation 13. The last part of the investigation concerned the ride comfort that could be achieved if the optimized controller setting obtained for various tracks is used at this particular profile (Class III) of an allowable speed limit of 50 km/h. Figure 13 shows that the controller is quite capable of minimizing the vertical accelerations while maintaining good vehicle handling and rail holding qualities, skipping the plots of latter for space considerations. The results are verified with time-domain simulations in Figure 14. The controller's performance is very impressive both frequency and time domain.

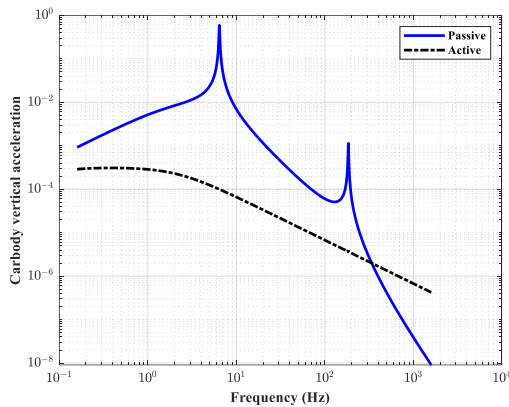


Figure 10. Car body ver. acc. frequency response at 50 km/h speed

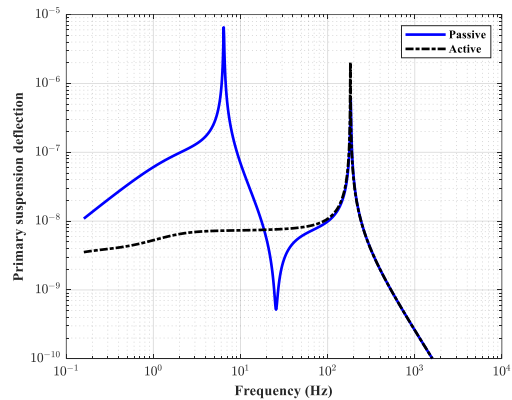


Figure 11. Primary susp. frequency response at 50 km/h speed

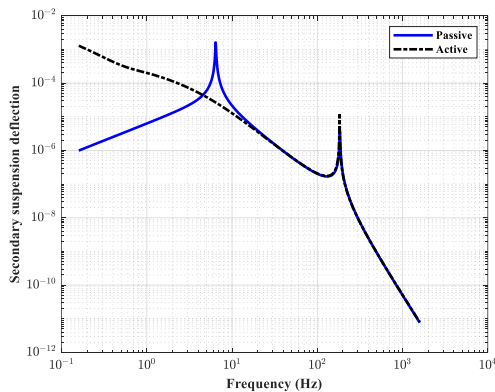


Figure 12. Secondary susp. frequency response at 50 km/h speed

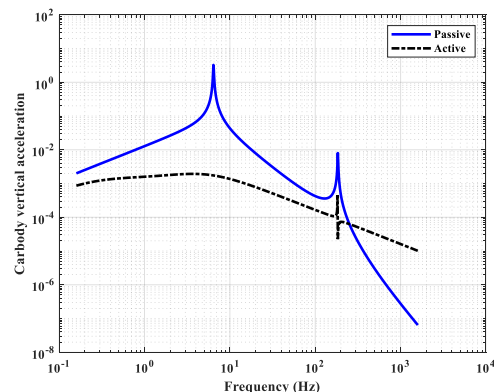


Figure 13. Car body ver. acc. frequency response on track class III

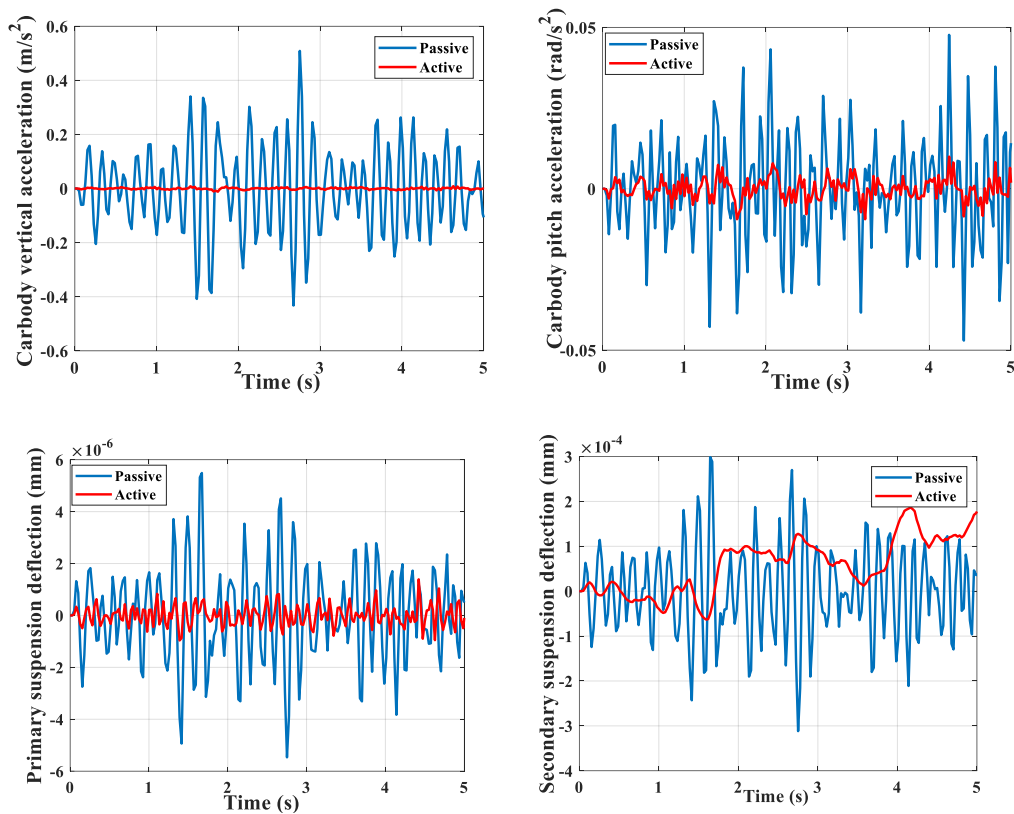


Figure 14. Time-domain responses on track class III at 50km/h

4. Conclusion

In this paper, a half-car model of a freight wagon in combination with linear-filter modelling of the track roughness has been used to investigate the influence of the speed and track quality on the primary suspension travels, car body accelerations, and suspension deflections. It is shown that the dynamic forces induced by the interaction between the wheel and railroad, lead to a deterioration along the tracks and consequently produce ride discomfort and poor rail holding. Since, the track roughness is a determinant factor for riding comfort and railroad infrastructure, the classification method proposed by FRA that standardizes the railroad track quality has been used for evaluating the overall performance of vehicle track interaction. Though the rational power spectral density functions defined in the report have been easily incorporated into the freight wagon dynamics, the simulation studies have shown that the assessment of the vehicle performance is highly dependent on the track quality and vehicle speed. The findings of this work draw attention to the maintenance of the track whose main purpose is to provide a stable, safe platform for the freight wagons to operate at various speeds and are applicable to any railway network. Reducing the maintenance cost and enhancing the transport quality can be achieved by designing active controllers that improve the running behaviour of the vehicle. In this work, the ride comfort performance is optimized by designing an active controller for the half-car wagon model. The robust \mathcal{H}_∞ control was synthesized by solving a constrained optimization problem. The analytical results were given for the aspects of frequency-domain, time-domain and polytopic uncertainties. It is further shown that the objective function to be minimized can correspondingly be modified to improve the ride quality on different sets of speeds and track conditions. The numerical simulations performed in MATLAB software show that the proposed control algorithm in this study is decent and effective. In this manner, this study provides a helpful reference for the control of freight wagons by using other control algorithms. Although not reported in this paper, the robust controller synthesized for a suspension system with polytopic uncertainties can offer

an advantage by also attenuating the flexible modes of the car body vibrations. When the rail vehicle is traveling on changing track conditions, especially at high speeds, it is known that the first bending mode frequently becomes a problem. This mode has a frequency around 8-12 Hz, and in order to improve the riding quality, it needs to be suppressed. The numerical studies in this study showed that the polytopic controller designed is highly capable of handling the vibrations happening in this frequency region. The topic warrants further studies, but this work is going to make a foundation for the elaboration techniques to make stronger theoretical connections. Furthermore, the recent car body shells are built to be more lightweight, conducting some lower modes of the flexural vibrations to occur in the lower frequency regions where they can overlap with rigid modes and become more prominent. At the same time, the proposed design here can offer a solution to suppress both the flexible and rigid modes simultaneously and effectively by the active suspension design. The study of achievable performance in the lateral direction for the wagon active suspensions remains another future work in a multi-input/multi-output framework.

References

- [1] A. Orvnäs, S. Stichel, and R. Persson, "Ride comfort improvements in a high-speed train with active secondary suspension," *J. Mech. Syst. Transp. Logist. (JSME)*, vol. 3, no. 1, pp. 206–215, 2010
- [2] X. Lei, *High speed railway track dynamics: Models, algorithms and applications*. Singapore: Springer, 2017
- [3] G. Kouroussis, D.P. Connolly and O. Verlinden, "Railway induced ground vibrations: A review of vehicle effects," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 2, no. 2, pp. 69-110, 2014
- [4] E. Bernal, M. Spiriyagin, and C. Cole, "Wheel flat detectability for Y25 railway freight wagon using vehicle component acceleration signals," *Vehicle System Dynamics*, vol. 58, no. 12, pp. 1893-1913, 2020
- [5] M. Buonsanti and G. Leonardi, "Dynamic modelling of freight wagon with modified bogies," *European Journal of Scientific Research*, vol. 86, pp. 274- 282, 2012
- [6] P. A. Jönsson, "Dynamic vehicle-track interaction of European standard freight wagons with link suspension" Ph.D. dissertation, Dept. Aeron. and Veh. Eng., Royal Institute of Technology, Stockholm, 2007
- [7] C. Jones and J. Block, "Prediction of ground vibration from freight trains," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 193, no. 1, pp. 205–213, 1996
- [8] *Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1Hz-80Hz)*, BS 6472-1, British Standards Institution, 2008
- [9] *Mechanical vibration-ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1: General guidance*, BS ISO 14837-1, British Standards Institution, 2005
- [10] M. Buonsanti, and G. Leonardi, (2012). "Dynamic modelling of freight wagon with modified bogies," *Eurpoean Journal of Scientific Research*, vol. 86, pp. 274–282, 2012
- [11] F. Hassan, A.C. Zolotas, and R.M. Margetts, "Optimised PID control for tilting trains," *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 25–41, 2017
- [12] R. Zhou, A Zolotas, and R. Goodall R, "Integrated tilt with active lateral secondary suspension control for high speed railway vehicles," *Mechatronics*, vol. 21, no. 6, pp. 1108–1122, 2011
- [13] E.F. Colombo, E. Di Gialleonardo, A. Facchinetti and S. Bruni, "Active carbody roll control in railway vehicles using hydraulic actuation," *Control Engineering Practice*, vol. 31, pp. 24–34, 2014
- [14] R. Zhou, A. Zolotas, and R. Goodall, "Robust system state estimation for active suspension control in high-speed tilting trains," *Vehicle System Dynamics*, vol. 52, pp. 355–369, 2014
- [15] A. Soyiç Leblebici and S. Türkay, "Track modelling and control of a railway vehicle," *7th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, 2016, pp. 274–281
- [16] A. Soyiç Leblebici and S. Türkay "Hybrid semi-active controller design for a high speed railway vehicle," *Turkish National Conference on Automatic Control (TOK2018)*, Kayseri, Turkey, 2018, pp. 528–533
- [17] P. Apkarian, H. D. Tuan, and J. Bernussou, "Continuous-time analysis, eigenstructure assignment, and H_2 synthesis with enhanced linear matrix inequalities (LMI) characterizations," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 46, no. 12, pp. 1941-1946, 2001

- [18] A. Hamid, K. Rasmussen, M. Baluja, and T. Yang, *Analytical Descriptions of Track Geometry Variations Volume I*, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, 1983
- [19] P. Gahinet, A. Nemirovski, A. Laub and M. Chilali, *LMI control toolbox for use with MATLAB*. The Mathworks Inc., 1995

Resume



Aslı SOYIÇ LEBLEBİCİ

Aslı Soyıç Leblebici received her B.Sc. degree from Anadolu University, Eskisehir, Turkey, in 2007. She received her M.Sc. degree from Anadolu University, Eskisehir, Turkey, in 2009. She is currently working as lecturer at Electronics and Automation Department of Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey. Her research interests include mechatronic systems, railway vehicle dynamics, optimization and control systems.

E-mail: aleblebici@ogu.edu.tr



Semiha TÜRKAY

Semiha Türkay received her PhD degree in Electrical and Electronics Engineering at the Anadolu University, Turkey. She received a research scholarship award in 2008 from the Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) and visited Munich Technical University as a PhD researcher. She is currently Assistant Professor at the Department of Electrical and Electronics Engineering, Anadolu University. Her research interests include random vibrations, estimation, system identification and active suspension control for automotive and railway vehicles.

E-mail: semihaturkay@eskisehir.edu.tr

Ethics Statement:

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