



Şehir İçerisinde Açılan Tünellerde Portal Şev Stabilitesi ile Tünel Kazı İlişkisine Bir Örnek (T7 Tüneli, Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren Projesi (Kayaş-Elmadağ Kesimi))

Ebu Bekir AYGAR^{ID}

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

eaygar@gmail.com

(Alınış/Received: 28.01.2022, Kabul/Accepted: 08.03.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Tünellerde portal kesimleri her zaman kritik mühendislik yapıları içerisinde olmuştur. Portal ve tünellerin etkileşimi hem portal tasarımını hem de tünel tasarımını etkilemektedir. Portal şevlerinde olası bir yenilmenin etkisi doğrudan tünelleri etkileyeceğinden tüneldeki ilerlemeleri de olumsuz etkilemekte ve zaman zaman durdurmaktadır. Uzun tünellerde kazı ve destek işlemlerinin yıllarca süreceği göz önüne alındığında portal şevlerinin duraylılığı büyük önem kazanmaktadır. Kaya birimlerinde açılan tünellerde süreksizliklere bağlı olarak gelişecek yenilmeler ile zayıf zeminlerde portal şevlerinde toptan göçme olarak meydana gelen yenilmelerin tahkiki, uzun döneme göre yapılmalıdır. Ayrıca yüzeyle ve portal çevresinde yerleşim alanlarının olduğu durumda ise daha kritik bir durum meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren Projesi (Kayaş-Elmadağ kesimi) T7 tüneli özelinde stabilite problemleri incelenmiştir. Tünel kazısı sırasında meydana gelen deformasyonların etkisi ile tünel stabilitesini yitirmiş ve tünel kazısı durdurulmuştur. Tünel destekleri yenilerek portal stabilitesini de olumsuz etkilemiştir. Ayrıca tünel giriş portal kesiminde yerleşimlerin olması bu durumun önemini daha da artırmıştır. Bu amaçla portal ve tünel destekleri için nümerik analizler yapılarak mevcut durumun stabilitesi değerlendirilmiş sonrasında ise yeni destek sistemleri ile portal kesimi için metodoloji önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Portal stabilitesi, Hızlı tren projesi, Tünel destek sistemi

An Example of the Relationship Between Portal Slope Stability and Tunnel Excavation in the Urban Area-(T7 Tunnel, Ankara-Sivas High Speed Train Project (Kayaş-Elmadağ Section))

Abstract: Portal sections in tunnels have always been within critical engineering structures. The interaction of the portal and tunnels affects both the portal design and the tunnel design. Since the effect of a possible failure in the portal slopes directly affects the tunnels, it also negatively affects the progress in the tunnel and stops it sometimes. Considering that the excavation and support work in long tunnels may take years, the stability of the portal slopes gains great importance. The failures that will develop due to discontinuities in the tunnels excavated in the rock units and the failures that occur as a wholesale collapse in the portal slopes in weak soils should be evaluated according to the long term. In addition, a more critical situation occurs when there are residential areas around the portal. Within the scope of this study, this situation is investigated specifically for the T7 tunnel constructed within the scope of Ankara-Sivas High Speed Train Project, Kayaş-Elmadağ section. With the effect of the deformations that occurred during the tunnel excavation, the tunnel lost its stability and the tunnel excavation was stopped. The tunnel supports were renewed, negatively affecting the stability of the portal. In addition, the fact that there is a settlement in the tunnel entrance portal section has increased the importance of this situation. For this purpose, numerical analyzes were performed for the portal and tunnel supports, and the stability of the current situation was evaluated, and then a methodology was proposed for the portal section with new support systems.

Keywords: Portal stability, High speed train project, Tunnel support system.

Atıf için/Cite as: E. B. Aygar , “Şehir içerisinde açılan tünellerde portal şev stabilitesi ile tünel kazı ilişkisine bir örnek (T7 tüneli, Ankara-Sivas yüksek hızlı tren projesi (Kayaş-Elmadağ kesimi)),” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 1-13, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1064319

1. Giriş

Ülkemizde son dönemlerde gelişen alt yapı hizmetlerine bağlı olarak yüksek hızlı demiryolu projelerinde açılan tünel sayısı giderek artmaktadır. Açılan tüneller Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) prensipleri ile projelendirilmiştir (Rabcewicz, [1], [2], [3]). Tek tüp çift hat olarak projelendirilen tünellerde kazı yöntemi kesitin büyük olması sebebi ile üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde yapılmaktadır. Tünellerin tamamlanmış halinde yüksekliği 8 m genişliği ise 12.50 m olmaktadır. Yapımı inşa halinde olan Ankara-İstanbul, Ankara-Sivas, Ankara-İzmir ve Bursa Yenişehir hatlarında tünel kazı çalışmaları devam etmektedir. Tünel kazıları sırasında karşılaşılan jeolojik-jeoteknik koşullara göre yer yer sorunlar ile karşılaşmakta olup destek sistemleri revize edilmektedir.

Tünel kazıları boyunca portal imalatı sırasında karşılaşılan sorunlar hem portal şevlerinde ciddi duraysızlık sorunlarına yol açmış hem de tünel kazısını olumsuz etkileyerek gecikmelere sebebiyet vermiştir. Şehir içinde açılan tünellerde portal kesiminde binaların bulunması portal şevlerini daha da kritik bir duruma getirmiştir. Zira portal şevlerinde karşılaşılan duraysızlık problemleri yüzeydeki binaları olumsuz etkileyecektir. Bu sebeple portal kazılarının sorunsuz bir şekilde yapılması şehir içi tünelciliği açısından çok daha önemlidir.

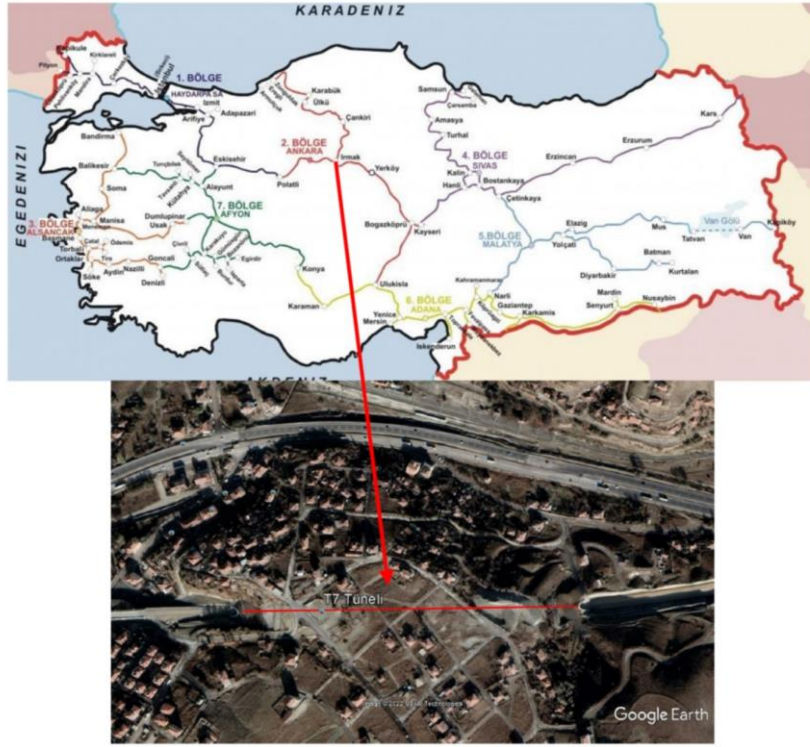
Portal şevlerinde karşılaşılan sorunlar incelendiğinde genelde uzun dönemde portal şevlerinin stabilitesini yitirmesi sonucu meydana gelen yenilmeler ile tünel kazısı sırasında meydana gelen deformasyonların sonucu portal şevlerini olumsuz etkilemesidir ([4], [5], [6], [7], [8], [9]).Zira kısa dönemde portal şevleri stabilitesi sağlansa da tünel uzunluğuna bağlı olarak değişen inşaat süreleri dikkate alındığında uzun dönemde yenilmelerin meydana gelmesi kaçınılmazdır.

Şevlerin projelendirmesi için belirlenen güvenlik faktörleri kısa dönemde 1.3, uzun dönemde 1.5 ve depremlili durumda ise 1.1 olarak belirlenmiştir ([10]). Ancak portal gibi kritik öneme sahip yapılarda bu kriterlere uyulsa da tünel kazısı sırasında oluşabilecek deformasyonlar ve yenilmeler, uzun dönemde aşırı yağış miktarları portalları olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle portal yapılarında güvenlik faktörünün daha da güvenli tarafta kalınarak çözümlenmesi gerekmektedir. Zira açık kazılarda yapılan şevlerde oluşabilecek yenilmeler çoğu zaman telafi edilirken, portal kesiminde oluşabilecek bu tür yenilmeler ciddi sorunlara yol açmaktadır. Portal alın şevindeki yenilmeler ve kaymalar çoğu zaman tünelin tamamen kapanmasına kadar gitmektedir. Alın şevinde yapılacak şev düzenlemeleri ise, alın şevinin altında tünel yer alması sebebi ile de çok kritik olmakta ve tünele zarar verecek konuma gelmektedir.

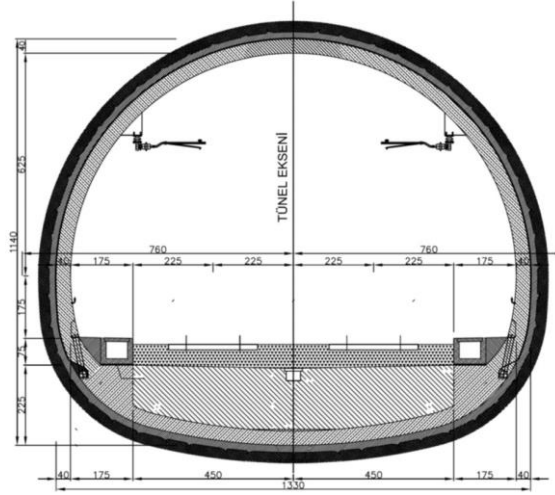
Bu çalışmada, Ankara-Sivas yüksek hızlı tren projesi kapsamında Kayaş-Elmadağ kesiminde açılan T7 tüneline portal ve tünelde yaşanan sorunlar verilerek çözüm önerileri üzerinde durulmaktadır.

2. T7 Tünelinin Genel Özellikleri

T7 tüneli Ankara Sivas Yüksek Hızlı Tren Projesi kapsamında, Km:26+706.00 ile Km:27+145.00 arasında olup, toplam uzunluğu 439 m'dir (Şekil 1). Tünel örtü yüksekliği en fazla 39 m olup sığ tünel özellikleri göstermektedir. Tünel güzergâhının Google Earth görüntüsü ve planı Şekil 1'de verilmektedir. Tek tüp olarak projelendirilen T7 tünelinin yüksekliği 8.0 m olup, tünel çapı ise 12.5 m'dir (Şekil 2). T7 tüneli Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine göre projelendirilmiştir ([1], [2], [3]; [11], [12]).



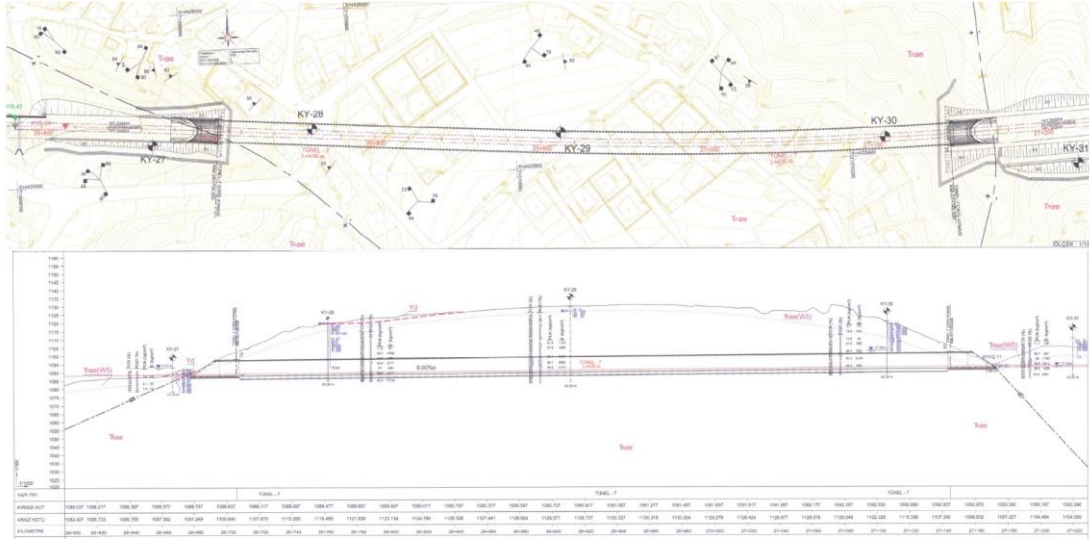
Şekil 1. T7 Tüneli lokasyon haritası ve Google Earth görüntüsü



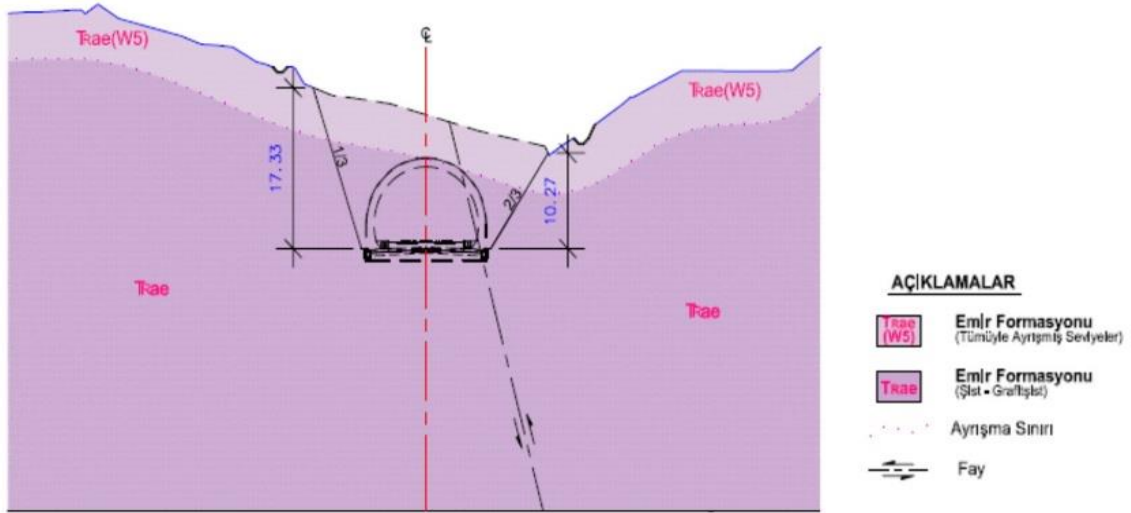
Şekil 2. T7 Tüneli tip kesiti

3. Jeolojik-Jeoteknik Koşullar ve Karşılaşılan Sorunlar

Tünel-7, az sert, yer yer orta sert, zayıf – çok zayıf, çok ayrılmış ve yer yer orta derecede ayrılmış grafitik ve şist birimleri içerisinde açılmıştır. Tünel portal kesimlerinde soruna neden olan yaklaşık 10.00 metre kalınlığa varan üst seviyeleri çok – tümüyle ayrılmış şist birimi içerisindedir ([13]) Tünel tamamen zayıf ve çok zayıf kaya kütlesi içerisinde açılmıştır. Tünel jeolojik planı ve profili Şekil 3’de, Şekil 4’de ise km:26+706 ya aita jeolojik kesit verilmiştir Hesaplanan NGI (Norwegian Geotechnical Institute) kaya kütle sınıflama sistemine ([14], [15], [16]) göre Q değeri 0.018 ile 0.220 arasında hesaplanmış olup ([13]) tünel çok zayıf ve çok fazla zayıf kaya kütlesi içerisinde yer almaktadır. Bieniawski [17], [18], [19] jeomekanik kaya kütle sınıflama sistemine göre ise RMR değerleri 17 ile 29 arasında değişmektedir. RMR₈₉ değerlerine göre tünel zayıf ve çok zayıf kaya kütlesi içerisinde yer almaktadır ([13])



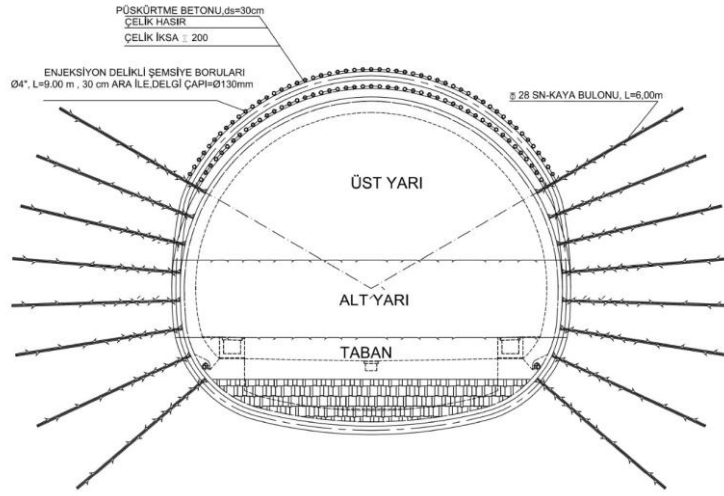
Şekil 3. Tünel 7 jeolojik plan ve profili [13]



Şekil 4. Tünel giriş kesimi jeolojik kesiti, km:26+706[13]

Tünel kazılarına giriş portalından itibaren Km:26+718'e kadar Tip2Ö destek sistemi (Şekil 5) uygulanmış ve sonrasında tünelde karşılaşılan sorunlar neticesinde tünel kazısı durdurulmuştur. Tünel desteklerinde yer yer yenilmeler ve püskürtme beton kaplamasında çatlaklar meydana gelmiştir. Ayrıca tünel aynasında aşırı sökümler ve kaymalar meydana gelmiştir. Tünelde meydana gelen yenilmeler ile portal kesimi Şekil 6'da gösterilmektedir.

Tünel çıkış portalı ise giriş portalına benzer şekilde Km:27+078'e kadar Tip2Ö destek sistemi ile geçilmiştir. Ancak yapılan kazı sırasında hem tünel de hem de yüzeyde stabilite sorunları ile karşılaşmış sonrasında tünel kazısı durdurulmuştur. Bu aşamadan sonra tünelde acilen taban beton kemerlerine başlanılmıştır. Tünel güzergâhı üzerinde yer alan binalar için yapılan optik ölçümler sonucunda duyarlılığını kaybeden evler kamulaştırılmıştır. Buna ek olarak çıkış portalında aç-kapa yapısının yapılarak portal stabilitesinin sağlanmasına karar verilmiştir. Şekil 7'de tünel kesiminde meydana gelen yenilmeler ile yüzeyden çatlakların olduğu bölge gösterilmektedir.



Şekil 5. Tip2Ö destek detayları [13]



Şekil 6. T7 Tüneli giriş portal kesimi ve tünel aynası



Şekil 7. T7 Tüneli Çıkış Portal kesimi tünel aynası ve yüzey çatlaklarının olduğu bölüm

Açıklanan sorunlar neticesinde hem tünel giriş portal kesiminde hem de çıkış portal kesiminde tünel kazıları için destek revizyonlarına ihtiyaç duyulmuştur. Özellikle tünel çıkış kesiminden itibaren yapılan destek sistemlerinde kademeli iksalarda (Şekil 5) 3, 4 ve 5 nolu genişleme iksalarının oturarak 1 ve 2 nolu iksalar ile hemen hemen aynı kotlara geldiği arazide belirlenmiştir. Tünel stabilitesini etkileyen faktörler,

- Tünel güzergâhı üzerinde yerleşim birimi altından geçilmesi,
- Örtü yüksekliğinin en fazla 30 m olması,
- Mevcut kazılar yapılırken yüzeydeki binaların hasar görmesi şeklinde özetlenebilir.

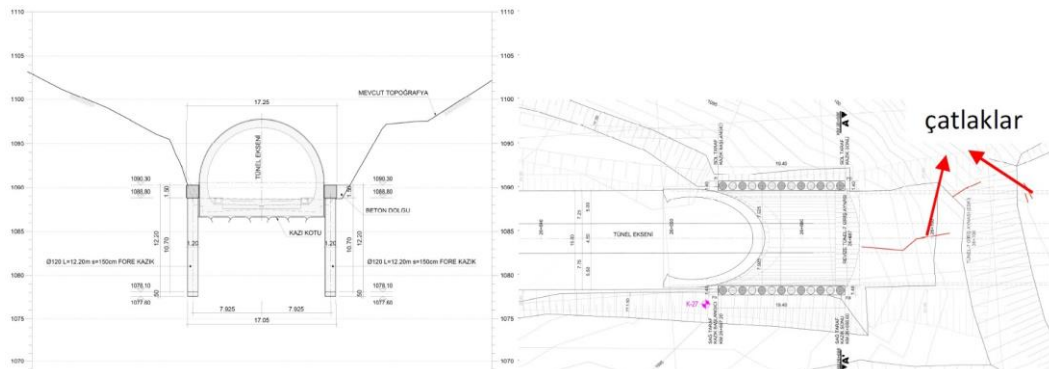
4. Giriş Portal Kesimi Duraysızlık Problemleri

Tünel giriş portal kesimi vadi içerisinde projelendirilmiştir (Şekil 1). Portal kesimini çevreleyen bölgede yerleşim yerleri mevcuttur. Bu bölgede portal kazıları öncesi alın şev boyunca zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Portal yan şevleri 2Y:3D (33⁰) alın şevi ise 1Y:2D (45⁰) olacak şekilde projelendirilerek tünel kazısına başlanılmıştır. Tünel kazısına başlanması ile beraber hem tünel içerisinde deformasyonlar meydana gelmiş (Şekil 8) hem de portal şevlerinde çatlaklar oluşmuştur. Bu noktadan sonra tünel kazısına ara verilerek yüzeyde bulunan evlerin zarar görmemesi için tünel kazısı durdurulmuş ve portal kesiminde aç kapa yapısının yapılmasına geçilmiştir.



Şekil 8. Giriş portal şevi genel görünümü ve oluşan çatlaklar

Tünel kazısının durdurulması sonrasında aç-kapa yapısı projelendirilmiştir. Aç kapa yapısı taban bölümü için mevcut kazı kotundan itibaren 2.1 m daha kazı yapılmasını gerektirmiştir [20]). Bu amaçla yan şevlerin stabilitesini sağlamak amacıyla portal şevlerinin dibine olası kaymaları önlemek amacıyla kazık yapılarak portal şevlerinin stabilitesi sağlanmıştır (Şekil 9). Bu aşamadan sonra aç-kapa yapısı yapılmış ve üzeri dolgu malzemesi ile doldurularak portal stabilitesi tamamen sağlanmıştır (Şekil 10).



Şekil 9. Portal kesimi kazık ve aç kapa yapısı kesiti ve planı [20]



Şekil 10. Portal kesimi aç-kapa yapısının tamamlanmış hali

5. Jeolojik-Jeoteknik Değerlendirmeler

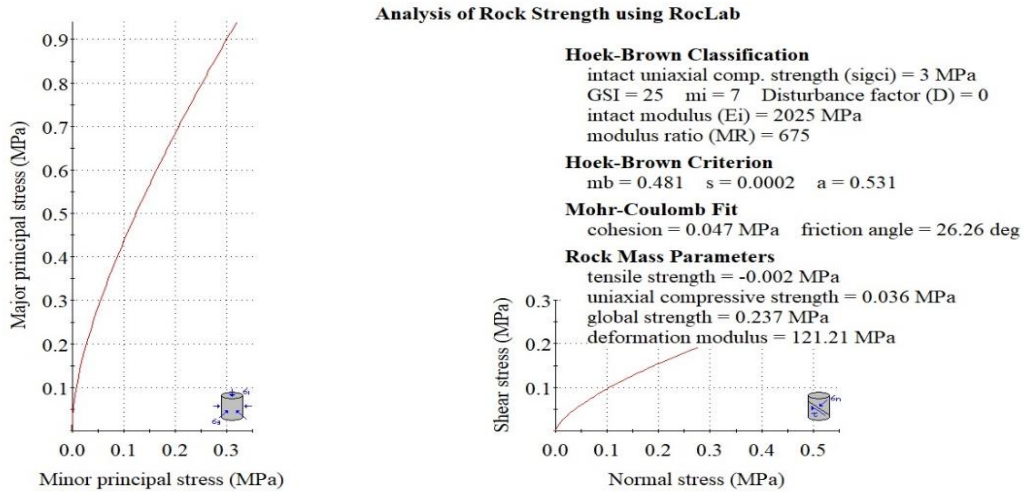
T7 tüneli tamamen şist-grafitik şist birimi içerisinde yer almaktadır. Tünel güzergâhı üzerinde 3 adet sondaj açılmış olup (SK27, SK28 ve SK29) (Şekil 3) açılan bu sondajlarda birim koyu gri renkli, ufalanabilir-az sert-yer yer orta sert, zayıf-çok zayıf-yer yer orta zayıf dayanımlı, orta-çok-yer yer tümüyle ayrılmış olarak tanımlanmaktadır [13]. Yapılan sondajlarda RQD değerler genelde çok düşük yer yer 0 olmaktadır. Sondajlardan elde edilen örneklerden sadece nokta yükleme deneyi ile yapılan SPT'lerden (Standart Penetrasyon Testi) elde edilen örneklerden de zemin deneyleri yapılmıştır [13]. Bu kesim için jeoteknik tasarım parametreleri Hoek ve Brown [21] yenilme kriteri ile tespit edilmiş olup bu amaçla kullanılan değerler, GSI (Jeolojik dayanım indeksi), UCS (Kayaç malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı) ve M_i (Kayaç malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti)'dir. Birimin GSI (Jeolojik Mukavemet İndeksi) değeri, filiş tipi formasyon özellikleri için Marinos e Hoek [21]'in önerdiği abak dikkate alınarak (Şekil 10) belirlenmiştir. Şekil 11'de sunulan abak üzerinde F bölgesinde kaldığı görülen birimin GSI değeri 20 - 30 arasında kalmaktadır. Bu nedenle güvenli tarafta kalınarak tünelin bu kesimi için GSI değeri yaklaşık 25 olarak seçilmiştir (Şekil 10). Yapılan laboratuvar sonuçları ve yüzeysel değerlendirmelere göre birime ait tek eksenli sıkışma dayanım yaklaşık 3 Mpa olarak atanmıştır. Malzeme sabiti m_i 7 olarak öngörülmüştür. Elastisite modülü ise karşılaşılan birimin özellikleri dikkate alınarak atanan m_r değeri ile belirlenmiştir ve 2025 Mpa olarak atanmıştır. Ayrıca kullanılacak kazı tekniğinin mekanik kazı olduğu varsayılarak örselenme faktörü (D) 0 olarak alınmıştır. Kaya kütle parametreleri ise Hoek ve Brown yenilme kriterine göre Roclab [23] programı ile (Şekil 12) belirlenmiştir. T7 tüneline karşılaşılan olan şist birimine ait tasarım parametreleri i Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. T7 tüneli için önerilen jeoteknik parametreler

Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Elastisite modülü	Birim hacim ağırlık	Kohezyon	İçsel sürtünme açısı	Deformasyon modülü
UCS (MPa)	GSI	m_i	E_i (MPa)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	E_m (MPa)
3	25	7	2000	23	47	26	121

GSI FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (Marinos, P and Hoek, E, 2000) From a description of the lithology, structure and surface conditions (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. Locate the position in the box that corresponds to the condition of the discontinuities and estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than giving GSI = 35. Note that the Hoek-Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)		
COMPOSITION AND STRUCTURE		VERY GOOD - Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD - Rough, slightly weathered surfaces	FAIR - Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR - Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments	VERY POOR - Very smooth slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	A. Thick bedded, very blocky sandstone The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.	70	60	A		
	B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone		50	B	C	D
	C. Sandstone and siltstone in similar amounts		40			
	D. Siltstone or silty shale with sandstone layers					
	E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers					
	F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure		30			F
	G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers					G
	H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.					H

Şekil 11. Heterojen kaya kütle için GSI tanımlaması [21]



Şekil 12. Jeoteknik parametreler [23]

6. Sayısal Analizler

Tünelde yapılacak olan destek sistemlerinin belirlenmesi amacıyla Phase2d v8.0[24] programı ile sayısal analizler yapılmıştır. Phase2D programı Toronto Üniversitesince geliştirilen ve kaya kütleleri ile bu kütlelerin destekli davranışlarını modelleyen iki boyutlu bir sonlu elemanlar programıdır. Programda yeraltı kazısı aşamalı olarak modellenilebilmekte, bulon, çelik iksa, hasır çelik ve püskürtme betonu ile destekleme yapılabilmektedir. Ayrıca kazı aşamaları arasında yük dağılımı (load split) ve kaya gevşemeleri de (material softening) modele uygulanabilmektedir [24]. Destek sistemlerinin belirlenmesinde pratiğe ve tecrübelerle dayalı kararlar esas olup, nümerik analizler pratik kararlara bir kılavuz olarak değerlendirilmiştir.

6.1. Kaya kütlesinin modellenmesi

Bilindiği gibi, yeraltı kazılarında, zeminin uygun bir biçimde modellenmesi, belirsizliklerin yoğunluğu ve kompleks oluşu nedeniyle oldukça güçtür. Bu nedenle bütün koşulları içeren detaylı bir modelleme yapmak ne mümkündür ne de böyle bir model oluşturmaya çalışmak yararlıdır. Aşağıdaki koşullarla modeli sadeleştirmek mümkün olabilir:

- Üç boyutlu koşulların iki boyuta indirgenmesi,
- Kesitin eksenden simetrik kabul edilmesi,
- Zeminin basit tariflerle sadeleştirilmesi,
- Tünel ilerleme ve kazı şartlarının sade ve anlaşılır bir şekilde tanımlanması,
- Zeminin homojen ve izotropik kabul edilmesi.

Nümerik analizler elastik-plastik çözüme göre yapılmıştır. T7 tünelinin maksimum örtü tabakası yüksekliği 30 m civarındadır. σ_h/σ_v oranını hesaplamak için Jacky [25] tarafından verilen $k=1-\sin\phi$ denklemi kullanılacaktır. ϕ değeri (içsel sürtünme açısı) 26° olarak alınmıştır.

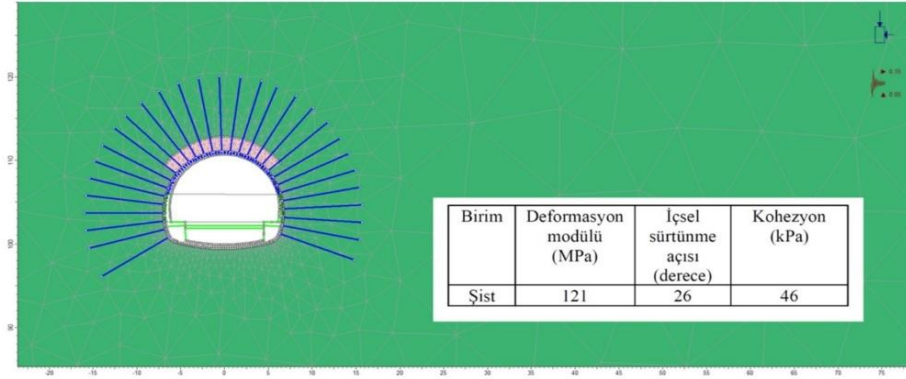
$$k=1-\sin\phi=1-\sin26^\circ=0.56 \quad (1)$$

Modelleme aşamaları yapılırken, tünel kazısı yapıldığı anda tünele gelen yükün tünel üzerindeki tüm örtü yüksekliğinden gelecek yükün olmadığı bilinmelidir. Zira böyle bir düşünce ile yapılacak olan destek sistemi tasarımı ciddi bir şekilde çok büyük kaplama kalınlıkları ile beraber bulon miktarının artmasına neden olacaktır. Böyle bir durum ise ekonomik ve mühendislik açısından uygun olmayacaktır. Zira bilindiği gibi Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi'nin(NATM) temel felsefesi, tünel etrafındaki zeminin yük taşıyan bir eleman gibi düşünülmesidir. Zemin reaksiyon eğrisine göre en optimum destek sistemine tünel etrafında belli bir deformasyona müsaade edilmesi ile ulaşılmaktadır. Bu amaçla yapım aşamasında da tünelde gerekli olan jeoteknik ölçümler yapılarak değerlendirilmelidir ve destek sistemlerinde belirli revizyonlar yapılabilmektedir. Analizlerde, kazı yapıldıktan sonra gevşeme değeri olarak %65 kaya yükü öngörülmüş, destek yerleştirilmesi ile beraber %35'lik bir kaya yükü modelde desteklere verilmiştir [26]. Tünel destek sistemleri için Phase2d programında hazırlanan modelleme aşamaları Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Tünel destek sistemlerinin belirlenmesi için yapılan modelleme aşamaları

Kademeler	Açıklama
1	Arazi Gerilmelerin Oluşturulması
2	Sürenlerin yerleştirilmesi
3	Üst yarı malzeme gevşemesi
4	Üst yarı Püskürtme beton (yaş) ve kaya bulonu uygulaması
5	Alt yarı kazısı (Üst yarı püskürtme beton sert, Alt yarı püskürtme beton yaş)
6	Alt yarı püskürtme betonu sert
7	Invert kazısı
8	Invert püskürtme beton yerleştirilmesi
9	Invert püskürtme beton sert
10	Sismik yüklemenin uygulanması
11	İç kaplamanın yerleştirilmesi ve sismik yüklemenin tekrar uygulanması

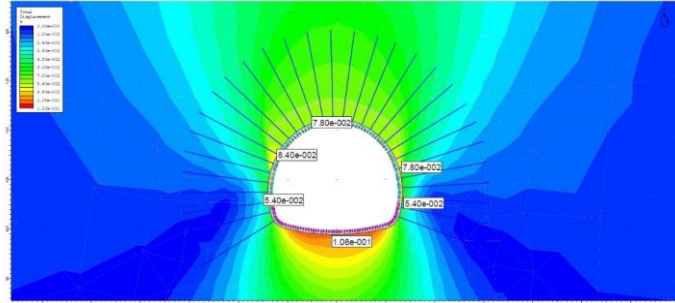
Sismik ivme değeri olarak yatay 0.15 g ve düşey ivme değeri de 0.05 g olarak seçilmiş [10] ve son kademede uygulanmıştır. Phase2d programı ile oluşturulan model Şekil 13'de verilmektedir.



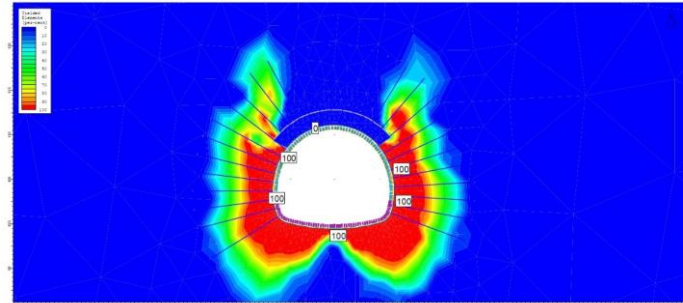
Şekil 13. Modelde kullanılan zemin parametreleri

6.2 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

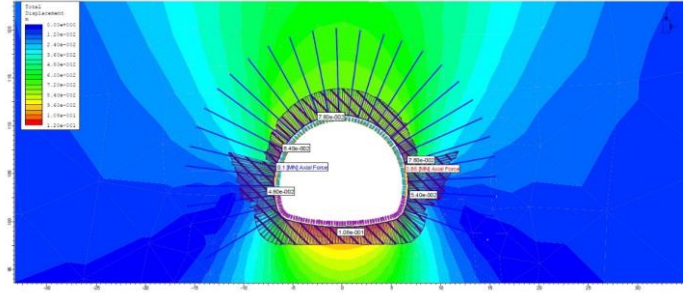
Analiz sonuçları Şekil 14 ile 16 arasında gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, tünel çevresinde meydana gelen deformasyonlar tünel tavanında 7.9 cm, tünel yan omuzlarında 8.4 cm ve 7.78 cm, tünel alt yarı kesiminde 7.5 cm ve taban kesiminde ise 10.8 cm düzeyinde olup tünel tamamen stabil haldedir (Şekil 14). Tünel çevresindeki yenilmeler ise ilk 3-4 m'lik bölümde meydana gelmektedir (Şekil 15). Tünel çevresinde oluşan dayanım faktörleri ise 1 in üzerindedir (Şekil 16). Elde edilen sonuçlara göre tünel çevresinde meydana gelen deformasyonlar sınır değerler içerisinde kalmış olup tünel stabilitesi sağlanmaktadır. Ayrıca püskürtme betona gelen kesit tesirleri ise Tablo 3'de sunulmaktadır. Burada kesit etkileşim diyagramı çizildiğinde kesitin yeterli geldiği belirlenmiştir (Şekil 16). Kesit tesirleri 1.5 güvenlik faktörü ile çarpılarak kesit etkileşim grafiği çizdirilmiştir (Şekil 18).



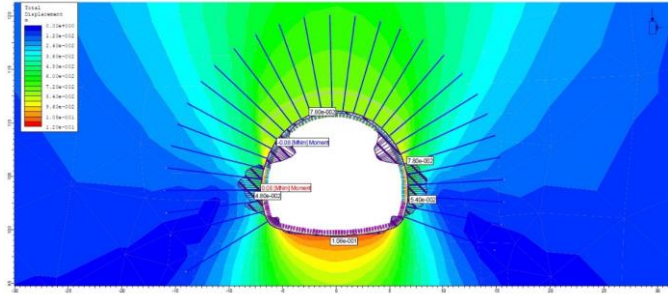
Şekil 14. Tünel çevresinde meydana gelen deformasyonlar



Şekil 15. İyileştirme sonrası yenilme bölgeleri



Şekil 16. Dış kaplamaya gelen aksel kuvvetler



Şekil 17. Dış kaplamaya gelen momentler

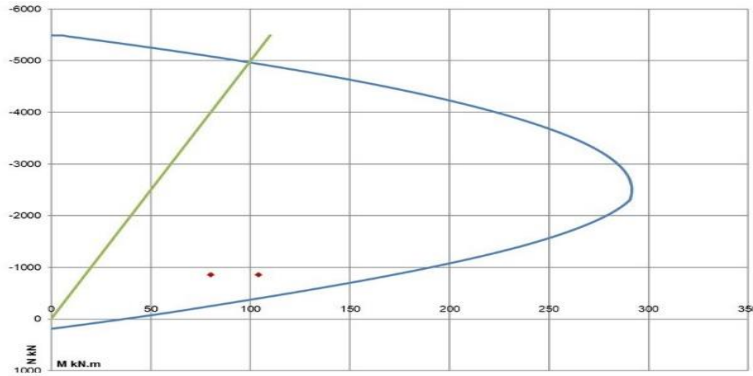
Kesit tahkiki analizlerinde ise aşağıda verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Beton Sınıfı :C20/25,

Beton tasarım basınç dayanımı, $f_{cd}=13\text{MPa}$,

Çelik tasarım dayanımı, $f_{yd}=434.80\text{ Mpa}$

Kesit tahkiklerinde püskürtme beton kalınlığı 40 cm olarak alınmıştır. Püskürtme betonda kullanılan donatı Q221/221 tipinde hasır çelik seçilmiştir. Şekil 18'de verilen kesit tahkiki sonuçlarına göre hasır çelik, iksa ve püskürtme betondan oluşan destek sisteminin tünele gelen yükleri taşıyacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 18. Kesit etkileşim diyagramı

7. Sonuçlar

T7 tüneli portal ve tünel etkileşimi açısından çok önemli bir örnektir. Portal kazıları ve tünel kazıları sırasında meydana gelen deformasyonlar birbirini olumsuz etkilemiş ve tünel kazılarına ara verilmek zorunda kalınmıştır. Portal şevlerinin aç kapa yapısı ile desteklenmesi ile portal stabilitesi sağlanmıştır. Bu durumda yüzeydeki binalarda korunmuş ve ciddi bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Tünel kazısı ise aç kapa yapısından sonra başlamış ve şemsiye (umbrella) yöntemi ile kazı ve destek işlemleri yapılmıştır. Portal ve tünel kazısı ilişkisi tünelticilik açısından

çok önemlidir. Portal şevleri ile tünel kazısı etkileşim içerisindedir. Portal şevlerinde meydana gelebilecek yenilmeler tünel stabilitesini de etkilemektedir. Portal şevlerinde olası göçükler tünele ulaşımı da etkileyeceğinden en kritik kesim olarak portal bölgesi düşünülmelidir. Bu sebeple stabilite analizleri en üst düzeyde sağlanmalıdır. Çünkü uzun tünellerde tünel kazısı tünel uzunluğuna bağlı olarak yıllarca sürmektedir.

Zayıf zeminlerde açılan tünellerde portal tasarımında;

- Portal şevlerinin kazılması
- Destek sistemlerinin yapılması
- Tünel kazı öncesi aç-kapa yapısının yapılarak tünel ve portal etkileşimin en az düzeye indirilmesi
- Tünel kazısına başlanması, olarak özetlenebilir.

Zayıf zeminlerde açılan kritik kesimlerde tünel kazısına başlanmadan aç-kapa yapısının dolgusunun yapılması önerilmektedir. Aksi takdirde uzun dönem açıkta kalan portal şevlerinin stabilitesinde sorunlar yaşanması olasıdır. Bu durum tünele olan ulaşımı da etkileyecek ve tünel kazısına ara verilmek zorunda kalınacaktır. Ayrıca portal-tünel etkileşiminin detaylı olarak belirlenebilmesi için üç boyutlu nümerik analizlerin de yapılması önerilmektedir. Böylelikle tünel ve portal etkileşimi kazı öncesi daha ayrıntılı olarak değerlendirilme şansı olacaktır.

Kaynakça

- [1] L.v Rabcewicz, “The new austrian tunnelling method, Part One,” *Water Power*, pp 453–457, 1964.
- [2] L.v. Rabcewicz, “The new austrian tunnelling method, Part Two,” *Water Power*, pp 511–515, 1964.
- [3] L.v. Rabcewicz, “The new austrian tunnelling method, Part Three,” *Water Power*, pp 19–24, 1965.
- [4] 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.
- [5] 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*, 2020, 12, 1166, <https://doi.org/10.3390/su12031166>, 2020.
- [6] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, “Evaluation of collapse mechanism and portal interaction of a high-speed railway tunnel (t29 tunnel, turkey),” *Eurock 2021*, Torino. 2021.
- [7] E.Poşluk, S. Dalgıç, İ. Kuşku, E.A. Poşluk, “Heyelan ıslahında gereken dayanma kuvvetinin limit denge yöntemi ile belirlenmesi,” *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, C.27, S.2. 77-88, Y.2014, 2017.
- [8] 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
- [9] A. Can, Y. Baskose and C. Gokceoglu, “Stability assessments of a triple-tunnel portal with numerical analysis (south of Turkey)”. *Geotechnical Research*, <https://doi.org/10.1680/jgere.21.00028>. 2022
- [10] Karayolları Genel Müdürlüğü, *Karayolları Teknik Şartnamesi*, 2013.
- [11] L.v. Rabcewicz, J. Golser, “Principles of dimensioning the supporting system for the “new austrian tunnelling method,” *Water Power*, Marc, 88-93. 1973.
- [12] L. Müller, “Removing misconceptions on the new austrian tunnelling method,” *Tunnels & Tunnelling International*;10(8):29–32. 1978.
- [13] Yüksel Proje, *Kayaş-yerköy demiryolu kesim-1 (km:12+263-74+100) tünel jeoteknik raporu (t1, t2, t3, t4, t5, t6 ve t7)*, 2011.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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. 66–84). New Delhi, India,1993
- [17] Z.T. Bieniawski, “Engineering classification of jointed rock masses,” *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, 335-344. 1973.

- [18] 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.
- [19] Z.T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley. 1989.
- [20] Fugro Sial, "Ankara-sivas demiryolu projesi kayaş-kırıkkale arası kesim-1 (kayaş-elmadağ) (km:12+263-45+440) Tünel 7 Giriş Portalı Destek Sistemi Hesap Raporu", 2019
- [21] P. Marinos, E. Hoek, "Gsi: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation," *In: Poceedings of the GeiEng2000, International conference on geotechnical and geological engineering*, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, pp 1422-1446
- [22] E. Hoek, P. Marinos, "Predicting tunnel squeezing," *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000.
- [23] Roclab, 2011, *Version 1.032*, www.rocscience.com
- [24] RocScience, 2020. *Phase2 8.0 User Guide*, [Accessed: 17-Nov-2021]. https://www.rocscience.com/downloads/phase2/Phase2_TutorialManual,
- [25] J. Jacky, "The coefficient of earth pressure at rest." *J. Soc. Hung. Archit. Eng.* 78, 355–388. 1944.
- [26] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, *Technical manual for design and construction of road tunnels -civil elements*, Publication No:FHWA-NHI-10-34, 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.



Kurtpınar (Ceyhan) Bazaltlarının Demiryolu Balastı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi

Esma KAHRAMAN*¹, Nil YAPICI¹

¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

*ekahraman@cu.edu.tr

(Alınış/Received: 03.03.2022, Kabul/Accepted: 06.04.2022, Yayınlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Bazaltlar, demiryolu balastları, binalar, tarihi yapılar ve anıtlar gibi birçok mühendislik projesinde doğrudan yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada; Ceyhan Kurtpınar bazaltlarının, fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri belirlenerek demiryolu balastı olarak kullanım olanakları araştırılmıştır. Çalışma kapsamında; söz konusu bölgede incelemeler yapılmış ve yapılacak deneyler için kaya örnekleri alınmıştır. Kaya numunelerinin fiziksel (Los Angeles aşınma direnci tayini, Mikro-Deval aşınma direnci, su emme oranı, tane yoğunluğu ve MgSO₄ dona dayanıklılık direnci), mekanik (tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımı, Brezilya Yarma Deneyi) ve mineralojik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca P dalga hızı ve sertlik analizleri de yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Ceyhan Kurtpınar Bazaltlarının konvansiyonel hatlarda demiryolu balastı olarak kullanılabilceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Bazalt, Balast, Don kaybı, Los Angeles Aşınma, Ceyhan Kurtpınar

Evaluation of Use of Kurtpınar (Ceyhan) Basalts as Railway Ballast

Abstract: Basalts are used directly as construction materials in many engineering projects such as railway ballasts, buildings, historical structures and monuments. In this study, the physical, mechanical, and petrographic qualities of Ceyhan Kurtpınar basalt rocks were investigated to determine their usage possibilities as railway ballast. Scope of work; surveys were made in the region and rock samples were taken for the experiments to be carried out. Physical (Los Angeles abrasion resistance, Micro-Deval abrasion resistance, water absorption rate, grain density and MgSO₄ frost resistance), mechanical (uniaxial compressive strength, point load strength, Brazilian splitting tensile strength) and mineralogical properties of rock samples were determined. In addition, P wave velocity and hardness analyzes were also performed. Experimental studies have shown that the Ceyhan Kurtpınar Basalts can be used as railway ballast on conventional lines.

Keywords: Basalt, Ballast, Frost loss, Los Angeles Abrasion, Ceyhan Kurtpınar

1. Giriş

Balast, raylı ulaşım hatlarında ray altında kullanılan, atmosferik şartlardan meydana gelebilecek suları ortamdan uzaklaştıran ve yük taşıyan 22,4 mm ila 63 mm çapında köşeli ve yeterli sertlikteki taşların kırılması ile elde edilen malzemelerdir [1, 2, 3]. Günümüzde demir yolu hatlarında bazalt, granit, granodiyorit, gabro, diyabaz, siyenit, diyorit, porfir ve sert kalker balast malzemesi olarak kullanılmaktadır [4, 5]. Balast olarak kullanılan kayaların uygun standartlarda olup olmadığının araştırılması ve uygun malzeme seçimi büyük yatırımlar gerektiren demiryolu projelerinde hayati önem arz etmektedir. Demiryolu hatlarında kullanılacak kayaların mineralojik ve petrografik özelliklerinin yanında fiziko-mekanik özelliklerinin de detaylı olarak araştırılması gerekmektedir.

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) Balast Teknik Şartnamesine [6] göre; balast olarak kullanılacak malzemelerin geometrik ve fiziksel özelliklerinin tespiti için yapılan

Atıf için/Cite as: E. Kahraman, N. Yapıcı, "Kurtpınar (Ceyhan) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanımının değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 14-22, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1082366

kontroller TS 7043 EN 13450 [7] ile TS 699 [8] standartlarına ve bu standartların atıf yaptığı diğer standartlara göre yapılmalıdır. Yapılan değerlendirmeler ile uygunluğu beyan edilmelidir.

Ocaktan elde edilen balast malzemesi aşağıda verilen genel şartları sağlamalıdır;

- Yuvarlak, pürüzsüz dere çakılı kullanılmamalıdır.
- Keskin kenar ve köşelere sahip olacak şekilde parçalanmış olmamalıdır.
- Atmosferik koşullara karşı direnci yüksek olmalıdır.
- Aşınmaya karşı yüksek sertlik ve mukavemete sahip olmalıdır.
- Dayanımı yüksek ve dinamik-statik basınçlara karşı yüksek dirençli olmalıdır.
- Sürtünmeye karşı direnci yüksek olmalıdır.
- Uygun stabiliteye sahip ve drenaj kabiliyeti yüksek olmalıdır.
- Masif yapıda ve homojen olmalıdır.
- Zararlı bileşen, kil ya da toprak içeriği bulundurmamalıdır.

Demiryolu balastı olarak kullanılabilen malzemelerin özellikleri pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Sabancı [9]; Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Solhan (Bingöl) bölgesinde bulunan magmatik kayalar üzerinde yaptığı deneysel çalışmalar ile bu kayaların demiryolu balastı olarak kullanılabileceğini belirlemiştir. Sow [10] yaptığı çalışmada; Senegal’de bulunan Bandia kireçtaşı ve Diack bazalt ocaklarından elde ettiği numunelerin demiryollarında balast malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağını değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda elde ettiği deneysel bulgular bazaltların balast olarak kullanılması için gereken özelliklere sahip olduğunu fakat kireçtaşının bu özellikleri taşımadığını göstermiştir. Vitton ve Breitenbucher [11], Chicago ve Detroit bölgesindeki balast malzemesinin mevcut kalitesini değerlendirmiş ve balast malzemelerinin planlanan yüksek hızlı demiryolu için standartları karşılayıp karşılamadığını belirlemişlerdir. Böylece bölgedeki agregaların balast olarak değerlendirmesi için bir veri tabanı oluşturmuşlardır. Koralay ve ark. [1]; İnceler (Bozkurt/Denizli) bölgesinde bulunan gabroların balast malzemesi olarak kullanılabilirliğini değerlendirmişlerdir. Fiziksel, mekanik ve petrografik incelemeler sonucunda bu bölgedeki gabroların balast malzemelerinden istenilen standart değerleri karşıladığını belirtmişlerdir. Kenan ve ark. [2] yaptığı çalışmada Ankara-İstanbul arasında yapılan yüksek hızlı tren (YHT) hattı üzerinde bazalt ve granitin bir arada balast malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Malzemelerin balast olarak kullanımı sırasında birbirini aşındırıp aşındırmayacağını incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda balast malzemelerinin ayrı ayrı veya bir arada kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır.

Bu çalışma kapsamında; Kurtpınar (Ceyhan) bazaltlarının fiziko-mekanik, kimyasal ve petrografik özellikleri belirlenerek deney sonuçlarının “TCDD Balast Teknik Şartnamesine” ne [6] uygunluğu değerlendirilecektir. Ayrıca çalışma; hammadde sahasının Mersin-Gaziantep arasında yapılacak olan hızlı tren hattına oldukça yakın konumda olmasından dolayı hattın yapımında bazaltların balast malzemesi olarak kullanılabilirliği hakkında fikir sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metot

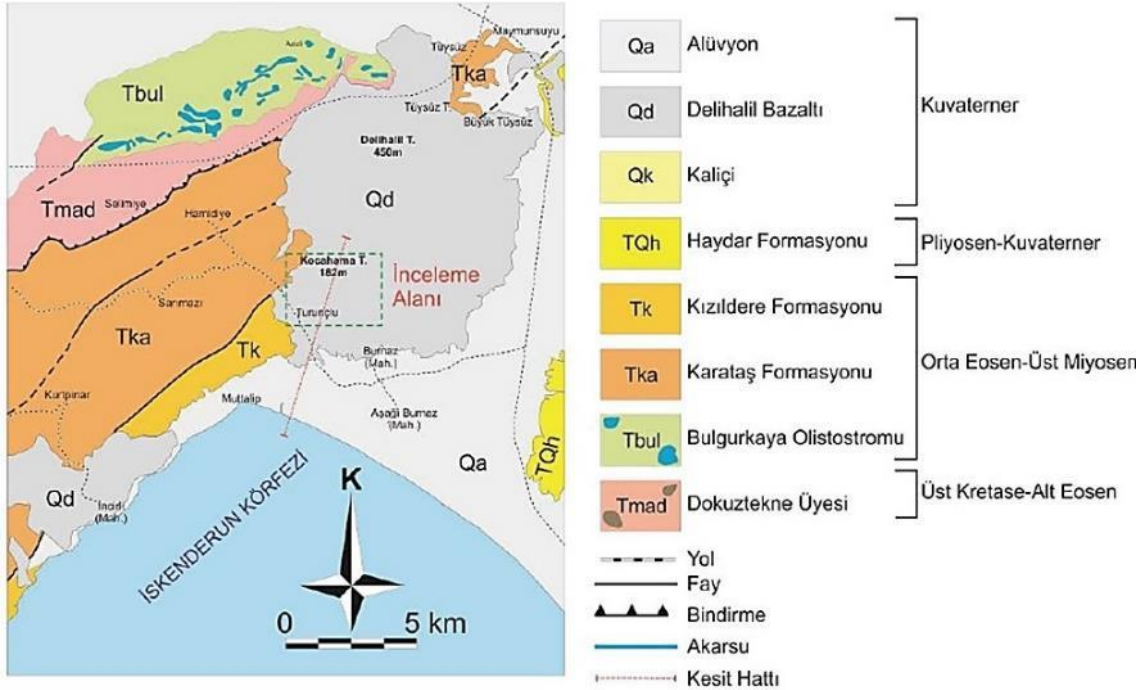
2.1. Materyal

Çalışma sahasında yapılan incelemelerde; ocağın genel yapısının balast üretimine uygun olduğu, süreksizlik ve ezilme zonları görülse de devamlılık arz etmediği, genel olarak homojen bir yapı sergilediği gözlenmiştir. İncelenen bazalt örneklerinin yeri ve jeolojisi aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

İnceleme alanı Adana ili, Ceyhan İlçesi, Kurtpınar mahallesi sınırları içerisinde bulunmaktadır. Adana iline 67 km ve Ceyhan ilçesine 20 km uzaklıkta olup ulaşım D-52 ve D-817 karayolu ile sağlanmaktadır.

Bölge jeolojisi ve stratigrafisi önceki yıllarda birçok araştırmacı tarafından farklı başlıklar altında çalışılmış ve yorumlanmıştır [12, 13, 14, 15,16]. Çalışma sahası, Pliyo Kuvaterner yaşlı volkanik bileşimli Delihalil bazaltı olarak tanımlanan kayaçlar içerisinde bulunmaktadır. Bölgede piroklastik ve boşluklu özelliklere sahip kayaçların farklı yapısal ve dokusal özellik sergilemeleri bölgedeki volkanik aktivitenin tek seferde gerçekleşmediğini kanıtlamaktadır [12].

Yakın çevrede bulunan diğer birimler; Üst Kretase yaşlı spilitik volkanit, tüfit ve aglomera içerikli Dokuztekn üyesi, Orta Eosen-Oligosen yaşlı olistolitli mega breş, kil-kum- çakıltaşı- marn içerikli Bulgurkaya olistromu, Orta Miyosen yaşlı kumtaşı, kumlu kireçtaşı, marn, kireçtaşı ve konglomera ardalanmasından oluşan filiş içerikli Karataş formasyonu, Serravaliyen-Messiniyen yaşlı kumtaşı, marn, resifal kireçtaşı içerikli Kızıldere formasyonudur [12, 13, 14] (Şekil 1).



Şekil 1. Doğu Akdeniz bölgesinde inceleme alanını içeren jeolojik harita [12, 13, 14]

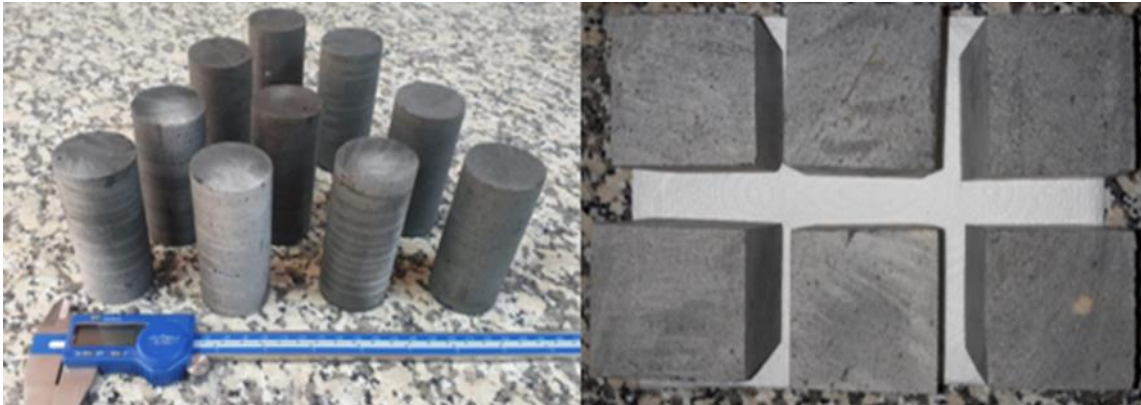
Volkanik faaliyet Alt-Orta Miyosen yaşlı sedimanter kayaçları keserek geniş ölçekli yayılım sunmuştur. Delihalil Tepe’de bazik volkanik çıkışlı koniler yer aldığı için birim Kozlu [16] tarafından Delihalil bazaltları olarak tanımlanmıştır [12].

2.2. Metot

Bazalt sahasından, yapılacak olan deney ve analizler için üretim sırasında elde edilen blok numuneler Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümüne getirilmiştir. Üretim aynasına ve numunelere ait görüntü Şekil 2’de verilmiştir. Blok numunelerden kesici makine ve karot alma makinesi kullanılarak deneyler için numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Çalışma sahasına ait örnek ayna görüntüsü ve getirilen blok numune örnekleri



Şekil 3. Deneyler için hazırlanan silindirik ve küp numunelerden örnekler

Balast olarak kullanılacak malzemelerden istenilen fiziksel, mekanik, petrografik ve indeks özellikler “TCDD yeni Balast Teknik Şartnamesi”nde [6] belirtilmiştir. Fiziksel özellikler için gerçekleştirilecek deneyler Los Angeles parçalanma direnci tayini, Mikro-Deval aşınma direnci, su emme oranı, tane yoğunluğu ve $MgSO_4$ dona dayanıklılık direnci tayinidir. Ayrıca standart donma çözünme dayanımı deneyi de uygulanmıştır. Fiziksel deneylerin uygulanmasında kullanılan standartlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Fiziksel deneylerde kullanılan standartlar

Deney	Standart
Los Angeles parçalanma direnci	TS EN 1097-2 [17]
Mikro-Deval aşınma direnci	TS EN 1097-1 [18]
Su emme oranı	TS EN 1097-6 [19]
Tane yoğunluğu	TS EN 1097-6 [19]
Donma-Çözünme dayanımı	TS EN 1367-1 [20]
$MgSO_4$ dona dayanım	TS EN 1367-2 [21]

Balast malzemelerden istenilen mekanik özellikler tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımıdır. Buna ek olarak çalışmada Brezilya Yarma Deneyi de yapılmıştır. Mekanik deneylerin uygulanmasında kullanılan standartlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Mekanik deneylerde kullanılan standartlar

Deney	Standart
Tek eksenli basınç dayanımı	TS EN 1926 [22]
Nokta yük dayanımı	TS 699 [8]
Brezilya Yarma Deneyi	TS 7654 [23]

Deney numunelerinin bazı indeks özelliklerini belirlemek için Schmidt sertliği, Mohs sertliği, P dalga hızı, don sonrası P dalga hızı deneyleri uygulanmıştır. Deneylerin uygulanmasında kullanılan standartlar Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. İndeks deneylerde kullanılan standartlar

Deney	Standart
Schmidt sertliği	ISRM [24]
Mohs sertliği	TS 6809-T1 [25]
P dalga hızı	TS EN 14579 [26]

Kayaç numunesinin petrografik analizleri TS EN 12407 [27], TS EN 12440 [28], TS EN 12670 [29] standartlarına göre değerlendirilmektedir.

3. Bulgular

Balast olarak kullanılacak malzemelerden istenilen özellikler ve sınır değerler “TCDD yeni Balast Teknik Şartnamesi”nde [6] belirtilmiştir. Kayacın ortalama deney sonuçları ve istenilen sınır değerler Tablo 4’te verilmiştir.

Ayrıca çalışma kapsamında; kayaç numunesi üzerinde Donma-çözünme dayanımı, Brezilya yarma deneyi, Schmidt sertliği, Mohs sertliği, don öncesi ve don sonrası P dalga hızı, metilen mavisi deneyleri de gerçekleştirilmiştir ve ortalama deney sonuçları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 4. TCDD balast teknik şartnamesine göre malzemeden istenilen sınır değerler ve Kurtpınar bazaltının sonuçları [6]

Deney	Kurtpınar Bazaltı değerleri	Hızlı tren-yüksek hızlı tren hattı için sınır değerler	Konvansiyonel Hatlar için Sınır Değerler
Los Angeles Aşınma Direnci	%19,86 ± 0,11	≤ %14	≤ %20
Mikro Deval Aşınma Direnç	%13,21 ± 0,13	≤ %12	≤ %14
Su Emme Oranı	%1,48 ± 0,04	≤ %1,5	≤ %2
MgSO ₄ Deneyi (Dona Dayanıklılık)	%4,36 ± 0,11	≤ %3	≤ %5
Tane Yoğunluğu	2,887 ± 0,009 g/cm ³	≥ 2,60 g/cm ³	≥ 2,50 g/cm ³
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	118,08 ± 0,502 MPa	≥ 100 MPa	≥ 50 MPa
Nokta Yük Dayanımı	6,15 ± 0,109 MPa	≥ 5 MPa	≥ 2.5 MPa

Tablo 5. Kurtpınar bazaltının bazı indeks özelliklerinin sonuçları

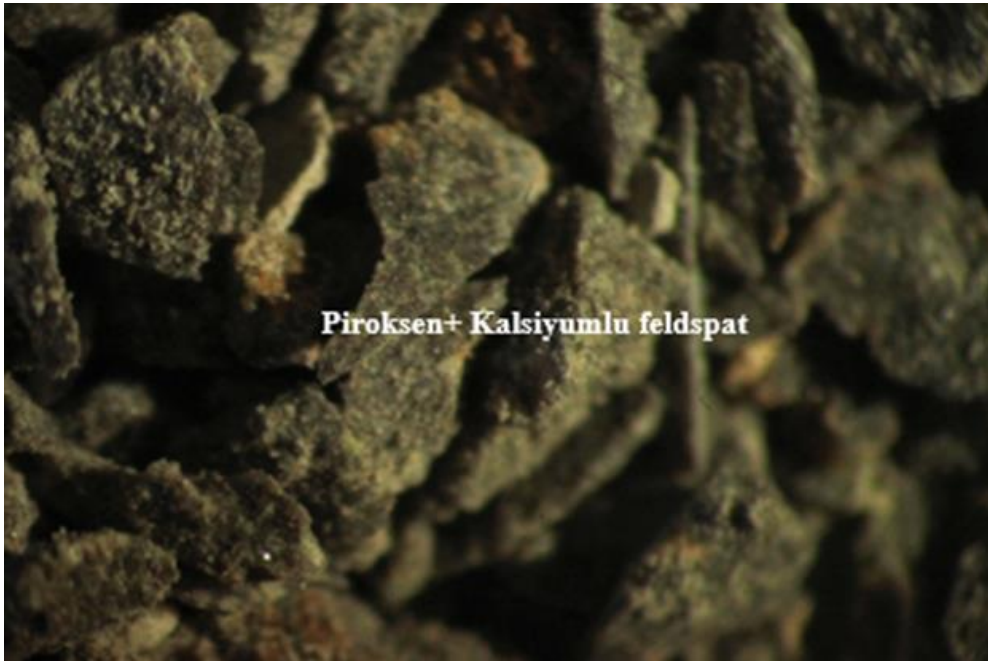
Deney	Değer
Donma Çözünme Dayanımı	% 1,16 ± 0,05
Schmidt sertliği	43 ± 2,26
Mohs sertliği	5
P dalga hızı (don öncesi)	5,23 ± 0,123 km/s
P dalga hızı (don sonrası)	4,63 ± 0,083 km/s
Brezilya yarma deneyi	11,58 ± 0,128 MPa

Petrografik tanımlama, standartlara uygun olarak alınan örnekler üzerinde çıplak göz, lup, zoomlu stereo polarizan mikroskop kullanılarak incelemeler yapılmıştır.

Petrografik analizler ile kayacı oluşturan mineraller, kayacın dokusu, yapısı, minerallerin petrografik özellikleri, kayacın mikroskobik olarak alterasyona uğrayıp uğramadığı, çatlak ve kırık özellikleri ve kayaç adı tanımlanmıştır.

Örneklerin Lup İncelemeleri; siyah-koyu gri renkte, gözenekli magmatik orijinli bazik bileşimlidir. Kayaç puzolanik yapıdadır. Bazik bileşimli olup hidroklorik aside (HCl) tepki vermemektedir.

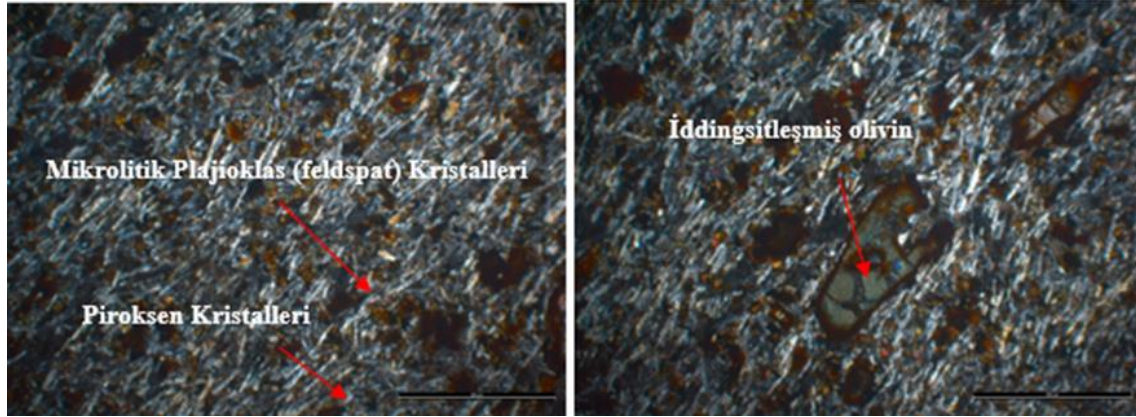
Çeneli kırıcı ile boyutu küçültülen kayaç parçacıklarının stereo mikroskop incelemelerinde; Ana mineral parajenezleri; kalsiyumlu feldspat, piroksen ve olivindir. Demir alterasyon görülmektedir. Fosil kavkıları yoktur (Şekil 4).

**Şekil 4.** Kayaç örneğinin stereo mikroskop görüntüsü

Örneklerin binoküler polarizan mikroskop incelemelerinde; ana kayaç mineralleri feldspat, piroksen ve olivin olduğu gözlenmiştir. Feldspatlar eş boyutlu mikrolitler halinde olup akıntı izleri belirgindir. Polisentetik ikizlenme çoğunluktadır ve sönme açılarına göre bazik bileşimli

olup %65-70 oranında bitownit bulunmaktadır. İkinci yoğunluklu olan mineral ise piroksendir (Şekil 5).

Piroksenler yarı özşekilli- özşekilsiz ve mikrokristalen hamur maddesi içerisinde bulunmakta olup %20-25 oranında Ojit bileşimlidirler. %6-7 oranında olivin kristalleri küçük fenokristaller halinde özşekilsiz fenokristaller demir ayrışmaları (iddingsitleşme) gözlenmiştir. Mafik mineral oranı %2-3 oranındadır. Yarı özşekilli demir minerallerinden oluşmaktadır. Kayaç mineral içeriğine göre olivin içeriği fazla olduğu için Olivinli Bazalt olarak tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Mikrolitler halinde plajfoklas kristalleri, piroksen fenokristalleri ve iddingsitleşmiş olivin fenokristalleri (çift nikol)

4. Tartışma ve Sonuç

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları tarafından kullanılacak olan balast malzemesi ile ilgili “Balast Teknik Şartnamesi” 2020 yılında güncellenmiştir. Bu güncelleme ile balast malzemelerinden istenilen sınır değerler hızlı-yüksek hızlı tren hatları ve konvansiyonel hatlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında; Ceyhan Kurtpınar bölgesi bazaltların teknik şartnamede belirtilen sınır değerlere uygunluğu araştırılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda;

- Los Angeles aşınma direnci % 19,86 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre; bazalt numunesinin konvansiyonel hatlar için (\leq %20) uygun olduğu fakat hızlı tren-yüksek hızlı tren hattı için (\leq %14) sınır değerleri karşılamadığı gözlenmiştir.
- Mikro Deval aşınma direnci %13,21 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre; bazalt numunesinin konvansiyonel hatlar için (\leq %14) uygun olduğu fakat hızlı tren-yüksek hızlı tren hattı için (\leq %12) sınır değerleri karşılamadığı gözlenmiştir.
- $MgSO_4$ don kaybı %4,36 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre; bazalt numunesinin konvansiyonel hatlar için (\leq %5) uygun olduğu fakat hızlı tren-yüksek hızlı tren hattı için (\leq %3) sınır değerleri karşılamadığı gözlenmiştir.
- Tane yoğunluğu, su emme oranı, tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yük dayanımı açısından bazalt numunesi hem konvansiyonel hatlar için hem de hızlı tren-yüksek hızlı tren hattı için sınır değerleri karşıladığı gözlenmektedir.
- Petrografik olarak kayacın olivince zengin olduğu ve alterasyon sonucu iddingsitleşmeye uğradığı tespit edilmiştir. Bu durum uzun vadede işimaya ve aşınmaya karşı direnç düşüklüğüne sebebiyet verecektir.
- Diğer analizlere bakıldığında ise; kayaç sınıfının özelliklerini karşılamaktadır.
- Tüm analizlerin özellikle aşınma ve $MgSO_4$ don kaybı analizlerinin sahadaki üretiminin ilerlemesi ile tekrar değerlendirilmesi uygun olacaktır.

Teşekkür

Çalışmamıza katkısından dolayı Bozdoğan Madencilik İnş. Mak. Nak. San. ve Tic Ltd. Şti. yetkililerine teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynakça

- [1] M. Kozak, “Demiryolunda rayların birleşim noktaları ve özelliklerinin araştırılması,” *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(2), 40-49, 2011.
- [2] T. Koralay, İ. Çobanoğlu, M. Demir, “Ofiyolitler içerisindeki gabro dayklarının balast malzemesi olarak kullanılabilirliği inceler (Bozkurt-Denizli) örneği,” *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(2), 32-48, 2014.
- [3] O. Kenan, İ. Topal, E. Poşluk, “Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren demiryolunda balast hammaddesi olarak granit ve bazaltın birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması ve aşınma dayanımlarına etkisi,” *MT Bilimsel*, (1), 81-89, 2012.
- [4] M. Kozak, “Demiryolu balastının ve özelliklerinin araştırılması,” *Demiryolu Mühendisliği*, (13), 86-96, 2021.
- [5] M.Ç. Bayrak, “Altyapı özelliklerinin demiryolu üstyapısının performansına etkisi (PhD),” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 176 s., 2018.
- [6] TCDD, “TCDD Balast Teknik Şartnamesi,” *Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Devlet Demir Yolları İşletmesi Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı*, Ankara, 22 s., 2020.
- [7] TS 7043 EN 13450, “Demiryolu balastları için agregalar,” *TSE*, Ankara, 2020.
- [8] TS 699/T1, “Doğal yapı taşları - inceleme ve laboratuvar deney yöntemleri,” *TSE*, Ankara, 2016.
- [9] A. Sabancı, “Usability of Pazarcık (Kahramanmaraş) and Solhan (Bingöl) magmatics as railway ballast. (MSc),” *Inonu University, Institute of Natural and Applied Science*, Malatya, 54 p., 2018.
- [10] L. Sow, “Ballested railways in Senegal-Characterization of Bandia limestone and Diack Basalt for use as ballast materials,” *International Journal of Applied Engineering Research*, 14(15), 3396-3405, 2019.
- [11] S. Vitton, K. Breitenbacher, “Assessment of aggregate sources in Michigan for high speed railroad ballast (No. RC-1606),” Michigan. Dept. of Transportation. Office of Research and Best Practices, 2014.
- [12] A. Özvan, İ.A. Acar, “Kıyı koruma yapıları için Delihalil bazalt seviyelerinin (doğu Akdeniz) kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi,” *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 39 (1), 2015.
- [13] Z. Bilgin, T. Ercan, “Ceyhan – Osmaniye yöresindeki kuvaterner bazaltların petrolojisi,” *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 24, 22-30, 1981.
- [14] H. Kozlu, “Misis-Andırın dolaylarının stratigrafisi ve yapısal evrimi,” *Türkiye 7. Petrol Kongresi Dergisi*, 104 – 116, 1987.
- [15] H. Kozlu, “Doğu Akdeniz Bölgesinde yer alan Neojen basenlerinin (İskenderun, Misis-Andırın) Tektono-Stratigrafi birimleri ve bunların tektonik gelişimi,” *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, 189 s, 1997.
- [16] H. Kozlu, “İskenderun baseni jeolojisi ve petrol olanakları,” *TPAO rapor no: 1921*, Ankara, 1982.
- [17] TS EN 1097-2, “Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: parçalanma direncinin tayini için metotlar,” *TSE*, Ankara, 2020.
- [18] TS EN 1097-1, “Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro- deval).” *TSE*, Ankara, 2011.
- [19] TS EN 1097-6, “Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini,” *TSE*, Ankara, 2013.
- [20] TS EN 1367-1, “Agregaların ısıl ve bozunma özelliklerini tayin için deneyler- bölüm 1: Donmaya ve çözölmeye karşı direncin tayini,” *TSE*, Ankara, 2009.
- [21] TS EN 1367-2, “Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler-bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi,” *TSE*, Ankara, 2011.
- [22] TS EN 1926, “Doğal taşlar- Deney metotları- Basınç dayanımı tayini,” *TSE*, Ankara, 2007.
- [23] TS 7654. Kayaçların çekme mukavemetinin dolaylı (indirekt) metotla tayini. *TSE*, Ankara.
- [24] ISRM (1981). “Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, part 3,” *Commission on standardisation of laboratory and field tests*, 101–102, 1989.
- [25] TS 6809/T1, “Mohs sertlik cetveline göre sertlik tayini,” *TSE*, Ankara, 2012.

- [26] TS EN 14579, “Doğal taşlar-Deney yöntemleri-Ses hızı ilerlemesinin tayini,” *TSE*, Ankara, 2006.
[27] TS EN 12407, “Doğal taşlar-deney yöntemleri-petrografik inceleme,” *TSE*, Ankara, 2019.
[28] TS EN 12440, “Doğal taşlar-İsimlendirme kriterleri,” *TSE*, Ankara, 2017.
[29] TS EN 12670, “Doğal taşlar-Doğal taşlar- terimler ve tarifler,” *TSE*, Ankara, 2019.

Özgeçmiş



Esmâ KAHRAMAN

Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde Doktor Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini Çukurova Üniversitesi’nde tamamlamıştır.
E-Posta: ekahraman@cu.edu.tr



Nil YAPICI

Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde Doktor Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini Çukurova Üniversitesi’nde tamamlamıştır.
E-Posta: nyapici@cu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Esmâ KAHRAMAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Görselleştirme. Nil YAPICI: İnceleme. Kontrol. Gözden geçirme ve düzenleme.



Dinamik Demiryolu Kuvvetlerinin Darbe Simülasyonlarıyla İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN*¹, Bekir AKTAŞ², Hakan ÖZTÜRK³

¹ TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

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

³ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

*ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 31.03.2022, Kabul/Accepted: 09.05.2022, Yayınlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Bu çalışma kapsamında, demiryollarında meydana gelen statik, yarı-statik ve dinamik kuvvetlerin karakteristik özellikleri, geniş bir literatür taraması, basitleştirilmiş örneklendirmeler ve özgün darbe simülasyonları ile incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları esnasında, B70 tipi öngerilmeli beton demiryolu traversleri kullanılmış ve farklı ara yüzeylere yüksekte serbest kütle düşüşleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede dinamik kuvvetlerin, risk kontrol hiyerarşisine uygun olarak; ilk etapta nasıl kısıtlanabileceği ve demiryolu yapı elemanları dizayn edilirken, doğru dizayn felsefesinin nasıl olması gerektiği yönünde algısal farkındalık düzeyinin artırılması hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda, elastisite modülü ve rijitliği optimum düzeyde düşük ve deformasyon kabiliyeti yeterli derecede yüksek demiryolu yapı elemanlarının hem kendisine etkileyen hem de çevreye yayılan kuvvetlerin ivme değerlerinin şiddet ve frekans bileşenlerini düşürmeyi sağladığı, deneysel olarak ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Demiryolu yükleri, Darbe testi, Dinamik kuvvet, Frekans bazlı tasarım

Investigation of Dynamic Railway Forces with Impact Simulations

Abstract: Within the scope of this study, the characteristics of static, semi-static, and dynamic forces occurring in railways were investigated. For this purpose, an extensive literature review, simplified examples, and unique impact simulations were used. During the simulations, B70 type prestressed concrete railway sleepers were used and the effect of different interfaces was demonstrated. So, in accordance with the risk control hierarchy; attention has been drawn to how the dynamic forces can be restricted in the first place. In addition, while designing railway structural elements, it is aimed to increase the level of perceptual awareness of how the right design philosophy should be. As a result of the study, it was concluded that railway structural elements with low elasticity modulus and stiffness at an optimum level and high deformation ability can reduce the magnitude and frequency components of the forces acting on themselves and spreading to the environment.

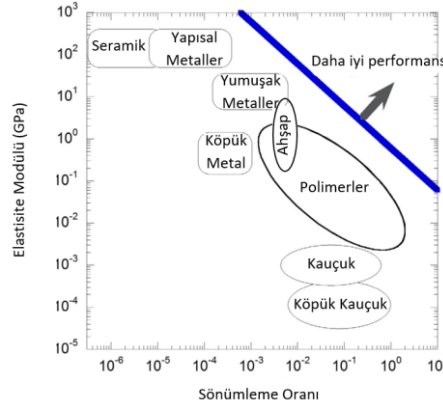
Keywords: Railway loads, Impact test, Dynamic force, Frequency-based design

1. Giriş

Demiryolu yapı elemanlarına etkileyen mekanik kuvvetler; statik ve yarı-statik kuvvetler ile dinamik kuvvetler olarak iki kategoriye ayrılabilir. İlk kategorideki statik ve yarı-statik kuvvetler, zamandan bağımsız olarak ifade edilebilmekte ve tesir ederken demiryolu yapı elemanlarının ivme değerlerinde kayda değer bir değişiklik oluşturmamaktadır. İkinci kategorideki dinamik kuvvetler etkisinde ise önemli düzeyde titreşimler meydana gelmekte ve zaman endeksli ifade edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Genel olarak gerek statik gerekse dinamik kuvvetler (force, F), Newton'un ikinci kanunu doğrultusunda, cismin kütlesi (mass, m) ve ivmesinin (acceleration, a) çarpımı ile ($F=m.a$) hesaplanabilmektedir [1]. Buna göre, dinamik demiryolu kuvvetlerinde, hız ve ivme değeri arttıkça ortaya çıkan dinamik kuvvetlerin şiddeti (magnitude) de artmaktadır. Statik kuvvetlerin aksine, dinamik temas kuvvetlerinin değerini etkileyen bir diğer faktör, kuvvet uygulayan ve uygulanan nesnelere esneme özellikleridir. Genel olarak, diğer faktörler eşdeğer

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, "Dinamik demiryolu kuvvetlerinin darbe simülasyonlarıyla incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 23-35, July. 2022 doi: 10.47072/demiryolu.1096371

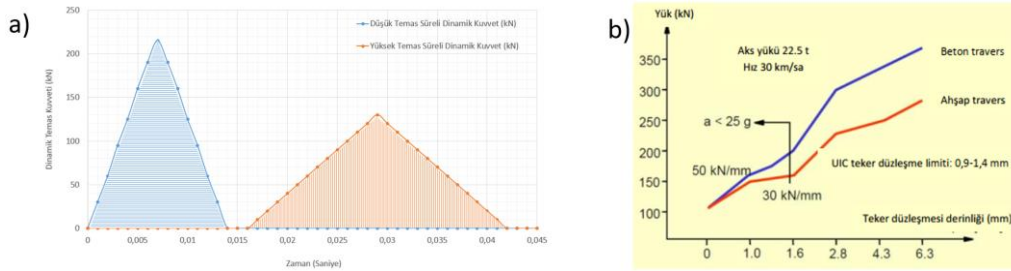
kalmak şartıyla; daha zor esneyen, elastisite modülü yüksek, rijit, yüksek yoğunluklu ve düşük boşluklu, penetrasyon ve deformasyona müsaade etmeyen nesnelere veya yüzeylere dinamik kuvvet uygulandığında, ortaya çıkan ivme değeri daha yüksek olmakta ve dolayısıyla daha yüksek kuvvetler ortaya çıkmaktadır. Bunlara örnek olarak; çelik ve benzeri yapısal metaller, bazı sert plastikler ve yüksek modüllü betonlar sayılabilir. Belirtilen bu özelliklerin aksinde karakter sergileyen ve dinamik kuvvetlerin ivme ve şiddetini düşüren yüzey ve nesnelere örnek olarak, bazı biyolojik kemik dokuları, yumuşak ve köpük metaller, bazı kompozitler, polimerler, kauçuk, ahşap malzemeler ve düşük modüllü betonlar sayılabilir. Bu geniş konu pek çok araştırmacı tarafından incelenmiş [2, 3, 4, 5] olup, konuyla ilgili örnek değerler Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Çeşitli malzemelerin elastisite modülleri ile sönümleme oranlarının ilişkisi [2]

Genel olarak daha düşük elastisite modülü veya rijitliğe sahip nesnelere, yeterli esneme kabiliyetine sahip olması şartıyla, daha fazla penetrasyon veya elastik/plastik deformasyona imkân sağlayarak, daha fazla süreli temas sağlamakta ve sonuçta daha düşük şiddette ivmeler meydana getirmektedir. Konu, detaya inilmeden fizik kuralları ile izah edilecek olursa, Şekil 2.a’da sunulan basitleştirilmiş grafik kullanılabilir. Bu grafikte, mavi ve turuncu renkli eğrilerle, iki eşdeğer (eşit impulsa sahip) kuvvetin, farklı rijitlikteki nesnelere uygulanması esnasında alınan şiddet ölçümlerinin zaman endeksli değişimleri sunulmuştur. Bu grafiklerde eğrilerin altında kalan alanlar hesaplanarak impuls (N.s) değerleri hesaplanmaktadır [6, 7]. Söz konusu impuls değerleri, kuvvet uygulayan ve uygulanan cisimlerin momentum’larındaki değişimi de göstermektedir. Eşit impuls değerine sahip bu iki kuvvetin, kuvvet-zaman eğrilerinin altında kalan alanlar da eşit olmaktadır. Ancak kuvvetlerin uygulandığı nesnelere rijitlikleri farklı olduğu için, temas süreleri değişmiştir. Bu durumda farklı temas sürelerine bağlı olarak, kuvvet şiddeti artıp azalmaktadır. Şekil 2.a’da görüldüğü üzere, yüksek temas süresi sağlayan, daha düşük rijitliğe sahip nesneye tesir eden kuvvetin zirve değeri (turuncu), düşük temas süresine neden olan rijit nesneye tesir eden kuvvetin (mavi) zirve değerinden düşük kalmaktadır. Birçok insan Şekil 1’deki gibi yüksekten düşen kütleler ile demiryolu taşıtlarının ray üzerinde hareket eden tekerleri gibi dönen aksamın ortaya çıkaracağı etkilerin birbirinden çok farklı olduğunu düşünebilir. Ancak Newton’un ikinci hareket kanununun dönel aksamlarda da uygulanabildiği, hatta dönel aksamın %10-30 arasında ilave etkiler meydana getirebileceği bilinmektedir [8]. Nitekim Şekil 2.b, 3 ve 4’te, bu teorik bilgilerin demiryollarında bizzat gerçekleştiği örnekler görülmektedir. Şekil 2.b’de, üstyapı elemanı olarak rijit (öngerilmeli beton) ve esnek (ahşap) traversler kullanılan iki farklı demiryolu hattından geçen eşdeğer iki trenin etkisi analiz edilmiştir [9, 10]. Öngerilmeli beton traversli hatların, daha rijit yapısı nedeniyle, ortaya çıkan dinamik kuvvet değerleri artmakta ve tren tekerinde meydana gelen geometrik bozulmalarla bu fark daha da açılmaktadır. Şekil 2.a’da izah edilen fizik kuralı nedeniyle, aynı hıza sahip eşdeğer iki araçtan kum yığınına çarpan (yüksek penetrasyon, uzun temas süresi, düşük ivme) önemli bir hasara uğramazken, sert bir duvara çarpan (düşük penetrasyon, kısa temas süresi, yüksek ivme) büyük hasara uğramaktadır. Yine bu yüzden Mimar Sinan, ustalık eseri olarak ifade ettiği Selimiye

Camisinin minarelerini çok yüksek dayanım ve rijitlik gösterecek şekilde değil, dinamik deprem yükleri altında esneyebilecek ve daha fazla temas süresi sağlayabilecek şekilde; düşük elastisite modüllü esnek özel bir harç ve esnek bağlantı usulleriyle inşa ettirmiş ve "yeterli derecede esneyemeyen hiçbir şey fazla süre ayakta kalmaz" demiştir [11]. Nitekim demiryollarında da geçmişte kullanılan rijit ray-travers bağlantı elemanları zamanla terk edilerek, yerini esnek bağlantı elemanlarına bırakmıştır. Yine bunun gibi yüksek rijitliğe sahip önerilmeli beton traversler, 1960'lı yıllar itibariyle en az 40-50 yıllık servis ömrü hedeflenerek dünya genelinde yaygınlaşmaya başlamıştır. Ancak söz konusu traverslerin bu servis ömrüne ulaşamadığı ve statik yükler altında sergilediği üstün performansı, dinamik yükler altında sergileyemediği birçok çalışmada dile getirilmiş ve günümüzde çok yüksek maliyetine rağmen izolasyon tedbirleri ile alternatif kullanımlar giderek artmıştır [9, 10, 12-20].

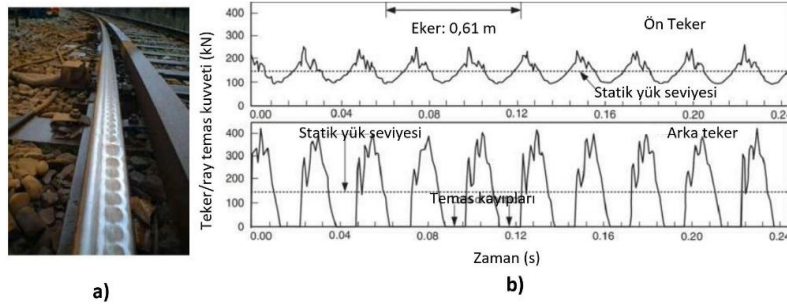


Şekil 2. a. Temas süresi ile maksimum kuvvet değerinin ilişkisini gösterir grafik **b.** rijit ve esnek demiryolunda meydana gelen dinamik kuvvetlerin farklılıkları [9, 10]

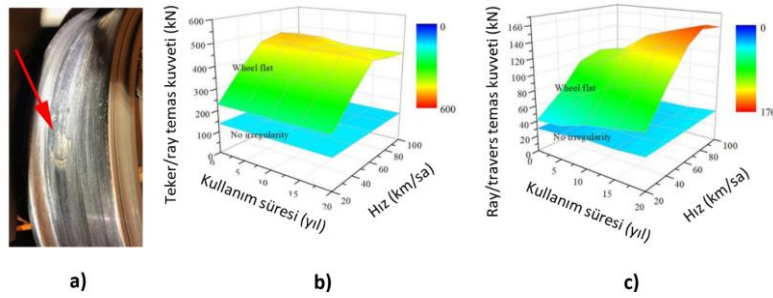
Karayolu veya demiryollarında belirtilen bu etkenler haricinde Şekil 2.b'de kısaca temas edildiği üzere bir başka etken daha büyük önem taşımakta olup, bu, tekerlerin yuvarlanma düzleminde meydana gelebilecek geometrik bozukluklardır. Ancak bu etki, demiryollarında çok daha önemlidir. Şöyle ki, karayolunda otomobilinizle ilerlerken, aracınızın küçük bir taş üzerinden geçtiğini çok zaman hissetmeyebilirsiniz. Ancak demiryollarında, karayolundaki esnek üst yapı veya hava dolgululu kauçuk tekerler yerine, ikisi de çok yüksek rijitliğe ve düşük penetrasyona sahip çelik tekerler, çelik raylar üzerinde ilerlemektedir. Bu rijitlik, balastsız hat tiplerinde ve/veya sürekli döşeme tipi beton üst yapı elemanları (slab-track vb) kullanımı halinde daha da artmaktadır. Bu yüzden demiryollarında, teker yuvarlanma düzlemini etkileyen en küçük bir bozulma dahi çok büyük ivmelere yol açmaktadır. Bu konu hakkında literatürde birçok örnek mevcut olup, iki adedi Şekil 3 ve 4'te sunulmuştur. Şekil 3.a'da raylarda meydana gelebilecek geometrik bozulmalardan birinin örneği (ondülasyon) [21] ve Şekil 3.b'de bu tarz bir demiryolunda ölçülen ray-teker temas kuvveti kaydının statik/yarı-statik kuvvetlerle karşılaştırması [22] mevcuttur. Şekil 4.a'da ise tren tekerindeki bozulma (apleti) örneği [23] ve bu etkiyle tren hızına ve hat kullanım süresine bağlı olarak dinamik kuvvetlerin artışının teker-ray (Şekil 4.b) ve ray-travers düzlemlerindeki (Şekil 4.c) analiz sonucu [24] görülmektedir.

Görüldüğü üzere, kuvvet -uygulanan- nesne veya yüzeylerin (raylar ve diğer yapı bileşenlerinin) özellikleri dinamik kuvvetleri etkilediği gibi, kuvvet -uygulayan- nesne veya yüzeyler de (tekerler ve taşıtlar) etkilemektedir. Sonuç olarak, kuvvet uygulayan veya uygulanan temas yüzeylerinin birlikte etkileşimi ile ortaya çıkan kuvvetin; etki hızı (strain rate), temas süresi (duration), ivme değeri (magnitude), frekans içeriği de değişmektedir. Bu nedenlerle örneğin modal testlerde kullanılan çekiçlerin başlıkları çeşitli rijitlik seçenekleriyle üretilmektedir. Daha rijit bir başlıkla çekiç darbesi uygulanınca, yüksek frekansları da içeren geniş bir aralıktaki frekanslar tahrik edilebilmekte, daha yumuşak bir başlıkla çekiç darbesi uygulanınca ise düşük bir ivme oluşmakla birlikte düşük frekanslar daha fazla tahrik edilebilmektedir. Sonuç olarak, dinamik kuvvetlerin, statik kuvvetlerden çok farklı olarak, çeşitli frekans içerikleri sayesinde, etkilediği cisimlerde çeşitli titreşimlere yol açma, çok sayıda yük tekrarına neden olma, çeşitli doğal frekansları tahrik edebilme ve rezonans hasarına uğratabilme kabiliyetleri bulunmaktadır [13, 16]. Demiryollarında

ise hem kuvvet uygulayan çelik teker aksamı, hem de kuvvet uygulanan çelik raylar, dinamik kuvvetlerin şiddet ve frekanslarını ve zararlı etkilerini artıran karakteristik bir özelliğe sahiptir.



Şekil 3. Ray ondülasyonu örneği [21] ve bu bozulma etkisinde dinamik kuvvetlerdeki artış [22]



Şekil 4. Tren tekerindeki apleti kusuru örneği [23] ve bu kusur nedeniyle dinamik kuvvetlerdeki artışın teker-ray düzleminde ve ray-travers düzleminde, hat kullanım süresi ve tren hızı endeksinde analizi [24]

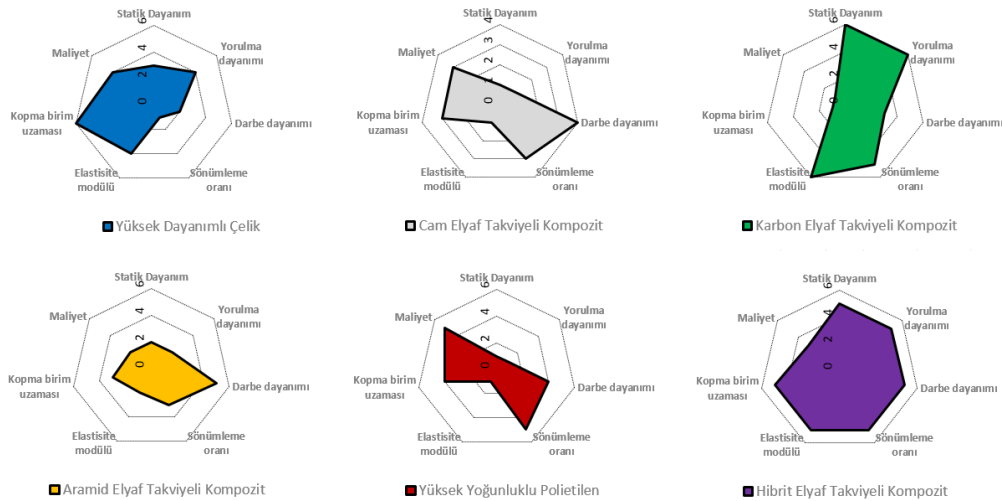
Demiryolu taşıtları -yalnızca- sabit durdukları esnada, altındaki yapı elemanlarına ve traverslere statik kuvvetler uygulamaktadır ve bu statik kuvvet değerleri, tıpkı karayollarında uygulanan istiap haddi uygulaması gibi belli değerlerle sınırlandırılmaktadır. Örnek olarak, Avrupa demiryollarında ana hatlarda izin verilen maksimum statik dingil yükü 22.5 ton.f (bazı kaynaklarda 25 ton.f) olup, bu değerler karayollarındaki ağır yüklü bir kamyonun yaklaşık 2 katıdır [25]. Söz konusu en yüksek statik tren yükü, traverslere, beton traversli ve 600 mm'lik travers aralığı (eker) mesafesi uygulanan bir hat için; teker yükünün %50'si mertebesinde etkimektedir (tek ray mesnedi için yaklaşık 55 kN) [9]. Bu değer demiryolu yapı elemanlarının ayrı ayrı ve toplu eğilme rijitliklerine ve kullanım şekline bağlı olarak kısmen artıp azalabilmektedir. Demiryollarında hat geometrisi ve yapı elemanları homojen ve ideal durumda olursa ve çelik raylar ile çelik tekerler arasında pürüzsüz bir seyir mümkün olursa, bu sürdürülmesi güç teorik demiryolu hattında, düşük hızla seyreden bir tren etkisiyle yalnızca statik ve yarı-statik (quasi-static) yükler meydana gelmektedir. Diğer bir ifadeyle bu hat'taki yapı elemanlarına bağlanan ivmeölçer sensörler, önemli bir ivme değişimi okumayacak, daha açık bir ifadeyle bu trende seyreden yolcuların bardaklarındaki kahvede hiçbir dalgalanma meydana gelmeyecektir. Bu hat'taki traverslerin ivme değerleri yer çekim ivmesine (1 G) çok yakındır ve oluşan kuvvetlerin frekans bileşenleri 0.1-0.2 Hz'i geçmemektedir. Demiryolu traverslerine laboratuvar ortamında uygulanan pozitif ve negatif moment tayini testlerinin, yükleme hızları (strain rate) oldukça düşük olduğundan ve traverslerde önemli bir ivme değişimi oluşturmadığından, statik ve yarı-statik demiryolu yüklerini temsil ettiği kabul edilmektedir. Bununla birlikte, demiryolu traversi dizaynında, nominal bağlamda en fazla 1,5-3 G'lik bir etki de oluşabileceği varsayılarak, çeşitli hat ve travers tipleri için 150 kN'a varan tek ray mesnedi yükü, travers dizayn yükü olarak (F_{r0}) kabul edilmektedir [9, 14, 17]. Ancak belirtilen ideal demiryolunu inşa etmek, inşa edilse bile uzun süre bu halde korumak imkânsız gibidir. Gerçek dünyada demiryollarında gerek raylar gerek tekerler gerekse hat geometrisi çok zaman bu ideal mükemmelliğe sahip olmayabilmektedir. Tekerlerdeki ve raylardaki kusurlar (apleti, ondülasyon vb.), ray birleşim bölgelerindeki hatalar, hat rijitliği değişkenlikleri ve her tip geometrik ve

mekanik değişim ve bozulmalar, demiryolu kuvvetlerinin şiddet/frekanslarının artmasına ve statik/yarı-statik karakteristiklerinden çıkmasına neden olmaktadır. Bu durumun en büyük etkenlerinden biri, demiryollarına adını veren hareket tipi olan; çelik tekerlerin çelik raylar üzerinde ilerlemesidir. Çok yüksek rijitliğe ve düşük penetrasyon ve sönümlemeye sahip iki yüzey, çelik raylar ve çelik tekerler arasındaki dinamik etkileşim, çok minik bir ara yüz kusuru veya geometrik bozukluk olsa dahi dinamik yüklerin ivme ve frekanslarının katlarca artmasına neden olmaktadır. Nitekim günümüze kadar yapılan ve birkaç örneği Şekil 2, 3, ve 4'te sunulan sayısız saha ölçümlerinden de görüleceği üzere, demiryollarında geçmişte kabul edilenden çok daha yüksek şiddet ve frekansa sahip ivmeler meydana gelmekte, raylar üzerinden alınan ivme değerleri 50 G'nin dahi üzerine çıkabilmekte, frekans bileşenleri ise binlerce Hz'e varabilmektedir.

Günümüze kadar yapılmış ve halen devam eden saha ölçüm sonuçlarından elde edilen bu denli yüksek dinamik yüklerin, demiryolu elemanlarında kısa sürede ağır hasar vermemesinin nedenlerinden biri, demiryollarında etkiyen dinamik kuvvetlerin zirveye çıktığı (high strain rate) ve zirvede kaldığı (short duration) sürelerin, Şekil 3.b'den görüldüğü üzere, birkaç milisaniyeyi geçmemesidir. Örnek vermek gerekirse, bu durumum bir benzeri metal kaynağı yapan işçilerde görülmektedir. Kaynak işlemi esnasında meydana gelen zirve gürültü değeri (dB(A)_{peak}) bir uçağın jet motorunun gürültü seviyesine yakındır. Ancak kaynak işlemi esnasında görülen bu zirve gürültü değerleri, çok kısa zamanda, birkaç milisaniye içerisinde meydana gelip kalkmaktadır. Ancak bu çok kısa süreli etkiler, beyin tarafından çok zaman yüksek gürültü olarak algılanmadığından, ilgili çalışanın kulak koruyucu kullanmaması halinde, kulak zarlarında zamanla ilerleyen önemli tahribatlara rastlanabilmektedir. Sonuç olarak, çelik raylar ve yüksek eğilme rijitliğine sahip traverslerden inşa edilmiş demiryollarında meydana gelen yüksek şiddet ve frekanslar, uzun zaman diliminde, nedeni çok defa anlaşılamayan, aşırı titreşimlere, geometrik bozulmalara, yorulma ve rezonans hasarlarına ve faydalı servis ömrünün erken vadede tükenmesine neden olmaktadır [13, 16]. Öyle ki; demiryolu bakım elemanlarınca bu durum olağan ve kaçınılmaz bir döngü olarak kanıksanabilmektedir. Dinamik kuvvetler, özellikle tren işletim sıklığı ve hızlarının artması ile günümüzde, geçmişten çok daha önemli hale gelmiştir [15, 18, 20]. Bununla birlikte dinamik kuvvetlerin üzerinde yeterince durulmamış, buna uygun testler ve dizayn yöntemleri yaygınlaşmamıştır. Mevcut traverslerin dizayn ve kabul aşamalarında kullanılan dinamik ve yorulma testlerinde yükleme-kaldırma-tekerrür yükleme esaslı hızlı yük çevrimleri (cyclic loading) uygulanmaktadır [9]. Ancak bu esnada uygulanan çevrim hızı 3-5 Hz dolaylarındadır. Bu deneylerle, yine nerdeyse kusursuz bir ray-teker etkileşimine sahip ve çok düşük hızlı (≈ 10 km/sa) bir trenin etkisi simüle edilmektedir. Bu testler için dinamik test ibaresinin kullanılması doğrudur, çünkü traverslere etkiyen kuvvetler test müddetince artıp azalarak değişmektedir ve ivme değişimi de mevcuttur. Ancak ivme, frekans, şiddet ve çevrim sayısı bakımından oldukça düşük kalması gibi nedenlerle demiryolunu yeterli derece simüle etmediği ve yeterli dinamik etkiye sahip olmadığı yönünde eleştiriler oldukça fazladır [12].

Buraya kadar sunulan bilgiler ışığında, demiryolu yapı elemanlarının düşük eğilme rijitliğine ve yüksek esnekliğe sahip bir şekilde dizayn edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, demiryolu yapı elemanlarının gerekli -optimum- rijitlik ve uzama katsayısına (% elongation) sahip olmasıdır. Bu optimum değerlerden daha fazla veya daha düşük bir uygulama, bir açıdan avantaj sağlayabilecekken, başka açılardan büyük dezavantajlara neden olabilecektir. Yeterli çekme, basınç ve kesme dayanımı ile yeterli kopma uzaması yüzdesi elde edilmeksizin, tek başına düşük eğilme rijitliği veya tek başına yüksek uzama katsayısı elde edilmesinin, tüm faktörler göz önünde bulundurulduğunda, en iyi performansı sağlamayacağı aşikârdır. Bu konuda basit bir örnek olarak, saf cam malzemelerin ortalama 70 GPa elastisite modülü vardır. Bu değer, örneğin kurşun-geçirmez yelek imalatında yaygın olarak kullanılan aramid fiberli kompozitlerin elastisite modülüyle benzerdir. Ancak saf camın nihai birim deformasyonu çok düşük olduğundan ($\approx 0,1$), en ufak bir darbeye dahi kırılabilir, oldukça gevrek malzemelerdir. Bu basit örnekteki gibi, yüksek uzama katsayısına sahip fakat ihtiyaç

duyulandan daha düşük eğilme rijitliğine sahip ve/veya çok hafif malzemelerin demiryolunda kullanımı uygun olmayabilecektir. Çünkü demiryolu traverslerinin en önemli görevi, iki ray arasındaki yatay ve dikey milimetrik mesafeleri (ekartman) korumaktır. Bu görevini yerine getirmesi için yeterli kütleye sahip olması ve aşırı elastik ve plastik deformasyona uğramaması gerekmektedir. Özellikle yüksek hızlı demiryolu hatlarındaki kritik mesafelerin dinamik demiryolu kuvvetleri altında birkaç milimetreden fazla değişmesi, yalpa hareketleri vb. nedenlerle dinamik kuvvetlerin artmasına, dahası deray denilen, tren tekerlerinin raydan düşmesine ve kazalara neden olabilmektedir [15]. Gereğinden fazla düşük eğilme rijitliğine veya yetersiz kütleye sahip (örneğin bazı plastik/kompozit tipi) traversler, hat esneme direncinin gereğinden fazla düşük olmasına, yolun kaymasına veya havalanmasına, raydaki eğilmelerinin ve hat deformasyonunun artmasına neden olabilmektedir. Bunun zıddı olarak, optimum düzeyden daha yüksek eğilme rijitliğine sahip sürekli döşeme tipi (slab-track vb.) uygulamalarda ise, ray bağlantı elemanlarında, ray yüzeylerinde ve balast parçacıklarında erken dönemde hasarlar ve kırılmalara dikkat edilmelidir [26]. Özet olarak, her projede ihtiyaç duyulan parametreler ve önem sıralamaları değişkenlik göstermektedir. Birçok projede dinamik darbe veya titreşimlere dayanıklılık göstermenin yanı sıra, başka mühendislik özelliklerinin de sağlanması gerekmektedir. Örneğin korozyon ve benzeri çevresel etkenlere dayanıklılık (traversler [12], iskele yapıları vb.), düşük birim hacim ağırlık (güçlendirme, havacılık vb.) veya yeterli ağırlığa sahip olma (traversler [9] vb.), termal etkilere dayanıklılık (uzay, savunma, havacılık vb.), tekrarlı yükler etkisinde düşük plastik deformasyon ve yüksek yorulma direnci gösterme (traversler [17], rüzgâr panelleri, uzay, havacılık vb.) gibi birçok parametre de söz konusu olabilmektedir. Bu konuda örnek bir analiz Şekil 5'te sunulmuştur. Bu analizde 7 parametre dikkate alınarak, 6 malzeme alternatifi değerlendirmeye sokulmuştur. Görüldüğü üzere, her durum için mükemmel özelliklere sahip bir malzeme söz konusu olmayabileceğinden ve/veya bu malzemenin kullanımı ekonomik olmayabileceğinden, dizayn ve karar mercilerinin, Şekil 5'te örneği sunulduğu gibi, elindeki materyalleri karşılaştırarak, risk hiyerarşisine uygun bir şekilde ve karşılaşılabilecek sorunları ilk önce kaynağında çözmeye çalışarak [9, 13, 16], istenilen parametreleri optimum düzeyde sağlayacak malzemeyi veya hibrit uygulamayı kullanması gerekecektir.



Şekil 5. Çeşitli malzemelerin proje ihtiyaçlarını karşılama oranlarının radar analizleriyle karşılaştırılması

2. Metot

Giriş bölümünde aktarıldığı üzere demiryollarında yüksek değerli dinamik kuvvetler kaçınılmaz olarak meydana gelmektedir ve demiryolu traverslerinin dinamik kuvvetlere dayanımı, en az statik dayanımları kadar önemlidir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında Şekil 6'da fotoğrafı verilen cihazla, demiryolu darbe yüklerini temsil edecek darbe simülasyonları yürütülmüştür. Deney süresince mesnet aralığı, EN 13230 travers deneylerinde uygulandığı üzere 60 cm olarak

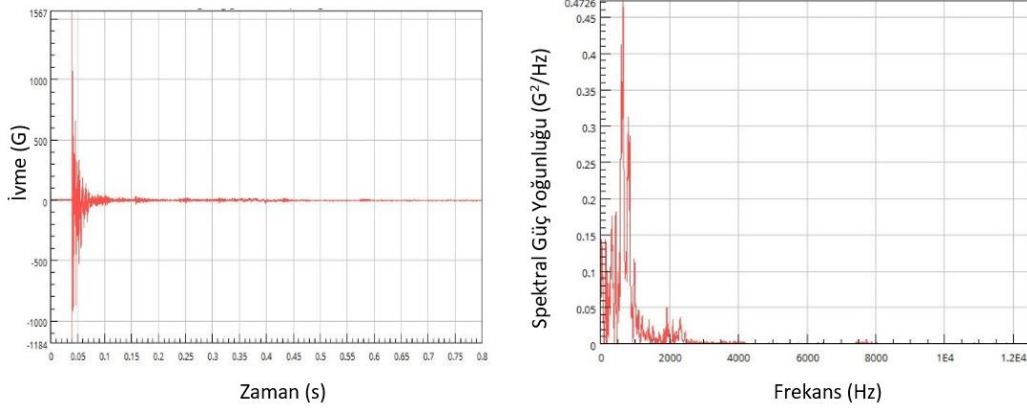
ayarlanmıştır. Demiryollarındaki yüksek hızlı (7500 mm/sn) darbe etkisini meydana getirmek için sabit 3,00 metre yükseklikten serbest kütle düşüşleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler esnasında veri örnekleme hızı 100 kHz'e ayarlı NI cDaq veri toplama sistemi kullanılmıştır. Yaklaşık 23 kg ağırlığa sahip kütlelerin 3 metre yükseklikten travers üzerine düşüşü esnasında, düşüş yapan kütle üzerine monte edilen piezorezistif ivmeölçer yardımıyla alınan ivme kaydı, nCode® analizleriyle, giriş kısmında belirtildiği şekliyle, Newton'un ikinci hareket kanunu doğrultusunda hesaplamaya tabi tutulmuştur. Düşen kütle etkisiyle üstte meydana gelen dinamik temas kuvvetleri bu şekilde hesaplanırken, enerji kayıpları ve deformasyonlar ardından travers tabanından ölçülen çevreye yayılan kuvvet etkisi, mesnetlere yerleştirilen 2 adet yük hücresi (loadcell) vasıtasıyla ölçülmüştür. Ayrıca travers üzerine yerleştirilen piezoelektrik ivmeölçer ile traversteki ivme değerleri de analiz edilmiştir. Çalışma süresince farklı şiddet, etki hızı, etki süresi ve frekans bileşenlerini elde etmek adına, eş yükseklikten bırakılan kütleler, farklı penetrasyon, esneklik ve eğilme rijitliğine sahip ara yüzeylere düştükçe, kuvvet uygulayan ve uygulanan elemanlar üzerindeki ivmeölçer sensörleriyle dalar toplanıp, ara yüzey etkisi ortaya konulmuştur. Bu kapsamda öngörülmesi ve öngörülmesi beton traverslere çıplak vaziyette iken ve plastik ve/veya metal ara yüzeyler konarak, ölçülen dinamik kuvvetlerin; hız (velocity), ivme (acceleration), temas kuvveti şiddeti (contact force magnitude) ve frekans içerikleri analiz edilmiştir.



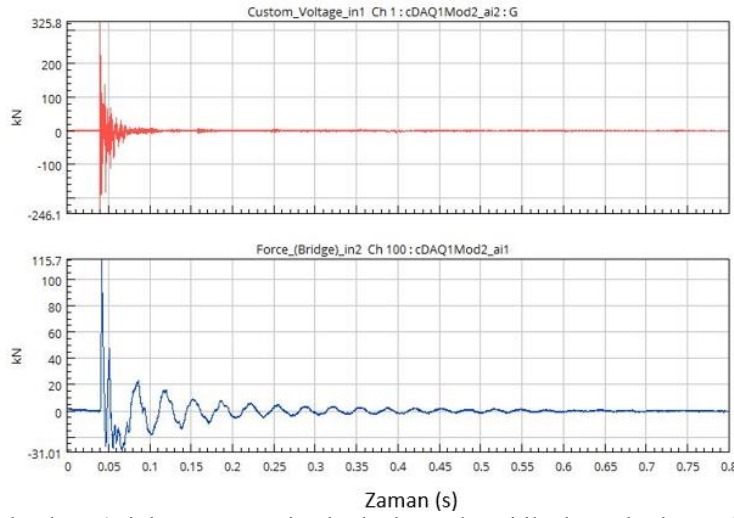
Şekil 6. Simülasyonlarda kullanılan çarpma çerçevesi, travers numunesi, ara yüzeyler ve sensörler

3. Bulgular

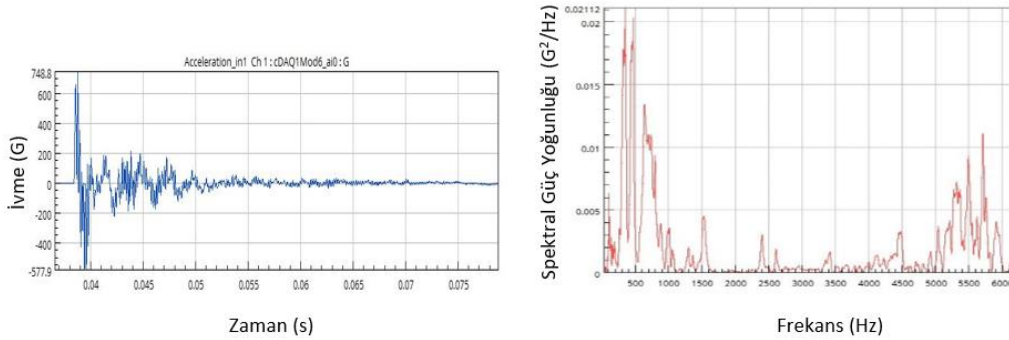
Simülasyonlar esnasında, direkt olarak B70 tipi beton travers üzerine kütle düşürülmesiyle elde edilen ivme kaydı (G) ve bu ivme kaydının frekans dağılımı PSD-RMS (karekök ortalaması cinsinden spektral güç yoğunluğu) cinsinden analiz edilerek Şekil 7'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere rijit karaktere sahip, yüksek dayanımlı (C50/60 basınç dayanımı sınıfında ve yaklaşık 36 GPa elastisite modülüne sahip) beton kullanılarak üretilen bu öngörülmesi beton traverste, 1567 G ivme meydana gelmiş, ivme kaydının frekans dağılımı ise 2400 Hz'lere kadar etkisini sürdürmüştür. Söz konusu ivme kaydının analizi ile elde edilen dinamik temas kuvveti ile mesnet reaksiyonları Şekil 8'de sunulmuş olup, en yüksek değerleri yaklaşık 325 kN olan temas kuvveti ve 115 kN mesnet reaksiyonu söz konusudur. Bu dinamik kuvvet etkisiyle travers üzerinden alınan ivme kaydı ve PSD-RMS cinsinden frekans analizi Şekil 9'da sunulmaktadır. Söz konusu ivme kaydı incelendiğinde, en yüksek ivme değerinin yaklaşık 750 G olduğu, 6000 Hz'lere kadar etkisini sürdürdüğü ve en yüksek RMS değerinin yaklaşık 0,021 G²/Hz olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Direkt olarak B70 tipi travers üzerine kütle düşürülmesi sonucunda elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G²/Hz, Hz)



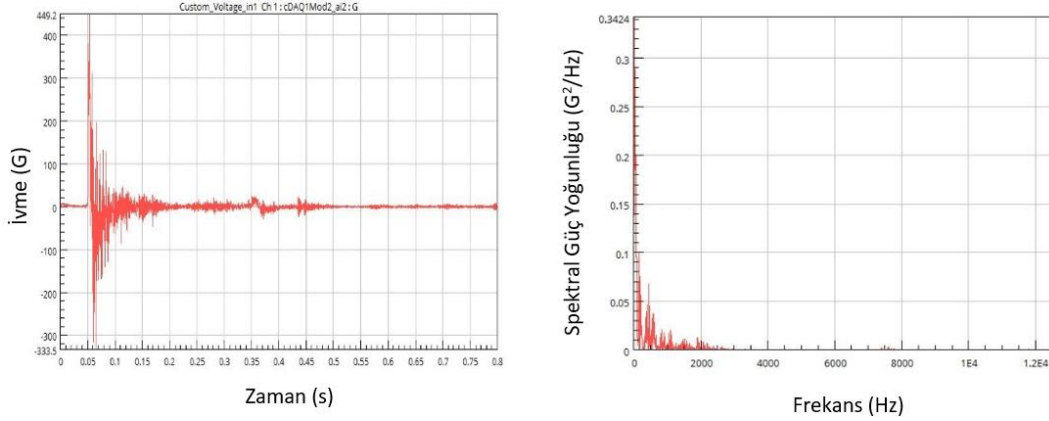
Şekil 8. Direkt olarak B70 tipi travers üzerine kütle düşürülmesi ile düşen kütle üzerinden elde edilen temas kuvveti (kN, saniye) ve mesnet reaksiyon kuvveti (kN, saniye) grafikleri



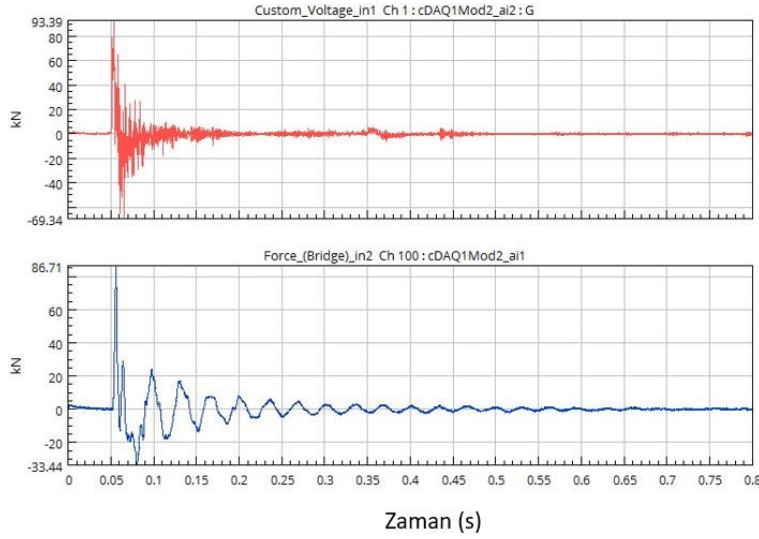
Şekil 9. Direkt olarak B70 tipi travers üzerine kütle düşürülmesi ile travers üzerindeki ivmeölçerden elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G²/Hz, Hz)

Travers üzerine, demiryolunda kullanılan Şekil 6'da görülen polyamid-6 elastik selet (elastisite modülü 2 GPa) konulması ardından, aynı kütle, eş yükseklikten serbest bırakılmıştır. Elde edilen ivme kaydı (G) ve bu ivme kaydının frekans dağılımı PSD-RMS cinsinden analiz edilerek Şekil 10'da sunulmuştur. Görüldüğü üzere rijit karaktere sahip öngerilmeli beton traversin üzerine düşük modüllü ve yüksek penetrasyon/deformasyon kabiliyetli bir malzeme konulunca, yalnızca 450 G ivme meydana gelmiş, bu durum ivme kaydının frekans dağılımını çok değiştirmezken şiddetini düşürmüştür. Hesaplanan temas kuvveti ile mesnet reaksiyonları Şekil 11'de sunulmuş

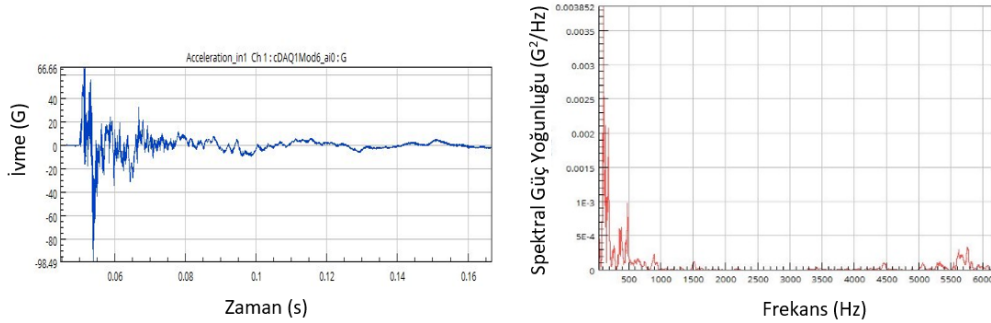
olup, en yüksek değerleri sırasıyla yaklaşık 95 kN ve 85 kN'dur. Bu dinamik kuvvet etkisiyle travers üzerinden alınan ivme kaydı ve PSD-RMS cinsinden frekans analizi Şekil 12'de sunulmaktadır. Söz konusu ivme kaydı incelendiğinde en yüksek ivme değerinin yaklaşık 100 G olduğu, 1000 Hz'lerden sonra etkisini kaybettiği ve en yüksek RMS değerinin 0,004 G²/Hz ile oldukça düşük olduğu görülmektedir. Görüldüğü üzere elastik selet etkisiyle, hem traverse etkileyen, hem de çevreye yayılan dinamik kuvvetlerin şiddet ve frekans dağılımı düşmüştür.



Şekil 10. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet konularak kütle düşürülmesi ile elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G²/Hz, Hz)

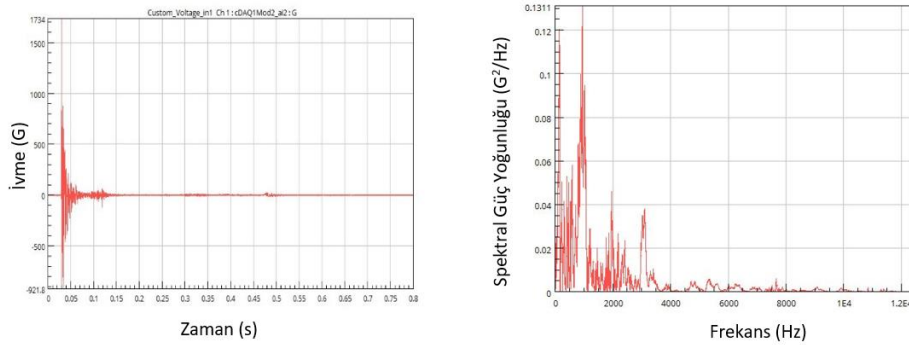


Şekil 11. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet konularak kütle düşürülmesi ile düşen kütle üzerinden elde edilen temas kuvveti (kN, saniye) ve mesnet reaksiyon kuvveti (kN, saniye) grafikleri

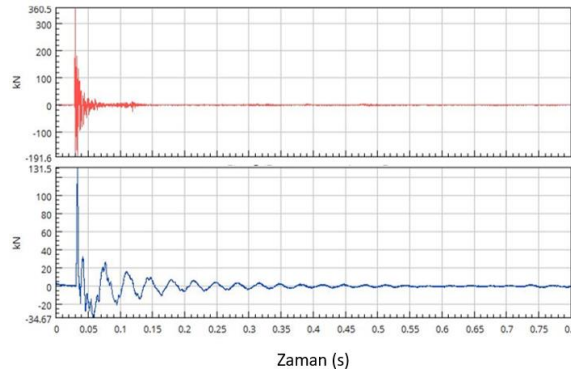


Şekil 12. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet konularak kütle düşürülmesi ile travers üzerindeki ivmeölçerden elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G²/Hz, Hz)

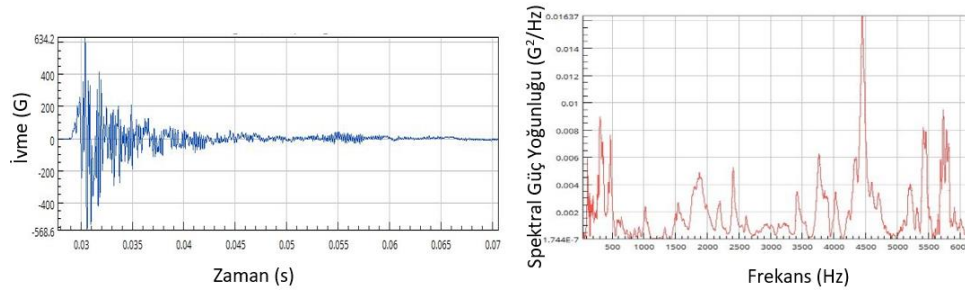
B70 tipi travers üzerine, Şekil 6'da görüldüğü şekilde, 1 adet elastik selet ve ray rijitliğini temsil edecek 1 adet EN 13230-2 standardında geçen 1/40 eğimli çelik ara plaka (elastisite modülü yaklaşık 200 GPa) konulması ardından, aynı kütle, eş yükseklikten serbest bırakılmıştır. Bu şekilde elde edilen ivme kaydı (G) ve frekans dağılımı PSD-RMS cinsinden analiz edilerek Şekil 13'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere travers üzerinde elastik selet bulunmasına rağmen yüksek modüllü ve düşük penetrasyon kabiliyetli çelik son-ara-yüzey etkisiyle, 1734 G'lik ivme meydana gelmiş, frekans dağılımı ise 8000 Hz'lere kadar etkisini sürdürmüştür. Söz konusu ivme kaydının analizi ile elde edilen dinamik temas kuvveti ve mesnet reaksiyonları Şekil 14'te sunulmuş olup, sırasıyla yaklaşık 360 kN ve 132 kN'dur. Bu dinamik kuvvet etkisiyle travers üzerinden alınan ivme kaydı ve PSD-RMS cinsinden frekans analizi Şekil 15'te sunulmaktadır. Söz konusu ivme kaydı incelendiğinde en yüksek ivme değerinin yaklaşık 635 G olduğu, 6000 Hz'lere kadar etkisini devam ettirdiği ve en yüksek RMS değerinin yaklaşık 0,016 G²/Hz olduğu görülmektedir. Tüm bu simülasyonlar esnasında traverslerde gözle görülebilir bir hasar meydana gelmemiştir.



Şekil 13. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet ve üzerine çelik plaka konularak kütle düşürülmesi ile elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G²/Hz, Hz)



Şekil 14. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet ve üzerine çelik plaka konularak kütle düşürülmesi ile düşen kütle üzerinden elde edilen temas kuvveti (kN, saniye) ve mesnet reaksiyon kuvveti (kN, saniye)



Şekil 15. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet ve üzerine çelik plaka konularak kütle düşürülmesi ile travers üzerindeki ivmeölçerden elde edilen ivme kaydı ve frekans dağılımı (PSD RMS)

Elde edilen tüm datalar toplu halde Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Dinamik demiryolu kuvveti simülasyonları sonucunda elde edilen örnek veriler

Travers tipi	Son ara yüzey tipi ve elastisite modülü	Hesaplanan Temas Kuvveti (kN)	Mesnet Reaksiyon Kuvveti (kN)	İvme (Düşen Kütle) (G)	Etkin Frekans (Düşen Kütle) (Hz)	İvme (Travers) (G)	Frekans Amplitude Değeri (RMS-PSD) (G ² /Hz)	Etkin Frekans (Travers) (Hz)
B70 tipi travers	Beton (36 GPa)	325	115	1567	0-2400	750	0,021	0-6000
B70 tipi travers	Elastik selet (2 GPa)	95	85	450	0-2400	100	0,004	0-1000
B70 tipi travers	Çelik plaka (200 GPa)	360	132	1734	0-8000	635	0,016	0-6000

4. Sonuç

Çalışma kapsamında yürütülen simülasyon çalışmaları neticesinde, dinamik kuvvet uygulayan veya uygulanan malzemelerin dinamik özelliklerine bağlı olarak, ortaya çıkan dinamik kuvvet ve ivme değerleri ile ve frekans dağılım ve şiddetinin, ayrıca kuvvet etki hızı ve temas süresinin oldukça değiştiği görülmüştür. Buna göre, diğer faktörler eşdeğer kalmak şartıyla; daha zor esneyen, elastisite modülü yüksek, rijit, yüksek yoğunluklu ve düşük boşluklu, penetrasyon ve deformasyona müsaade etmeyen nesnelere veya yüzeylere dinamik kuvvet uygulandığında, ortaya çıkan ivme değerlerinin daha yüksek olduğu ve dolayısıyla daha yüksek kuvvetler ortaya çıktığı görülmüştür. Nitekim uygulanan simülasyon çalışmalarında en şiddetli dinamik kuvvetler, öncelikle çelik ara yüzeylerde (1734 G, 360 kN), daha sonra ise yüksek dayanımlı betonlarda (1567 G, 325 kN) ölçülmüş, belirtilen bu özelliklerin aksinde karakter sergileyen elastik selet ara yüzünün ise dinamik kuvvetlerin değerini %70'in üzerinde düşürdüğü (450 G, 95 kN) görülmüştür. Bu durum söz konusu dinamik kuvvetlerin frekans dağılımı ve şiddeti için ve ayrıca çevreye yayılan dinamik kuvvetlerin değerleri için de benzerdir. Buna ilaveten, demiryollarına adını da veren çelik teker ve çelik rayların etkileşimi ile ortaya çıkan dinamik kuvvetlerin, diğer mühendislik sahalarından görülen dinamik kuvvetlerden farklılığı daha iyi anlaşılmıştır. Dolayısıyla, demiryolu yapı elemanlarının servis ömürleri boyunca üzerine etkiyen yüklerin tamamına yakınının da dinamik kuvvetler olması nedeniyle, bu kuvvetleri karşılayacak optimum yapı elemanları (örneğin demiryolu traversleri) dizayn edilirken, hemen izolasyon tedbirlerine başvurulması yerine, risk kontrol hiyerarşisine uygun dinamik dizayn yöntemleri kullanılarak; optimum elastisite modülü ve rijitlik ile yeterli esneklik ve yüksek sönümleme oranına sahip demiryolu yapı elemanları (örneğin optimum eğilme rijitliğine sahip traverslerin) dizaynının, tüm demiryolu yapı elemanlarının servis ömürlerini optimum şekilde artıracığı kanaatine varılmıştır. Ayrıca demiryollarındaki gerçek dinamik kuvvetleri temsil edebilecek dinamik test yöntemlerinin önemi ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, çalışmada kullanılan simülasyon yönteminin; demiryolu yapı elemanlarının dizayn ve kabulü aşamasında kullanılabilecek, demiryolu yüklerini simülasyona elverişli ve hızlı bir test metodu olduğu görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK Ardeb Dairesi Başkanlığı'nın 120M403/2020 sayılı projesi kapsamında desteklenmiştir. Çalışmadaki katkılarından dolayı Sakarya Üniversitesi Araştırma Görevlileri M. Burhan NAVDAR ve İrfan Ş. ÖZTÜRK'e teşekkürlerimizi bildiririz.

Kaynakça

- [1] “Design Factors for Dynamic Loads,” [Online]. Available: <https://schaefer-inc.com/design-factors-dynamic-loads/> [09.03.2022]
- [2] L. Dong, R. Lakes, “Advanced damper with high stiffness and high hysteresis damping based on negative structural stiffness,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 50, pp. 2416–2423, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.03.018>
- [3] W. Woigk, K. Masania, F. Stork, A. Heusi, E. Poloni, A. R. Studart, Bio-Inspired Platelet-Reinforced Polymers with Enhanced Stiffness and Damping Behavior, *ACS Applied Polymer Materials*, vol. 2, pp. 3557-3565, 2020, doi: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsapm.0c00568>
- [4] “Viscoelastic Materials - Internal friction in solids – Viscoelasticity - Anelastic solids,” [Online]. Available: <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/VE.html> [09.03.2022]
- [5] “Impact Force from Falling Object,” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/flobi.html> [09.03.2022]
- [6] “Impulse - Force time graphs,” [Online]. Available: <https://sites.google.com/a/perthgrammar.co.uk/physics/courses/higher/our-dynamic-universe/13-collisions-explosions-and-impulse/135-force-time-graphs> [09.03.2022]
- [7] “What is Linear Momentum,” [Online]. Available: <https://pediaa.com/what-is-linear-momentum/> [09.03.2022]
- [8] M. K. Jain, “Train, grade, curve and Acceleration Resistance,” 2013. [Online]. Available: <https://www.railelectrica.com/traction-mechanics/train-grade-curve-and-acceleration-resistance-2/> [09.03.2022]
- [9] F. Çeçen, “Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforced concrete railway sleepers,” Master Thesis, Gazi Osman Paşa University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 156 pages, Tokat, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22723.43049>
- [10] C. Esveld, *Modern railway track*. ISBN 978-1-326-05172-3, 2014
- [11] “Gizemli tarih: Mimar Sinan,” [Online]. Available: <https://www.trtizle.com/belgesel/gizemli-tarih/gizemli-tarih-mimar-sinan-4805412> [09.03.2022]
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] B. Aktaş, F. Çeçen, H. Öztürk, İ. M. B. Navdar, 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>
- [17] 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>
- [18] 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>
- [19] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. M. B. Navdar, 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>
- [20] 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>
- [21] Z. Cai, “Modelling of rail track dynamics and wheel/rail interaction,” Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Queen’s University, Ontario, Canada, 1992.

- [22] H. Tsunashima, A. Matsumoto, T. Mizuma, H. Mori, Y. Naganuma, "Condition Monitoring of Railway Track Using In-Service Vehicle," *J. Mech. Syst. Transport. Logist.*, vol. 3 (1), 2012, doi: <https://doi.org/10.1299/jmtl.3.154>
- [23] "Trains get flat tires too," [Online]. Available: <https://www.valleymetro.org/blog/operations-service/2019/12/trains-get-flat-tires-too> [09.03.2022]
- [24] C. Ngamkhanong, K. Goto and S. Kaewunruen, "Dynamic responses of railway ballasted track considering rail pad deterioration," *Modern Practice in Stress and Vibration Analysis (MPSVA). IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, vol. 1106 (2018), no. 012006, 2018, doi :10.1088/1742-6596/1106/1/012006
- [25] E. Early, "Part II: That's a load ... off my mind," 2018. [Online]. Available: <https://www.conteches.com/pipe-article/article/147/part-ii-thats-a-load-off-my-mind> [09.03.2022]
- [26] E. Berggren, "Railway track stiffness. Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance," Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009.

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



Hakan ÖZTÜRK

Doktora Eğitimini Sakarya Üniversitesinde tamamlayan yazar, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Yapı alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan makaleleri bulunmaktadır.

E-Posta: hakanozturk@sakarya.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. Hakan ÖZTÜRK: Görselleştirme, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Yeni LCR Tipi Traverslerin Demiryolu Hat Rijitliğine Etkisinin Araştırılması

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: 19.04.2022, Kabul/Accepted: 02.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Bu çalışma kapsamında, demiryolu hat rijitliği ve traverslerin eğilme modüllerinin bu hat rijitliğine etkisi, geniş bir literatür taraması, basitleştirilmiş örneklendirmeler ve karşılaştırmalı deneylerle incelenmiştir. Deneyler esnasında, standart B70 tipi önerilmeli beton demiryolu traversleri ve ülkemizde son yıllarda geliştirmeye alınan yeni LCR tipi traversler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, yeni tip traverslerin kütlesi ve eğilme modülü bakımından, ahşap traverslerin optimum eğilme modülü avantajını ve beton traverslerin yüksek kütle ve çevresel dayanıklılık avantajlarını bir araya getirerek, optimum bir çözüm sağladığı görülmüştür. Ayrıca sahip olduğu bu optimum eğilme modülünü, servis ömrü boyunca koruyup koruyamayacağı da incelenmiş ve yeni tip traverslerin tekrarlı yükleme adımlarında eğilme modülünü büyük oranda koruduğu ve yüksek değerli yüklere rağmen plastik deformasyonlarının en az önerilmeli rakipleri kadar düşük olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Demiryolu hat rijitliği, Hat esneme direnci, Hat modülü, Travers eğilme modülü

Investigation of the Effect of New LCR Type Sleepers on Railway Track Stiffness

Abstract: In this study, the railway track stiffness and the effect of the flexural modulus of sleepers on track stiffness were investigated. For this purpose, an extensive literature review, simplified examples, and comparative tests were used. During the tests, standard B70 type prestressed concrete railway sleepers, and the new LCR type sleepers which have been developed in Türkiye, were used. As a result of the study, it has been seen that the new type of sleepers provides an optimum solution in terms of mass and flexural modulus, combining the optimum flexural modulus advantage of wooden sleepers and the high mass and environmental durability advantages of concrete sleepers. In addition, it has been examined whether it can maintain this optimum modulus throughout its service life, and it has been observed that the new type of sleepers largely maintains its flexural modulus during repeated loading steps. In addition, plastic deformations occurring even at high load levels are at least as low as seen in prestressed competitors.

Keywords: Railway track stiffness, Track flexural resistance, Track module, Sleeper flexural modulus

1. Giriş

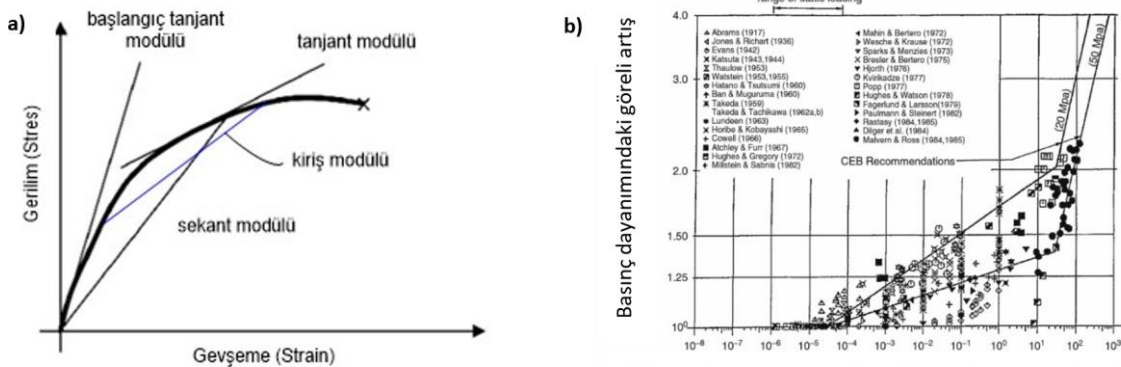
Elastisite modülü, gerilme uygulanan bir malzemenin deforme olmaya karşı sergilediği karakteristik direnci gösteren bir ölçüm birimidir [1]. Elastisite modülü, mikro ölçekte atomlar arası bağlardan, makro ölçekte sürtünme etkisine, yükleme hızına, yönüne ve mertebesine, deformasyon ölçüm yöntemine ve malzemenin sıcaklığına kadar birçok faktörden etkilenmektedir. Ancak malzemenin boyutundan, şeklinden ve mesnetleme faktörlerinden bağımsızdır. Örneğin S220 sınıfı çelik bir malzemenin Young elastisite modülü ortalama 200 GPa olup, bu değer söz konusu malzemenin boyutlarından, biçiminden ve mesnet düzeneğinden bağımsızdır.

Rijitlik terimi ise (İngilizce “stiffness” manasıyla) elastisite modülünün yanı sıra, boyut, şekil ve mesnetleme faktörleri gibi çeşitli dış etkenlere de bağlı olan, nispeten daha kolay belirlenebilen, benzer bir direnç davranışını işaret etmektedir. Sonuçta, elastisite modülü, hammaddelerin

Atıf için/Cite as: F.Çeçen, B.Aktaş, “Yeni LCR tipi traverslerin demiryolu hat rijitliğine etkisinin araştırılması,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 36-50, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1105999

sergilediği karakteristik bir özellik iken; rijitlik, bu hammadde veya kompozit ürünle üretilmiş bir komponent veya yapının özelliğidir [2]. Örneğin klasik bir çimento harcının elastisite modülü 10-30 GPa aralığında değer almaktadır. Ancak aynı elastisite modülüne sahip çimento harcı ile üretilen farklı boyutlardaki numunelerin rijitlikleri farklı sonuçlar vermektedir. Bunun gibi, boyutları ve elastisite modülü aynı olan iki çimento harcı numunesine, eğilme deneyi uygulandığında, mesnet aralığı değişince, daha kısa mesnet aralığında daha yüksek rijitlik elde edilmektedir. Genel olarak, daha yüksek elastisite modülüne sahip malzemeler kullanıldığında, daha yüksek rijitliğe sahip yapılar elde edilmektedir. Bu yüzden, literatürde bu iki terimin zaman zaman birbiri yerine kullanıldığı da görülmektedir. Gerek elastisite modülü, gerekse rijitlik değerleri demiryollarının dizayn ve kullanım sürecinde ihtiyaç duyulan önemli parametrelerdir. Bununla birlikte elastisite modülüne daha çok dizayn aşamasında, rijitlik değerine ise hem dizayn hem kullanım aşamasında ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü şekil, boyut ve mesnet etkenlerinden arındırılarak elde edilen elastisite modülü, örneğin farklı traverslerin demiryolu hattında sergileyeceği farklı direnimsel davranışlarını değerlendirmekte yeterli bilgi sağlamayacaktır. Elastisite modülü değerlerine, daha çok demiryolu hatlarının modellenmesi esnasında, örneğin sonlu eleman analizlerinde hammaddeler tanımlanırken ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüze kadar, gerilme ve birim şekil değiştirmenin ölçüm yöntemlerine bağlı olarak, birçok farklı elastisite modülü tanımlanmıştır. Young modülü, kesme modülü, Bulk modülü, kopma modülü ve eğilme modülü bunlardan birkaçıdır [1]. Homojen ve izotropik bir materyal için, ideal şartlar altında, eğilme, çekme ve basınç modülleri veya eğilme ve çekme dayanımları birbiri ile eşittir [3]. Ancak birçok katı materyal, homojenliğine ve izotropik veya anizotropik olmasına göre farklı eksenlerde, farklı elastisite modülü sergilemektedir [1]. Örneğin travers imalatında da kullanılan ahşap malzemelerin içerdiği liflere paralel istikamette elastisite modülü ortalama 12,5 GPa iken, liflere dik ekseninde ortalama 0,6 GPa'dır. Bunun gibi gerilme-deformasyon davranışı lineer (doğrusal) olmayan malzemelerin, gerilme-deformasyon eğrilerinin farklı bölgelerinde farklı eğimler ve dolayısıyla farklı elastisite modülleri göstermesi de söz konusudur. Örneğin beton hammaddenin gerilme-deformasyon davranışı genel olarak lineer değildir. Bununla birlikte beton malzemelerin nihai dayanımlarının yaklaşık %30'luk seviyesine kadar lineer ve elastik davranış sergilediği kabul edilmektedir [4]. Lineer davranış sergilemeyen bu malzemelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi için Şekil 1.a'da örnekleri sunulmuş; başlangıç, sekant, giriş ve tanjant modülleri gibi birçok yöntem önerilmiştir [5]. Bu yöntemlerden gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin test müddetince takibi için en yaygın kullanılanlardan biri sekant modülü olup, bu özelliğinden dolayı statik modül olarak da adlandırılmaktadır [6].

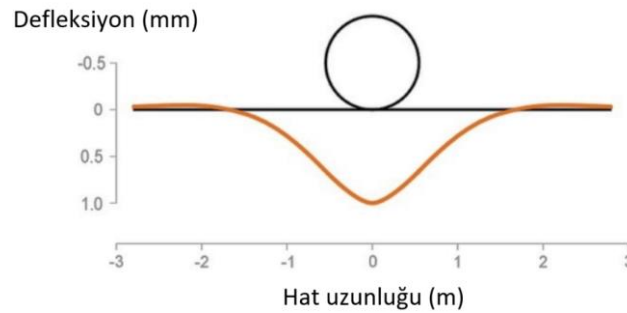


Şekil 1. a) Lineer olmayan malzemelerin elastisite modülleri belirlenirken uygulanan bazı hesaplama yöntemleri [5], b) Yükleme hızına bağlı olarak beton basınç dayanımındaki artışı gösteren çalışmalar [7]

Demiryolu yapı elemanlarının elastisite modülleri veya rijitlikleri, hat performansı ve servis ömrü bağlamında, ana belirleyici etkenlerdendir. Şekil 1.a'da örnekleri verilen modüller, statik yükleme etkenleri gözetilerek oluşturulmuştur. Demiryollarında etkiyen yükler ise dinamik, kısa etki süreli

(short duration) ve yüksek yükleme hızına (high strain rate) sahiptir. Genel olarak yükleme hızı arttıkça elde edilecek gerilme-deformasyon eğrisinin eğimi ve zirve noktası (dayanımı) da artmaktadır. Nitekim Şekil 1.b’de, iki farklı statik basınç dayanımına sahip betonun yükleme hızına bağlı olarak dayanımlarındaki artışı gösterir birçok (yaklaşık 28) çalışmanın ve CEB normunun bu iki farklı beton için önerdiği formülasyon sonuçları özet halde verilmiştir [7]. Şekilden görüldüğü üzere, yükleme hızı statik sınırlardan çıkıp ($>10^{-5}$), demiryollarında da görülen yüksek hızlara ulaştıkça, her iki malzemede de dayanım artışı %300’leri bulabilmektedir. Ancak şekildeki bir diğer dikkat çeken husus, 50 MPa dayanıma sahip betondan yaklaşık %27 daha düşük elastisite modülüne ve 20 MPa dayanıma sahip betonun, dinamik yüklemeler altındaki göreceli dayanım artışının daha yüksek olmasıdır. Görüldüğü üzere, dinamik kuvvetlere maruz kalan malzemelerin dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biri elastisite modülleri ve rijitliktir. Bu konuda detaylı bilgi literatürde mevcut [8] olup, genel olarak, diğer faktörler eşdeğer kalmak şartıyla; daha zor esneyen, elastisite modülü yüksek, rijit, yüksek yoğunluklu ve düşük boşluklu, penetrasyon ve deformasyona müsaade etmeyen nesnelere veya yüzeylere dinamik kuvvet uygulandığında daha yüksek kuvvetler ortaya çıkmaktadır.

Demiryolu inşasında kullanılan her bir yapı elemanının, fiili kullanıma başladığı anda, ayrı ayrı karakteristik elastisite modülleri ve rijitlikleri söz konusudur. Bunun gibi, tüm bu yapı elemanlarının çeşitli şekillerde birleştirilmesi ile elde edilen demiryolu yapı sisteminin de kendine özel hat rijitliği (track stiffness) söz konusudur. Bu hat rijitliği, gerek dizayn, gerek inşa, gerekse bakım sürecinde yararlanılan önemli bir parametredir. Nitekim hat rijitliğinin, yola ve taşıta gelen dinamik gerilme ve titreşimleri belirleyen en önemli parametre olduğu ve en uygun (optimum) değerlerinin belirlenerek bu değerler arasında kalınmasına dikkat edilmesi gerektiği literatürde belirtilmektedir [9]. Çünkü gerek yapı elemanlarının gerekse demiryolu hattının rijitlikleri, kullanım durumuna ve mevsimsel etkilere bağlı olarak zamanla artıp azalabilmektedir. Bu durum demiryolu ekiplerince düzenli takip edilerek, hat rijitliğinin bakım işlemleriyle optimum seviyede tutulmasına çalışılmaktadır. Demiryolu hatlarının rijitliği analiz edilirken, literatürde çeşitli yöntemlerden yararlanıldığı, bunlar içerisinde en yaygın olanların ise “hat modülü” ve “hat esneme direnci” olduğu görülmektedir. Hat modülü, birim ray uzunluğu başına düşen statik kuvvetin, meydana getirdiği birim deformasyona oranıyken (N/mm^2), hat esneme direnci birim defleksiyon başına düşen toplam statik hat direncini (N/mm) ifade etmektedir [10]. Hat esneme direncinin hesaplanması adına örnek verilecek olursa, Şekil 2’de tasvir edildiği üzere [11], örneğin 125 kN statik tren teker yükü etkisiyle hat’ta meydana gelen maksimum defleksiyon 1 mm ise, bu iki değer oranlanmasıyla statik hat esneme direnci 125 kN/mm olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca Şekil 2’deki gibi; teker yükünün her iki tarafında negatif defleksiyonlar da söz konusu olmaktadır. Bu negatif defleksiyonlar, yüksek kütleli beton traversler kullanılan demiryolu hatlarında ihmal edilebilecek seviyede düşüktür [12]. Ancak düşük kütleli traversler, Şekil 2’de örneklendiği gibi, detayları ileride sunulacak çeşitli dezavantajlara yol açmaktadır. Şekil 2’de teker merkezi hizasındaki maksimum defleksiyon değerlerinin ise, uzun kaynaklı raylar kullanılan hatlarda 2 milimetreyi geçmediği [12], köprü, tünel ve döşeme tipi rijit uygulamalarda (slab-track vb.) daha da düştüğü [13], aksine demiryolu hat kalitesinin düşmesi ile örneğin contalı ray birleşim lokasyonlarında 10 mm’leri bulabildiği ifade edilmektedir [14].

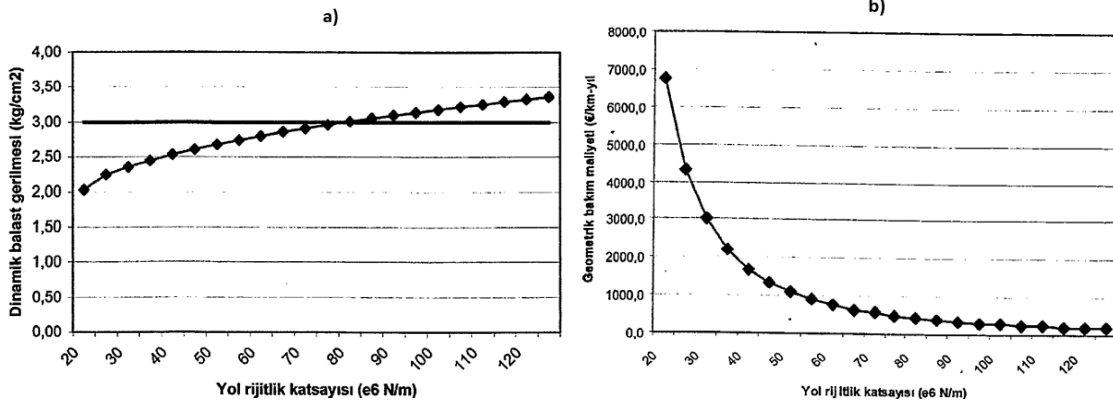


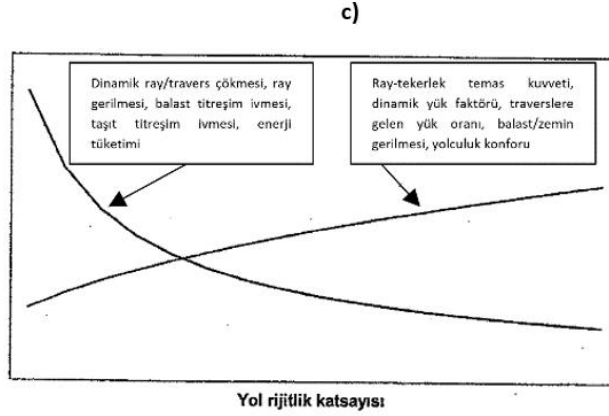
Şekil 2. Tren tekerleri etkisinde raylardaki şekil değişikliğinin miktar ve biçimi [11]

Bu aşamada, ideal hat rijitliğinin ne düzeyde olması gerektiği akla gelmektedir. Literatürde, demiryolu hattının bir miktar esnek kabiliyete sahip olmasının (flexibility) özellikle dinamik darbe yüklerinin kısıtlanması açısından (Şekil 1.b'deki gibi) fayda sağlayacağı belirtilmektedir. Bununla birlikte bu esnekliğin elastik olması (resilience), yani taşıt geçişinden sonra tamamen geri dönmesi ve hat kalitesinin korunmaya devam edilmesi de önemlidir. Özellikle hat rijitliğinin korunmasının daha zor olduğu kurplarda ve makaslarda, bu yüzden yüksek oranda deray riski söz konusu olduğu yaygın bilinen bir gerçektir [11]. Bu durum yüksek hızlı demiryolu hatlarında daha da büyük öneme sahip olup, rayların 1 veya 2 milimetreden daha fazla defleksiyona uğramaması istenilmektedir. Söz konusu defleksiyonların sınırlandırılması ise hat rijitliği ile ilgili olup, rijitlik ve defleksiyon arasında ters orantılı bir ilişkili söz konusudur. Örneğin 120 kN statik teker yükü ile işletilen bir demiryolu hattında, hat rijitliği 60 kN/mm ise, statik yükler altında en fazla 2 mm defleksiyon meydana gelirken, hat rijitliği 120 kN/mm'ye yükselince defleksiyon değeri 1 mm'ye düşmektedir. Belirtilen defleksiyon değerlerinin artış veya azalışı demiryollarında birçok faktörü de etkilemektedir. Örneğin Şekil 3.a'da görüldüğü üzere; düşük hat rijitliği, balast ve zemine aktarılan eğilme momenti ve gerilmeyi azaltmaktadır [9]. Genel olarak, balast tabakasına gelen gerilmelerin 3 kg/cm²'nin altında kalması istenilmektedir. Dolayısıyla Şekil 3.a'dan görülebileceği üzere, yol rijitliğinin 80 kN/mm'nin (80x10⁶ N/m) altında kalması önerilmektedir. Düşük yol rijitliğinin diğer faydaları; contalı ray birleşimlerdeki darbe yükünü azaltması, taşıtın düşey titreşimlerini azaltarak yolculuk konforunu artırması, traversler üzerinde daha yaygın bir yük dağılımı sağlanarak traverslere gelen yüklerin azaltılması sayılabilir. Nitekim Şekil 4'te bu konuda yapılmış örnek çalışma sonuçları görülmektedir [15, 16]. Bu çalışmalarda hat rijitliği, hat esneme direnci yöntemi ile değil, hat modülü yöntemiyle değerlendirilmiştir. Görüldüğü üzere hat rijitliği, travers eğilme modülü arttıkça belli bir değere kadar artmakta (≈ 20 GPa) ve daha sonra yaklaşık sabit kalmaktadır. Buna benzer olarak, balast oturması da belli bir değerden sonra (≈ 20 GPa) sabit kalmaktadır. Düşük hat rijitliğinin çeşitli avantajları olduğu gibi, bazı önemli dezavantajları da söz konusudur. Hat rijitliği azaldıkça ray-travers çökmesi, ray eğilme momenti ve dolayısıyla ray gerilmeleri, balast titreşimleri ve hat'tın bozulma hızı, trenlerin harcandığı çekim gücü artmaktadır. Diğer açıdan, yeterli derecede yüksek yol rijitliği, demiryollarının olmazsa olmazı, taşıt stabilitesi açısından da gereklidir ki; ray mantarında dönme ve buna bağlı olarak ekartmanda artışlar önlenmelidir. Ayrıca Şekil 3.b'de görüldüğü üzere hat rijitlik katsayısı arttıkça, geometrik bakım maliyetleri düşmektedir. Sonuçta Şekil 3.c'den anlaşıldığı üzere, yol rijitliğinin optimum bir aralıkta tutulması gerekmektedir. Alman Demiryollarında yüksek hızlı demiryolu hatlarında optimum ray çökmesi 1,2-1,5 mm ve buna bağlı olarak optimum yol rijitliği 50-100 kN/mm olarak belirlenmiştir [16]. Bununla birlikte optimum yol rijitliği, tren hızına bağlı olarak da değişmektedir. Örnek bir çalışmada, 200 km/sa tren hızı için optimum değer 50 kN/mm olarak, 300 km/sa için bu değer artarak 78 kN/mm olarak hesaplanmıştır [9]. Buraya kadar sunulan teker yüklerinin ve hat rijitlik değerlerinin statik esaslı olduğuna dikkat edilmelidir.

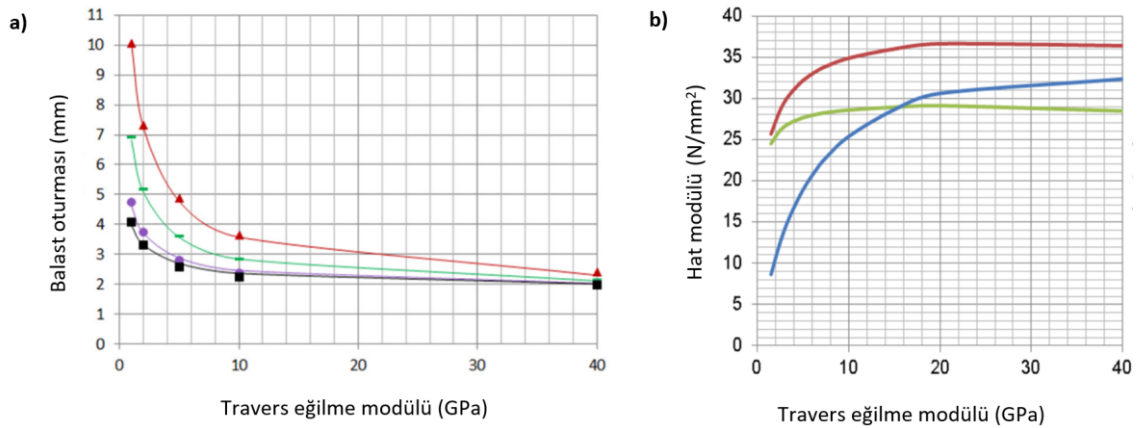
Günümüzde dünyada ve ülkemizde, en yaygın kullanılan travers tipi, öngerilmeli beton traverslerdir. Bu traversler yaklaşık 50 yıllık servis ömrü hedeflenerek üretilmektedir. Ancak 1960'lı yıllar itibarıyla kullanımına başlanılarak git gide yaygınlaşan bu travers tipi, günümüze (2022) kadarki yaklaşık 60 yıllık kullanım tecrübesi ışığında, son yıllarda sayısı giderek artan akademik çalışmalarda da belirtildiği üzere, statik yükler altında sergilediği üstün performansı, dinamik tren yükleri altında sergileyememiştir [12, 17-28]. Örneğin yakın zamanda yapılan bir araştırmada, öngerilmeli beton traverslerin fiili servis ömürlerinin, 20 yıl ile 41 yıl arasında oldukça değişkenlik gösterdiği ifade edilmektedir [29]. Öngerilmeli traverslerin demiryollarında hedeflenen yüksek servis ömrüne ulaşamamasında önemli bir etken, yüksek dayanımlı beton ve öngerilme kuvveti kaynaklı çok yüksek eğilme modülleridir. Literatürde belirtildiği üzere, öngerilmeli beton traverslerin eğilme modülleri gereğinden fazla yüksektir ve dizaynları esnasında ahşap traverslere göre daha yüksek en kesit boyutlarına ve daha fazla balast kalınlığına (yaklaşık 23 cm ilave) ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca düşük sönümleme özelliği gösterdiğinden

ray ve balast kalitesinin üst seviyede tutulmasına ihtiyaç duyulmaktadır [28, 30, 31]. Bu aşamada önerilmeli betonarme traverslerin neden yüksek elastisite modülü sergilediği akla gelmektedir. Bu durum basitçe şöyle izah edilebilir: Kompozit bir hammadde olan beton, çimento harcı ve agregaların çeşitli oranlarda karıştırılması ile üretilmektedir. Çimento harcının basınç yüklemesi altında elastisite modülü yaklaşık 10-30 GPa iken, beton üretiminde kullanılan agregaların basınç yüklemesi altında elastisite modülleri yaklaşık 45-85 GPa aralığındadır. Bu iki hammaddenin karışımı ile üretilen betonun basınç yüklemesi altındaki elastisite modülü ise, karışım oranlarına ve çeşitli diğer etkenlere bağlı olarak, her iki hammaddenin elastisite modüllerinin arasında bir değer almakta ve genel olarak 20-50 GPa aralığında değişmektedir [4]. Bilindiği üzere, beton hammaddenin basınç ve kesme dayanımı avantajları olsa da, çekme dayanımı düşüktür. Bu yüzden çekmeye maruz kalacak beton yapı elemanları, çelik donatılarla takviye edilerek "betonarme" hammaddeler meydana getirilmektedir. Söz konusu çelik donatıların Young elastisite modülleri ise 200 GPa dolaylarındadır. Bu şekilde üretilen klasik betonarme elemanların eğilme yükü altındaki elastisite modülleri, donatı konum ve oranına bağlı olarak donatısız beton hammaddenin çok üzerinde değerler almaktadır. Bu çelik donatılara ön-germe veya ard-germe uygulanarak üretilen önerilmeli betonarme elemanların eğilme yükü altındaki elastisite modülleri ise, önerilme kapasitesinin deformasyona karşı ilave bir kapasite sağlaması nedeniyle, bu sayılan elemanlar içerisinde en yüksek seviyeye çıkmaktadır. Öyle ki; önerilmeli betonarme traverslerin eğilme modülleri, diğer tüm (ahşap/kompozit/plastik/çelik/ betonarme) traverslere göre daha yüksek olmaktadır. Eğilme modülleri birbirinden farklı olan tüm bu traverslerin dizayn yükleri de birbirleriyle uyumsuz olmaktadır. Çünkü önerilmeli betonarme traverslere, yüksek rijitlikleri nedeniyle daha yüksek yükler transfer olmakta, bu nedenle de statik kapasiteleri yüksek olsa da, dinamik yükler altında çeşitli bozulmalar ortaya çıkmaktadır [28]. Örneğin, her ikisinde de yüksek modüllü beton kullanılan, önerilmeli beton traverslerin (B70 vb.), önerilmesiz beton traverslere (B450 vb.) göre %100 daha yüksek dizayn yükü ile üretilmek zorunda olduğu belirtilmektedir [17, 20]. Önerilmesiz beton traverslerin böyle bir avantajı söz konusu olsa da, içerdiği çelik donatı ve bağlantı çubuklarının yüksek korozyon riski nedeniyle servis ömrünün daha kısa olacağı düşünülerek yaygınlaşmamıştır. Bununla birlikte Paris-Londra arası yüksek hızlı demiryolu hatları da dâhil birçok projede kullanıldıkları da görülmektedir.





Şekil 3. Demiryolu hat rijitliğine bağlı olarak çeşitli parametrelerdeki değişim [9]



Şekil 4. Travers eğilme modülüne bağlı olarak, balast oturması (a) ve hat modülünün (b) değişimi [15]

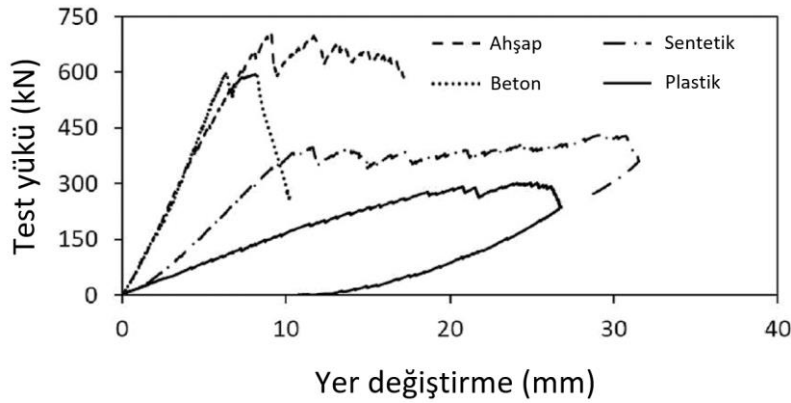
Günümüzde en yaygın kullanılan söz konusu önerilmeli betonarme traversler yaygınlaşınca kadar dünyada en yaygın kullanılan travers tipi bilindiği üzere geleneksel ahşap traverslerdir. Ahşap traverslerin en önemli avantajları düşük elastisite modülleri, yüksek sönümlenme katsayıları ve esnekliğidir [28]. Bu konuda örnek bir çalışmada, üstyapı elamanı olarak önerilmeli beton ve ahşap traversler kullanılan iki farklı demiryolu hattından geçen eşdeğer iki trenin etkisi analiz edilmiş ve önerilmeli beton traversli hatların, daha rijit yapısı nedeniyle, ortaya çıkan dinamik kuvvet değerlerinin arttığı belirlenmiştir [12, 17]. Bununla birlikte, beton materyalle üretilen traverslerin hat ve makas stabilitesini sağlamakta büyük paya sahip olduğu da ifade edilmektedir [28, 32, 33]. Beton traverslerin özellikle yüksek kütleleri ile yol geometrisinin stabilitesine katkıda bulunduğu belirtilmektedir [29]. Beton traverslerin yüksek kütlelerinin düz yolda (aliyman) dahi negatif defleksiyonları önlemeye yaradığı Şekil 2 kapsamında aktarılmıştı. Günümüzde dünya genelinde kullanılmakta olan traverslerin ortalama kütleleri şu şekildedir: ahşap travers 105 kg, standart önerilmeli yekpare beton travers 280 kg, önerilmeli ikiz blok betonarme travers 230 kg, çelik travers 110 kg, plastik/kompozit traversler 100 kg, düşük kesit yükseklikli önerilmeli beton travers 240 kg [28]. Görüldüğü üzere beton traverslerin, diğer tiplere göre önemli bir kütle avantajı söz konusu olup, yakın zamanda dizayn edilen yeni tiplerde bu kütleleri daha da yükselmiştir. Bu durum her ne kadar makineli tamirat zorunluluğu getirirse de, günümüzün yüksek hız ve işletim kapasitesi şartları altında, hat stabilitesi açısından çok zaman zorunlu bir ihtiyaç halindedir. Ahşap traverslerin düşük kütlelerinin haricinde, kesme dayanımının ve biyolojik etkilere dayanıklılığının düşük olması, hammadde kaynaklarındaki kısıtlar ve üretiminde kullanılan kreozotün zararlı çevresel etkileri düşünülerek, kullanımı birçok ülkede terk edilmiş veya minimum seviyelere çekilmiş, en yaygın kullanıldığı ülkelerde dahi alternatif traverslerin araştırıldığı belirtilmiştir [28]. Bu konuda tarihimizden bir örnek, 1300 kilometrenin üzerindeki uzunluğu ile birçok coğrafyadan geçen Hicaz demiryolu hattının inşası

esnasında yaşanmıştır. Ahşap traverslerin çeşitli bölgelerde, özellikle çöl iklimlerindeki dayanıksızlığı tespit edilerek, bu bölgelerde dönemin şartlarında alternatif bir travers olan çelik traversler kullanılmıştır [34]. Ahşap traverslerin belirtilen çeşitli dezavantajlarına rağmen, rijit zemin lokasyonlarında (köprü, makas, tünel vb.) beton traversler fazlasıyla yetersiz kaldığından, bu lokasyonlarda birçok ülkede halen ahşap traversler kullanılmaya devam etmektedir [31].

Görüldüğü üzere; gerek ahşap traverslerin, gerekse standart beton traverslerin çeşitli avantaj ve dezavantajları söz konusu olup, günümüzde, söz konusu avantajları bir araya getiren ve dezavantajları kısıtlayan, gerçek yüksek servis ömrüne ulaşacak alternatif travers tiplerine ihtiyaç vardır. Diğer bir ifadeyle, ahşap traversler gibi düşük elastisite modülüne, yüksek sönümleme oranına ve esneklik karakteristiklerine sahip, öte yandan öngörülmesi beton traversler gibi yüksek kütleyle, çevresel etkilere dayanıklılığa ve yüksek eğilme, basınç ve kesme dayanımına sahip traverslere ihtiyaç duyulmaktadır [28, 35]. Bu amaçla geçmişten günümüze dünya genelinde çeşitli alternatif travers tipleri geliştirilmeye çalışılmış ve halen çalışılmaktadır. Bunlardan ilki kompozit/plastik traverslerdir. Bu travers tipleri genellikle ahşap traverslerin yerini almak üzere geliştirilmiş/geliştirilmektedir. Bu bağlamda özellikle ahşap traversli hatlarda tamir/bakım/revizyon işlemlerinde veya beton traversli hatlarda makas/tünel/köprü vb. rijit lokasyonlarda kullanım alanına sahiptir. Polimer/plastik/kompozit sektörleri gibi çok büyük bir alan tarafından ar-ge çalışmaları desteklenen bu alternatif traversler, genel olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategori (Type 1) genellikle geri dönüştürülmüş polimerlerden üretilmekte olup, içerisinde elyaf takviye içermemekte veya kısa boylu dağınık elyaflarla (chopped fibers) takviye edilmektedir. Bu tipteki traversler, mekanik bakımdan genelde oldukça zayıf karaktere sahiptir [36]. İkinci tipteki traversler (Type 2) ise boyuna istikamette takviyelere sahip olup, genelde cam elyaf ve çelik donatılar kullanılmaktadır. Bu tip, ilk tipe göre daha yüksek eğilme dayanımı ve rijitliğe sahiptir, ancak kesme ve basınç dayanımı düşük kalmaktadır [28]. Son ve üçüncü tip ise (Type 3) hem boyuna hem enine istikamette takviyeler içerdiğinden, kesme ve basınç dayanımı öncekilere göre daha yüksektir [28]. Her üç tip traversin üretiminde kullanılan reçineler oldukça değişkenlik göstermekte olup, bunlardan biri olan sentetik kompozit reçinelerle üretilen traverslerin günümüze kadar Japonya, Avrupa ve Avustralya'da denenmiş olsa da, gevrek özellik gösterdiğinden demiryolları için çok uygun olmadığı literatürde belirtilmektedir. Geri dönüştürülmüş plastikten imal traverslerin ise kullanılan malzemeye bağlı olarak büyük değişkenliklere sahip olduğu, ilk etap laboratuvar testlerini geçebilmesine rağmen, sahada erken deforme oldukları raporlanmıştır [37-40]. Kompozit traverslerin düşük kütleli, gereğinden fazla düşük elastisite modülleri, reçine veya cam elyaf kaynaklı düşük yorulma dayanımları vb. diğer dezavantajları haricinde, günümüz maliyetleri ahşap traverslerin 5-10 katı kadar daha yüksektir [33]. Sonuç olarak dünya genelinde uzun süredir yürütülen birçok ar-ge çalışmaları söz konusu olmasına rağmen, bu alternatif traversler, günümüzde halen belirtilen lokasyonlar haricinde yaygınlaşmamıştır. Ayrıca bu travers tipleri hakkında dünya genelinde yaygın kabul gören elastisite modülü veya eğilme modülü değerleri de henüz yayımlanmamıştır. Örnek olarak AREMA normu (Chapter 30-35) bu alternatif traverslerin elastisite modülünün en az 1,17 GPa olmasını isterken, Japon standartları (JIS E 1203:2007) 6 GPa minimum değerini vermekte, yeni Avustralya standardı (AS1085.22:2020) ise herhangi bir elastisite modülü belirtmemektedir. ISO 12856 standardı ise 1,17 GPa ile 6 GPa şartlarına haiz 3 kategorili bir yöntem sunmaktadır [41].

Bu çalışmada incelenen ikinci alternatif travers tipi, kesit yüksekliği düşürülmüş öngörülmesi beton traverslerdir. Günümüzde ahşap traversler, belirtilen nedenlerle terk edilmektedir. Ancak binlerce kilometrelik ahşap traversli hat işleten bazı ülkeler, bir anda tüm ahşap traversli hatların beton traversli hatlara dönüşümünü sağlayamamaktadır. Bunun yerine, bu ülkelerde ahşap traversli hatların bakım-tamirat-revizyon işlemlerinde beton traversler kullanarak, kademeli bir geçiş hedeflenmiştir. Ancak mevcut öngörülmesi beton traverslerin, ahşap traverslerle önemli düzeyde elastisite modülü ve kesit boyutu farkı olduğundan, birlikte kullanılmaları halinde önce yüksek modüllü olana yük bineceğinden, erken sürede deforme oldukları görülmüştür. Bu nedenle, öngörülmesi beton traverslerin boyutları küçültülerek, ahşap traversli hatların tamir ve

bakımında kullanılabilir, ahşap traverslerle yakın kesit boyutlarına ve eğilme modülüne sahip, yeni bir öngerilmeli beton travers modeli oluşturulmuştur. Ancak bu traverslerin kesit yüksekliği düşürülse de, öngerilmeli beton demiryolu traverslerinin üretiminde yüksek dayanımlı beton (>45 MPa) kullanılması gerekmektedir. Bu durum üretim aşamasında betonun yüksek öngerilme kuvvetini emniyetli bir şekilde ve yorulma limiti aşılmadan taşıması için gerektiği gibi, öngerilme kuvveti kayıplarını azaltmak ve çatlak başlangıç yükünü artırmak da amaçlanmaktadır [42]. Yüksek dayanımlı betonun sönümlenme özellikleri ise ahşap malzemeye göre çok düşüktür. Öte yandan kesit boyutu düşürüldüğü için bu alternatif traversler, normal öngerilmeli beton traverslere göre önemli düzeyde kapasitesi düşürülmüş vaziyettedir. Dolayısıyla bu alternatif travers tipi, belirtildiği üzere ahşap traversli hatların tamir ve bakım çalışmalarında geçici süreli kullanım politikası haricinde yaygınlaşmamıştır. Buraya kadar değinilen ahşap, düşük kesitli öngerilmeli beton, sentetik ve plastik traverslere uygulanan 5 noktalı eğilme deneyleri sonucunda elde edilen yük, defleksiyon grafikleri Şekil 5'te sunulmaktadır [39]. Deney prosedürünün detayları çalışmada verilmekte olup, grafikte geçen test yükü iki ray mesnedine uygulanan değerlerin toplamıdır. Belirtilen bu alternatif travers tipleri haricinde, son birkaç yıl içerisinde Ar-Ge'si yapılmaya başlanılan hem yüksek dayanımlı düşük elastisite modüllü betonla üretilen öngerilmeli betonarme traversler de söz konusudur. Laboratuvar ortamında üretilen test numunelerinin seri üretime geçirilip geçirilmediği bilinmemektedir [43]. Ancak öngerilmeli travers üretim felsefesi devam ettirildiği için yapılan travers testlerinde de görüldüğü üzere, gerilme-deformasyon davranışında ve nihai travers ürününün eğilme modülünde büyük bir değişiklik elde edilmemiştir.



Şekil 5. Çeşitli traverslere uygulanan eğilme testleri sonucunda elde edilen yük, defleksiyon eğrileri [39]

Sonuç olarak; demiryolu hat rijitliği, üzerine gelen yüklerin şiddet ve frekanslarının değişiminde büyük öneme sahiptir [12]. Traverslerin elastisite modülleri ve kütleleri ise, hat rijitliğini ve tüm demiryolu sisteminin davranışını etkilemektedir ve gerek hat rijitliği açısından gerekse Şekil 1'de izah edilen yüksek etki hızlı dinamik yüklere dayanımı açısından büyük öneme sahiptir [39]. Birçok farklı travers üzerinde yapılan test ve analizler sonucunda, traverslerin eğilme modüllerinin, balast modülünden dahi önemli olduğu ve ray mesnedindeki eğilme momentinin (sagging), travers merkezindeki eğilme momentine (hogging) oranının, travers modülü gereğinden fazla yüksek veya düşük olması halinde arttığı belirlenmiştir [41]. Dolayısıyla yüksek servis ömrü ve performans için traverslerin optimum elastisite modülüne ve yeterli yüksek kütleyle sahip olması gerekmektedir. Ancak demiryolu traversleri hakkında dünya genelinde yaygın kabul gören eğilme modülü veya kütle değerleri henüz yayımlanmamıştır. Hâlbuki birbirinden çok farklı elastisite modülü ve kütleyle sahip mevcut traverslerin davranışları ve üzerlerine gelen yükler birbirlerinden çok farklı olmaktadır [41]. Bu durum, mevcut test ve dizayn yöntemlerinin yetersizliğini gözler önüne sermekte ve demiryolu kuruluşları açısından büyük endişe ve kararsızlığa neden olmaktadır [41, 44, 45].

Bu çalışma kapsamında, standartlardaki belirtilen eksikliğe rağmen, literatürde mevcut akademik çalışmalar baz alınarak çeşitli önerilerde bulunulacaktır. Şekil 3.c'den görüldüğü üzere, optimum

hat rijitliği aralığından daha fazla veya daha düşük bir uygulama, bir açıdan avantaj sağlayabileceken, başka açılardan büyük dezavantajlara neden olabilecektir. Bu bağlamda, Şekil 4'ten de görülebildiği gibi, yaklaşık 10 GPa değerinden daha düşük eğilme modülüne ve/veya gereğinden düşük kütleyle sahip traverslerin demiryolunda kullanımı, buraya kadar değinilen çeşitli dezavantajlara yol açacak olmasının yanı sıra, demiryolu seyrüsefer güvenliği açısından da problemlere yol açabilecektir. Çünkü demiryolu traverslerinin en önemli görevi, iki ray arasındaki yatay ve dikey milimetrik mesafeleri (ekartman) korumaktır. Bu görevini yerine getirmesi için yeterli kütleyle sahip olması ve aşırı elastik ve plastik deformasyona uğramaması gerekmektedir. Özellikle yüksek hızlı demiryolu hatlarındaki kritik mesafelerin dinamik demiryolu kuvvetleri altında birkaç milimetreden fazla değişmesi, yalpa hareketleri vb. nedenlerle dinamik kuvvetlerin artmasına, dahası deray denilen, tren tekerlerinin raydan düşmesine ve kazalara da neden olabilmektedir [22]. Gereğinden fazla düşük elastisite modülüne veya yetersiz kütleyle sahip (örneğin bazı plastik/kompozit tipi) traversler, hat esneme direncinin gereğinden fazla düşük olmasına, yolun kaymasına veya havalanmasına, raydaki eğilmelerin ve hat deformasyonunun artmasına neden olabilmektedir. Bunun zıddı olarak, optimum düzeyden daha yüksek elastisite modülüne sahip sürekli döşeme tipi (slab-track vb.) uygulamalarda ise, ray bağlantı elemanlarında, ray yüzeylerinde ve balast parçacıklarında erken dönemde hasarlar ve kırılmalara dikkat edilmelidir [46]. Öte yandan, örneğin yekpare travers kullanılması halinde, belirli bir aralıkta (eker) sabit kalınmak şartıyla, Şekil 4'ten de görüldüğü üzere, yaklaşık 20 GPa eğilme modülü değerinden sonra hat rijitliğinde yüksek düzeyde bir artış da görülmemektedir. Buna göre, Şekil 1'de örneği sunulan dinamik yük dayanıklılığı ve diğer birçok fayda gözetilerek traverslerin elastisite modüllerinin 10-20 GPa düzeylerinde olmasının optimum fayda sağlayacağı söylenebilir. Ancak daha önce belirtildiği üzere, her malzeme gibi, demiryolu traverslerinin de kullanım ömrü süresince elastisite modülleri belli bir miktarda düşmektedir. Bu düşüşün cüzi miktarda olması, traverslerin 40-50 yıllık servis ömürlerinin yorulma etkisinde fazla azalmayacağını işaret ettiği gibi, demiryolu rezilyansının da artacağını göstermektedir. Sonuç olarak basit bir yaklaşımla, demiryolu traverslerin eğilme modüllerinin ilk kullanım esnasında %20'lik bir emniyet payı bırakılarak örneğin 12-20 GPa aralığında kalması halinde, yaklaşık 40-50 yıllık planlanan servis ömrü sonunda optimum aralıkta kalması sağlanabilecektir. Hedeflenen bu değerlerin kullanım süresince ne denli düşebileceği, yükleme kaldırma yeniden yükleme (YKY) esaslı EN 13230 testleri veya dinamik ve yorulma testleriyle tahkik edilebilecektir.

Sonuçta, geniş literatür taraması ardından belirlenen bu eğilme modülü değerleri, günümüzde çoğunlukla ahşap traversler tarafından karşılanabilmektedir. Ancak ahşap traverslerin düşük kütleleri, çevresel dayanıksızlığı ve düşük kesme dayanımı gibi dezavantajlarının da giderilmesi gerekmektedir. Bu dezavantajların ise büyük ölçekte öngörülmesi betonarme traverslerde bulunmadığı, sunulan literatür özetinden görülmektedir. Sonuçta her iki traversin avantajlarını toplamak adına, geliştirilecek traverslerin; 12-20 GPa eğilme modülüne ve en az 230 kg kütleyle sahip, çevresel etkilere dayanıklı bir betondan imal edilmesinin, her iki travers tipinin avantajlarını toplayarak, dezavantajlarını kısıtlayabilecek bir çözüm olacağı düşünülmektedir. Ancak, bu çalışmada örnek bir yaklaşım olarak sunulan bu değerlerin; hat işletim hızları ve diğer tüm faktörler gözetilerek, her demiryolu kuruluşunun, farklı hat lokasyonları için; çeşitli iklim özellikleri ve işletim etkenleri gözetilerek detaylı analizlerle belirlenmesi gerekmektedir.

2. Metot

Bu çalışmada, buraya kadar sunulan literatür bilgilerinin analizi ile belirlenen 12-20 GPa aralığında eğilme modülüne ve en az 230 kg kütleyle sahip alternatif bir travers tipi belirlenmeye çalışılacaktır. Bu bağlamda, ülkemizde geliştirilmeye başlanılan yeni bir travers tipi olan LCR tipi traversler ele alınacaktır. Söz konusu yeni tip traversler, öngörülmesi beton traverslerle yaklaşık eşit kütleyle sahip olup, bu açıdan belirlenen minimum 230 kg'lık kütle şartını fazlasıyla sağlamaktadır. Söz konusu traverslerin hedeflenen eğilme modülü kriterlerini sağlayıp sağlamadığının tahkiki için ise, eşdeğer kalıp boyutlarında (B70 tipi) ve eşdeğer dayanımdaki

betonla, standart B70 tipi ard-germe metoduyla üretilen öngerilmeli betonarme traversler ve yeni 30-VRTC-SND-PP tipi LCR traversler üretilmiştir. Bu şekilde LCR tipi traverslerin yeni beton donatılardırma yönteminin eğilme modülü bağlamında sağlayabileceği potansiyel faydaların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Söz konusu traverslerin üretimi ve deneyler esnasında alınan örnek görsel Şekil 6'da sunulmakta olup, yeni üretim tekniği ve günümüze kadar uygulanan testler literatürde mevcuttur [21-26].



Şekil 6. Yeni geliştirilen 30-VRTC-SND tipi L-CFRPU donatılı betonarme demiryolu traversinin üretimi

Literatür özetinde detaylı sunulduğu üzere, elastisite modülü ve rijitlik kavramları birbirinden farklıdır ve her ikisinin belirlenmesi ve kullanımı esnasında bu farklılığa dikkat edilmelidir. Örneğin Şekil 5'te, ahşap ve düşük kesit boyutlu öngerilmeli beton traverslerin yük-defleksiyon davranışları verilmiş olup, görüldüğü üzere mesnet aralığı değişmediği için traverslerin tip ve boyutlarına bağlı olan eğilme rijitlikleri birbirine oldukça benzer sonuçlanmıştır. Zaten literatür özetinde sunulduğu üzere, düşük kesit yükseklikli beton traversler, ahşap traverslerle benzer rijitliğe sahip olacak şekilde dizayn edilmektedir ve bu durum beklenen bir davranıştır. Ancak çalışmada, elastisite modülü hesaplaması yapılırken, büyük bir farklılık ortaya konulmuştur. Bunun ilk nedeni elastisite modülü hesaplama formülasyonlarında, deney mesnet aralığı ve numune boyut etkisinin ortadan kaldırılması için kullanılan çeşitli faktörlerdir. Diğer nedeni ise, betonarme ve ahşap malzemeler için kullanılan atalet momenti hesaplama yöntemlerinin bu iki farklı ürünü karşılaştırmaya müsait olmamasıdır. Dolayısıyla araştırmacılar, düşük kesit yükseklikli öngerilmeli beton travers için, ahşap rakibine göre çok daha yüksek elastisite modülü hesaplamışlardır. Gerek elastisite modülü, gerekse rijitlik değerleri demiryollarının dizayn ve kullanım sürecinde ihtiyaç duyulan önemli parametrelerdir. Bununla birlikte elastisite modülü daha çok dizayn, rijitlik değerleri ise kullanım aşamasında daha yaygın kullanıma sahiptir. Nitekim literatürdeki bu çalışmada da görüldüğü üzere; çeşitli formülasyonlara bağlı olarak az-çok boyut etkenlerinden arındırılan elastisite modülü değerleri, demiryollarında hâlihazırda kullanılan farklı tip ve boyutlardaki traverslerin sergileyeceği farklı direnimsel davranışlarını değerlendirmekte yeterli ve doğru bilgi sağlamayacaktır.

Bu çalışmada, demiryolu traverslerinin deforme olmaya karşı gösterdikleri dirençler değerlendirilirken, Şekil 6'da sunulan EN 13230 standardında geçen travers merkezinde negatif moment tayini deney düzeneği kullanılacaktır. Çünkü özellikle beton traverslerin kesit boyutları her üç ekseninde de oldukça değişken olduğundan ve ray bağlantı elemanları bağlamak için çıkıntı-girintiler bulunduğundan, traverslerin istenilen her noktasına deney yükü uygulanamamakta ve/veya mesnetleme yapılamamaktadır. Öte yandan mesnet açıklığının belli bir minimum değer üzerinde olması da gerekmektedir. Çünkü giriş bölümünde belirtildiği üzere, eğilme deneylerinde mesnet aralığı birbirine yaklaştırıldıkça rijitlik artmakta, betonarme elemanlarda kemerleme etkisi (arch action) meydana gelmekte, sonuçta öngerilmeli ve öngerilmemiş betonarme elemanların rijitlikleri yaklaşık eşit hale gelmektedir. Bu yüzden eğilme direnci ölçümlerinde, doğru bir elastisite modülü veya rijitlik değeri tespit ve karşılaştırması yapılması için, “kesme açıklığı/betonarme eleman derinlik ölçüsü” (shear span/effective depth ratio) oranının yüksek olması (>6) gerekmektedir [26]. Bu bağlamda mesnetler arası mesafenin travers yüksekliğinin (175-215 mm) 6 katından fazla olduğu (1500 mm) EN 13230 negatif moment dayanımı tayini deney düzeneği, eğilme direnci ölçümleri açısından oldukça uygun görülmüştür. En yüksek deney

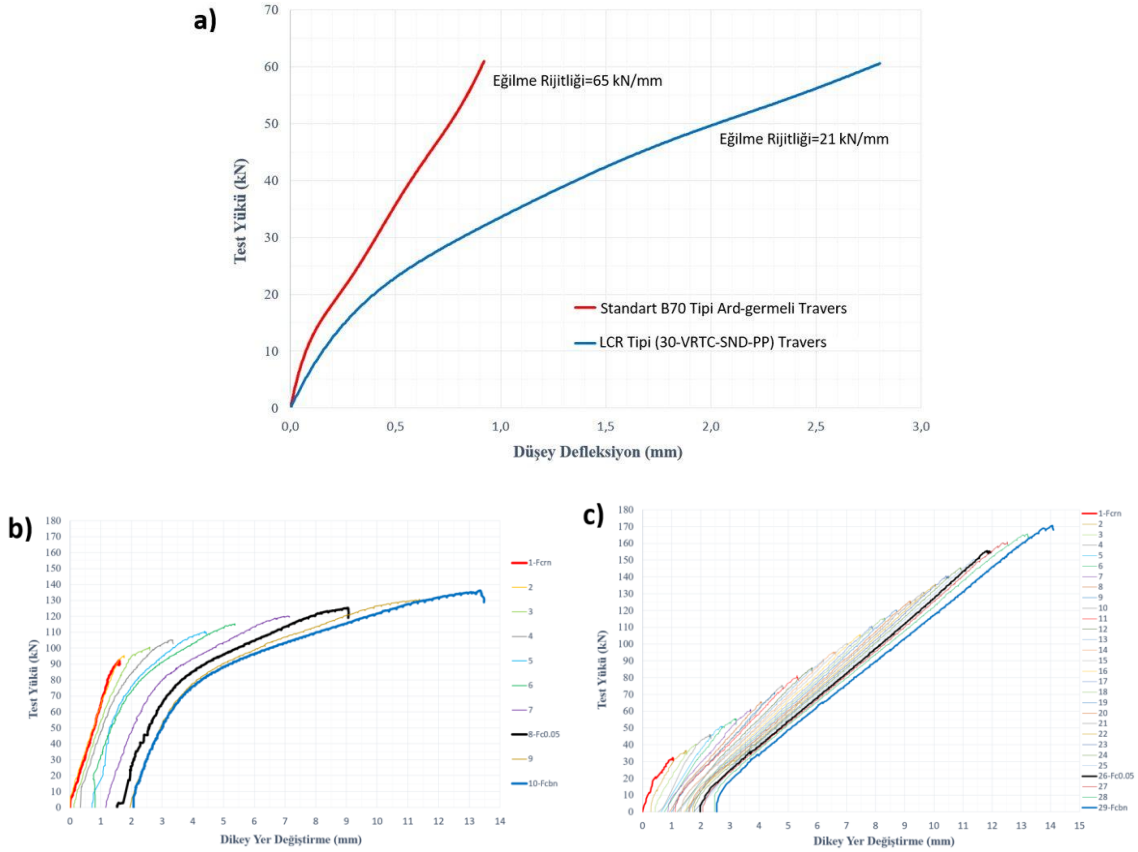
yükü ise, demiryolu servis yüklerini temsil etmesi ve betonun %30-40'lık lineer kapasitesi içerisinde kalınması durumları gözetilerek 60 kN olarak belirlenmiştir. Buraya kadar sunulan tespit ve yöntemler, literatürdeki çeşitli çalışmalarda da benzer şekilde yürütülmüştür [47, 48]. Sonuç olarak, karşılaştırma yapılacak traverslere 60 kN'luk test yükü uygulanarak, LVDT yardımıyla test başlangıcından sonuna dek traverslerin orta-düşey defleksiyon (mid-span deflection) değerleri kayda alınmıştır. Elde edilen test grafikleri ve maksimum test yükü ve karşılık gelen defleksiyon değerleri belirlenerek, iki farklı hesaplama yürütülmüştür. İlk hesaplamada eğilme rijitliği (R), 60 kN'luk test yükünün, karşılık gelen maksimum defleksiyon değerine (mm) oranlanmasıyla "kN/mm" cinsinden kolayca hesaplanabilmektedir. İkinci hesaplamada ise, literatürde mevcut çeşitli eğilme rijitliği hesaplama yöntemlerinden biri kullanılmış olup, formülasyonu Denklem 1.'de sunulmuştur [49]. Bu çalışmada travers boyutları değiştirilmeden her iki travers tipinde de B70 tipi travers kesit boyutları kullanıldığından, her iki travers tipi için elde edilen rijitlik ve eğilme modüllerinde eşit oranda artış/azalış elde edilmiştir.

$$E_{flex} = \frac{L^3 R}{4 w h^3} \quad (1)$$

- E_{flex} : Eğilme modülü
L : Deney mesnet aralığı (1500 mm)
R : Eğilme rijitliği (N/mm)
w : Travers Genişliği (\approx 185 mm)
h : Travers Yüksekliği (175 mm)

3. Bulgular

Yapılan testler sonucunda elde edilen yük-defleksiyon eğrisi örneği Şekil 7.a'da sunulmuştur. Buna göre traverslerin eğilme rijitliği ve eğilme modülleri, B70 tipi öngerilmeli betonarme travers için sırasıyla 65 kN/mm ve 55 GPa; yeni LCR tipi (30 VRT SND PP) traversler için ise sırasıyla 21 kN/mm ve 18 GPa olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere, literatür özetinde aktarıldığı gibi, öngerilmeli betonarme traverslerin eğilme modülleri oldukça yüksektir. Yeni LCR tipi traverslerin eğilme modülleri ise, öngerilmeli traverslerin yaklaşık üçte biri düzeyinde olarak, hedeflenen yaklaşık 12-20 GPa'lık eğilme modülü aralığı içindedir. Söz konusu traverslerin sergiledikleri bu eğilme modüllerini, demiryolu servis yükleri altında ne denli koruyabilecekleri ise bu traversler için geçmişten günümüze uygulanan çeşitli testlerden anlaşılabilir. Örnek bir çalışma sonucu Şekil 7.b (B70 tipi) ve 7.c'de (LCR tipi) sunulmuştur. Şekillerden görüldüğü üzere LCR tipi traverslerde, öngerilmeli traverslerle benzer şekilde, her defasında artan yüklere rağmen grafik eğimlerinde (R) önemli bir değişiklik meydana gelmemekte, ayrıca grafiklerin sol-alt köşelerinden görülebilen plastik deformasyon düzeyleri oldukça düşük kalmaktadır. Buna göre, yeni tip traverslerin mevcut elastisite modüllerini 40-50 yıllık servis ömürleri boyunca korumakta en az öngerilmeli rakipleri kadar başarılı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7. a) B70 tipi ve 30-VRTC-SND-PP modeli LCR tipi traverslere bu çalışma kapsamında uygulanan eğilme deneyi sonuçları, b) B70 tipi traverslere uygulanan EN 13230 negatif moment deneyi sonuçları [26], c) LCR tipi traverslere uygulanan EN 13230 negatif moment deneyi sonuçları [26]

4. Sonuç

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

Literatürde traverslerin elastisite modüllerinin ve rijitliklerinin belirlenmesi ve yorumlanması esnasında çeşitli yanılgılar mevcut olduğu tespit edilerek, çalışmada uygulanan negatif moment tayini test düzeneğinin, travers tiplerinin eğilme rijitliklerinin belirlenmesi ve karşılaştırılmasında başarıyla kullanılabileceği belirlenmiştir.

Dünya genelinde yaygın kullanılan travers tiplerinin ve yerlerine geliştirilmeye çalışılan alternatif travers modellerinin avantaj ve dezavantajları ortaya konularak, tüm bu traverslerin avantajlarını birleştirerek dezavantajlarını kısıtlayabilecek yeni travers modellerinin kütle ve eğilme modüllerinin nasıl olması gerektiği ortaya konulmuştur.

Uygulanan deney ve analizler sonucunda, ülkemizde son yıllarda geliştirilmeye alınan LCR tipi travers modellerinden biri olan 30-VRTC-SND-PP modeli traverslerin, ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan B70 tipi öngerilmeli beton traverslerin yaklaşık üçte biri seviyesinde eğilme modülüne sahip olduğu belirlenmiştir.

Yeni tip traverslerin kütlesi (≈ 280 kg) ve eğilme modülü (≈ 18 GPa) bakımından, günümüze kadar çeşitli travers tipleriyle yürütülen akademik çalışmalar doğrultusunda belirlenen en az 230 kg kütle ve 12-20 GPa aralığında eğilme modülü kriterlerini sağladığı, bu özellikleriyle ahşap

traverslerin elastisite modülü avantajları ile betonarme traverslerin yüksek kütlesi ve çevresel dayanıklılığını bir araya getirdiği görülmüştür.

Yeni tip traverslerin sahip olduğu bu optimum elastisite modülünü, servis ömrü boyunca koruyup koruyamayacağı, uygulanan EN 13230 standardında geçen yükleme-kaldırma-tekrar yükleme esaslı negatif moment tayini testleriyle incelenmiş ve eğilme rijitliğini tekrarlı yükleme adımlarında büyük oranda koruduğu ve yüksek değerli yüklere rağmen plastik deformasyonlarının en az öngörülmesi rakipleri kadar iyi olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; yeni LCR tipi milli travers modelinin, geçmişte yürütülen çeşitli statik ve dinamik testlerin yanı sıra, bu çalışmada incelenen eğilme modülü ve kütle özellikleri bakımından da avantaja sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yeni tip traversler, hem traverslerin hem de diğer demiryolu yapı elemanlarının servis ömürlerinin artırılmasında faydalar sağlayabilecek olup, bu durumun yorulma testleri ve saha uygulamalarıyla teyit edilmesine ihtiyaç vardır.

Kaynakça

- [1] “Elastic modulus,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Elastic_modulus [22.03.2022]
- [2] “Stiffness,” [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stiffness> [22.03.2022]
- [3] “Flexural modulus,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Flexural_modulus [22.03.2022]
- [4] “Concrete,” [Online]. Available: <https://testbook.com/question-answer/consider-the-following-statements-concerning-elast-5f1c4ac72d4b290d0e7eaeafa/amp> [22.03.2022]
- [5] “Modül,” [Online]. Available: <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/modul-modulus.html> [22.03.2022]
- [6] E. B. Türkel, “Betonda Basınç Dayanımı İle Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002
- [7] P. H. Bischoff, S. H. Perry, “Compressive behaviour of concrete at high strain rates,” *Materials and Structures*, vol. 24(6), pp. 425-450, 1991, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02472016>
- [8] F. Çeçen, B. Aktaş, “Dinamik Demiryolu Kuvvetlerinin Darbe Simülasyonlarıyla İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 16, Sayfa: 23-35. Temmuz 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1096371>
- [9] Z. Öztürk, V. Arlı, *Demiryolu Mühendisliği*, İstanbul, ISBN 978-605-60958, 2009
- [10] E. Balcı, E. Yalçın, T. U. Yelce, N. Ö. Bezin, “Bir Demiryolu Hattının Birim Esneme Direnci Üzerinde Etkisi Olan Mekanik Ve Geometrik Niteliklerin İncelenmesi,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 9(4), pp. 1408 – 1423, 2021
- [11] “The contact patch,” [Online]. Available: <https://the-contact-patch.com/book/rail/r1412-track-behaviour> [22.03.2022]
- [12] C. Esveld, *Modern railway track*. ISBN 978-1-326-05172-3, 2014
- [13] G. Michas, “Slab track systems for high-speed railways,” Master Degree Project, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012
- [14] V. A. Profillidis, *Railway management and engineering*, Aldershot: Ashgate, 3rd Edition, 2006
- [15] A. V. Belkom. “A simplified method for calculating load distribution and rail deflections in track, incorporating the influence of sleeper stiffness,” *Advances in Structural Engineering*, Vol. 23(11), pp. 2358–2372, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/1369433220911144>
- [16] B. Lichtberger, *Track Compendium; Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*, Hamburg, Germany, ISBN 3-7771-0320-9, 1st Edition, 2005
- [17] F. Çeçen, “Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforced concrete railway sleepers,” Master Thesis, Gazi Osman Paşa University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 156 pages, Tokat, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22723.43049>
- [18] 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>
- [19] 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>
- [20] 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]
- [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>
- [28] A. Manalo, T. Aravinthan, W. Karunasena, A. Ticoalu, "A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers," *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 603–611, 2010
- [29] C. A. Bolin, S. T. Smith, "Life Cycle Assessment of Creosote-Treated Wooden Railroad Crossties in the US with Comparisons to Concrete and Plastic Composite Railroad Crossties," *Journal of Transportation Technologies*, Vol: 3, pp: 149-161, 2013
- [30] R. C. Sharma, S. Palli, S. K. Sharma, M. Roy, "Modernization of Railway Track with Composite Sleepers," *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, Vol: 9(5), pp. 321-329, 2017
- [31] M. Siahkouhi, X. Lia, V. Markine, G. Jinga, "An experimental and numerical study on the mechanical behavior of Kunststof Lankhorst Product sleepers," *Scientia Iranica*, Vol: 28(5), pp. 2568-2581, 2021
- [32] A. M. Remennikov, S. Kaewunruen, "A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction," *Struct. Control Health Monit.*, Vol. 15, pp. 207–234, 2007
- [33] T. Koh, S. Hwang, "Field evaluation and durability analysis of an eco-friendly pressurised concrete sleeper," *J. Materials in Civil Eng.*, vol. 27(7), 2015
- [34] K. L. Auler, *Hicaz Demiryolu İnşa Edilirken*, İş Bankası Kültür Yay., ISBN 9786052951255, 2017
- [35] V. Lojda, A. Belkom, "Fire safety of polymer sleepers in terms of fire propagation," *19th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference, SGEM 2019*, pp. 247-256, doi: 10.5593/sgem2019/1.2/S02.032
- [36] R. Lampo, T. Nosker, H. Sullivan, "Development, Testing and Applications of Recycled Plastic Composite Cross Ties," *Us Army Engineer Research and Development Center*, Champaign, 2003
- [37] T. Nosker, R. Renfree, J. Lynch, M. Lutz, B. Gillespie, R. Lampo, K. E. Van Ness, "A performance-based approach to the development of a recycled plastic/composite crosstie," *Proceedings of the Technical Papers of The Annual Technical Conference - Society of Plastics Engineers Incorporated; Society of Plastics Engineers Inc.: Brookfield, CT, USA*, pp. 2912–2915, 1998
- [38] S. Ju, J. Yoon, D. Sung, S. Pyo, "Mechanical Properties of Coal Ash Particle- Reinforced Recycled Plastic- Based Composites for Sustainable Railway Sleepers," *Polymers*, vol. 12, pp. 2287, 2020
- [39] C. Salih, A. Manalo, W. Ferdous, R. Abousnina, P. Yu, T. Heyer, P. Schubel, "Behaviour of timber-alternative railway sleeper materials under five-point bending," *Construction and Building Materials*, Vol: 316, ID: 125882, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125882>
- [40] W. Ferdous, A. Manalo, G. Van Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. M. Remennikov, "Composite railway sleepers—Recent developments, challenges and future prospects," *Compos. Struct.*, Vol. 134, pp. 158–168, 2015
- [41] C. Salih, A. Manalo, W. Ferdous, R. Abousnina, P. Yu, T. Heyer, P. Schubel, "Novel Bending Test Method for Polymer Railway Sleeper Materials," *Polymers*, vol. 13, pp. 1359, 2021
- [42] J. Nairn, N. Stevens, "Rational design method for prestressed concrete sleepers," *CORE 2010: Rail, Rejuvenation and Renaissance Engineers*, pp. 174, Wellington, Australia, 2010

- [43] A. I. Zeitouni, D. C. Rizos, Y. Qian, “Benefits of high strength reduced modulus (HSRM) concrete railroad ties under center binding support conditions,” *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 210–223, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.124>
- [44] M. McHenry, Y. Gao, J.P. Billargeon, “Implementing Improved Composite Tie Design and Testing Guidelines” *Proceedings of the American Railway Engineering and Maintenance- of- Way Association Annual Conference*, Chicago, IL, USA, pp. 206–227, 2018
- [45] S. Kaewunruen, C. Ngamkhanong, P. Sengsri, M. Ishida, “On Hogging Bending Test Specifications of Railway Composite Sleepers and Bearers,” *Front. Built Environ*, vol. 6, ID:592014, 2020
- [46] E. Berggren, “*Railway track stiffness. Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance.*” Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009
- [47] W. Ferdous, “Static Flexural Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Composite Beam: An alternative railway sleeper,” Master thesis, School of Engineering and Information Technology, University of New South Wales, Canberra, Australia, 2012
- [48] R. D. Mindlin, “Influence of rotatory inertia and shear in flexural motions of isotropic elastic plates,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 31–38, 1951
- [49] “Three point flexural test,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Three-point_flexural_test [22.03.2022]

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.



Metro İstasyonu Tasarımlarının Normal İşletme ve Acil Durum Tahliye Senaryoları Açısından 3 Boyutlu Simülasyon Teknolojisi ile Değerlendirilmesi

Cem KIRLANGIÇOĞLU

Sakarya Üniversitesi, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Sakarya, Türkiye

kirlangicoglu@sakarya.edu.tr

(Alınış/Received: 18.04.2022, Kabul/Accepted: 22.06.2022, Yayınlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Yaya simülasyonu teknolojilerinin mimarlık ve şehir planlama disiplinlerinde kullanımı yeni bir kavram olmamakla birlikte; makine öğrenmesi tabanlı, insan davranışlarına benzer sonuçlar veren, ajan bazlı, gerçekçiliği ve geçerliliği bilimsel olarak ispatlanmış üç boyutlu simülasyon yazılımları son yıllarda ortaya çıkmışlardır. Bu yazılımlar, özellikle kalabalık ve karmaşık mekanlarda ortaya çıkabilecek sirkülasyon ve acil durum tahliye problemlerinin henüz tasarım aşamasındayken görülmesine olanak sağlamakta; bu sayede yapı inşa edilmeden önce projede gerekli revizyonların gerçekleştirilmesine imkan vermektedir. Ulusal ve uluslararası standartlar doğrultusunda gerçekleştirilen bu çalışmanın amacı, güncel simülasyon teknolojilerinin yapılara ilişkin normal işletme ve acil durum tahliye senaryolarının değerlendirilmesinde kullanımını örnek olarak seçilen gerçek bir metro istasyonu projesi üzerinden incelemektir. Seçilen raylı sistem hattındaki istasyona özgü yolcu yüklerinin bulunması amacıyla klasik elle hesaplama yöntemleri kullanılmış, ortaya çıkan değerler Massmotion yazılımına aktararak mekânsal kapasite analizleri gerçekleştirilmiş ve istasyonun tüm katlarına ilişkin hizmet seviyeleri bulunmuştur. Sonuç olarak metro istasyonunun normal işletme ve acil durum tahliye senaryolarının gereksinimlerini karşılayıp karşılamayacağı test edilmiş, ortaya çıkan sonuçlar çalışma kapsamında verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Metro istasyonu, Yaya simülasyonu, Hizmet seviyesi, Kapasite analizi, Sosyal Kuvvet Modeli

Evaluation of Metro Station Design in Terms of Normal Operation and Emergency Evacuation Scenarios with 3D Simulation Software

Abstract: Although the use of pedestrian simulation technologies in architecture and urban planning disciplines is not a new concept; the use of 3D simulation software based on machine learning, which gives results similar to human behavior, which is agent-based and of which validity has been scientifically proven, have emerged in recent years. This kind of software allows seeing circulation and emergency evacuation problems that may arise in crowded and complex spaces while still in the design phase. This way, it allows the necessary revisions to be made in the project before the construction begins. The aim of this study, which is carried out in line with national and international standards, is to examine the use of current simulation technologies in the evaluation of normal operation and emergency evacuation scenarios related to buildings through an actual metro station project selected as an example. In order to find station-specific passenger loads on the chosen rail system line, classical manual calculation methods were used, spatial capacity analyzes were carried out by transferring the resulting values to the Massmotion software, and service levels for all floors of the station were found. As a result, it was tested whether the selected metro station would meet the requirements of regular operation and emergency evacuation scenarios or not, and the results were given within the scope of the study.

Keywords: Metro station, Pedestrian simulation, Level of service, Capacity analysis, Social Force Model

Atıf için/Cite as: C. Kırlangıçoğlu, "Metro istasyonu tasarımlarının normal işletme ve acil durum tahliye senaryoları açısından 3 boyutlu simülasyon teknolojisi ile değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 51-65, July, 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1105491

1. Giriş

Binlerce yıl önce başlayan kentleşme süreci [1], Endüstri Devrimi sonrası giderek hızlanmış ve günümüzün kalabalık şehirleri ortaya çıkmıştır [2]. Türkiye'nin en kalabalık şehirleri sırasıyla İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa olup; sadece İstanbul'da 15 milyondan fazla kişi yaşamaktadır [3]. Havalimanı, alışveriş merkezi, metro istasyonu, stadyum, şehir hastanesi gibi kalabalık ve kompleks yapılarda binlerce insan aynı anda aynı mekanı paylaşmaktadır. Bu tip yapıların mimari tasarım süreçlerinde, büyük kalabalıkların konforlu ve güvenli bir şekilde hareket etmesi, varmak istedikleri noktaya en kısa sürede varmaları özellikle ulaşım yapılarında çok önemlidir. Yer üstündeki yapılar kullanıcı kapasitesi, yaya sirkülasyonu ve acil durum tahliye senaryoları açısından daha rahat tasarlanabilirken; yeraltı yapılarında ise genelde daha kısıtlı alanlarda çalışmakta ve özellikle yangın güvenliği açısından çok daha spesifik çözümlere gereksinim duyulmaktadır. Bu çalışmanın amacı, metro istasyonlarının mimari tasarım süreçlerine ilişkin normal işletme ve acil durum tahliye simülasyonu çalışmalarının 3 boyutlu simülasyon teknolojisi kullanılarak ulusal ve uluslararası standartlar doğrultusunda nasıl yapılması gerektiğini örnek bir metro istasyonu üzerinden uygulamalı olarak göstermektir.

Metro istasyonları inşa edildikten ve yolcular tarafından kullanılmaya başlandıktan sonra mimari anlamda geri dönüş pek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, yapı kullanıma açıldıktan sonra ortaya çıkabilecek sorunların simülasyon teknolojileri ile önceden, daha tasarım aşamasındayken görülmesi hayati öneme sahiptir. 1986 yılında Londra'nın King's Cross istasyonunda çıkan yangında 32 kişi hayatını kaybetmiş, 150 kişi de yaralanmıştır. Güney Kore'deki Daegu metrosunda 2003 yılında gerçekleşen yangında ise 198 kişi ölmüş, 147 kişi yaralanmıştır [4]. Bu örnekleri çoğaltmak mümkün olmakla birlikte, bu tip olayların genelde büyük şehirlerin kalabalık metro hatlarında gerçekleştiği gözlemlenmektedir. İstanbul'da, yoğunluğu metro hatları olmak üzere, raylı sistemleri kullanan günlük toplam yolcu sayısı 2 milyon 500 bin kişiyi aşmış durumdadır [5]. Bu kullanıcıların yangın başta olmak üzere her türlü acil duruma karşı güvenle seyahat etmelerini sağlamak kadar, doğru tasarımlarla seyahat sürelerini mümkün olduğunca kısaltmak da önemlidir. Günümüzde tasarlanan yapıların bazıları kullanıma açıldıktan sonra pek çok sorun ile karşılaşmaktadır. Yürüyen merdivenlerin ve asansörlerin yetersiz kalması nedeniyle bu bölgelerde meydana gelen sıkışıklıklar, yeterli genişliğe sahip olmayan koridorlarda ve darboğazlarda yaşanan yoğunluklar bunlardan sadece bazılarıdır. Fakat inşa süreci tamamlandıktan sonra çoğu yapıda artık geri dönüş yoktur ve milyonlarca insan uzun yıllar boyunca binayı o şekilde kullanmak zorundadır. Halbuki güncel yaya simülasyonu yazılımları ile tüm sirkülasyon ve tahliye sorunlarını önceden görmek, istasyonların hizmet seviyelerini artırmak, milyonlarca kişinin yolculuk sürelerini azaltmak ve güvenliklerini en üst seviyeye çıkarmak mümkündür.

Literatürde, gerek mevcut gerekse henüz inşa edilmemiş metro istasyonlarının normal ve acil durum kullanımları senaryolarının simüle edildiği çalışmalar mevcuttur. Clifford [6] Danimarka, İngiltere ve Portekiz'de yer alan farklı metro istasyonları üzerinde yolcu simülasyonları gerçekleştirerek metro araçlarının işletme saatlerinde ve sefer sıklıklarında yapılacak değişikliklerin, yolcu yoğunlukları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Li vd. [7] Hong Kong'un en kalabalık metro istasyonlarından birinde, araca iniş ve binişler esnasında platformda yaşanan karmaşa ve yoğunlukların, araç sefer saatlerinde ve yolcu davranışlarındaki değişikliklerle azaltılabileceğini simülasyon ortamında ispatlamışlar ve sahaya başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlamışlardır. Seriani ve Fernandez [8] metro araçlarının kapıları ile platformda bu kapıların önündeki yolcu yoğunlukları üzerinde bir simülasyon çalıştırması gerçekleştirmişler; ardından da özellikle orta kesimlerdeki bazı tren kapılarının aşırı yoğunluğa maruz kalırken diğer kapıların çok daha az tercih edilmesi nedeniyle yaşanan sıkışıklıklara dikkat çekerek çözüm önerileri getirmişlerdir. Zhang vd. [9] Pekin metrosunun Wangfujing istasyonunda zirve saatlerde yaşanan aşırı yolcu yoğunluğunun istasyon geneline nasıl dağıtılabileceği, mekanların nasıl daha verimli kullanılabileceği ve bilet holündeki turnikelerde yaşanan kapasite yetersizliklerinin önüne

nasıl geçilebileceğini gerçekleştirdikleri bir simülasyon üzerinden açıklamaktadırlar. Yin vd. [10] raylı sistemlerde kalabalık yolcu gruplarının hareketlerinin etkili bir talep yönetim stratejisi ile nasıl yönlendirilmesi gerektiği üzerine teoriler geliştirmiş, Pekin metrosuna ilişkin bir simülasyon çalışması ile bu teorilerinin bilimsel geçerliliğini kanıtlamışlardır. Metro istasyonlarındaki genel sirkülasyon problemleri ve platform katı gibi yolcu bekleme bölgelerindeki problemlere odaklanan çalışmalara ek olarak, yangın başta olmak üzere acil durum tahliye senaryoları üzerine yoğunlaşan yayınlar da bulunmaktadır. Zhong vd. [11] öncelikle metro istasyonlarını kullanacak yolcular için planlama, tasarım, yapım ve işletme süreçlerinde ne gibi koruyucu çalışmalar yapıldığını anlatmışlar; ardından da Çin’de yer alan Guangzhou metro istasyonunda çıkabilecek olası bir yangında tüm yolcuların nasıl ve ne kadar sürede güvenli alana tahliye edilebileceğini gösteren bir simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Kallianiotis vd. [12] öncelikle yer altında inşa edilen metro istasyonlarının güvenlik açısından son derece kritik olduklarını ve özel tasarım stratejilerine gereksinim duyduklarını vurgulamış, ardından klasik elle hesaplama yöntemleri ile bilgisayar ortamındaki simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yunanistan’ın Selanik metrosunda gerçekleştirdikleri çalışma neticesinde simülasyon sonuçlarının özellikle en kötü durum senaryolarında çok daha doğru ve detaylı sonuçlar verdiğini, acil durumdaki yolcu hızlarının ve acil çıkış kapısı tercihlerinin daha isabetli bir şekilde öngörüldüğünü rapor etmişlerdir. Li vd. [13] acil durum tahliye senaryolarında sadece klasik matematiksel modelleme tekniklerinin yeterli olmayacağını, farklı karaktere sahip insan gruplarının hissedecekleri değişik baskı ve panik faktörlerinin de simüle edilmesi gerektiğini teorik olarak açıklamışlar ve ardından Pekin metrosunda yer alan Xizhimen istasyonu üzerinde farklı tahliye senaryolarını deneyerek birbirleri ile karşılaştırmışlardır. Siong vd. [14] geleneksel acil durum tahliye hesaplamalarında platform katındaki yolcuların tüm acil çıkışlara eşit olarak dağıtıldığına dikkat çekmekte ve gerçek hayatta bunun her zaman mümkün olamayacağını vurgulamaktadırlar. Mimari tasarımlara göre bazı acil çıkış kapıları son derece rahat görülebilir ve erişilebilir iken, diğerlerine çok daha zor ulaşılabilir. Bu durumda, acil durumda yolcular tüm girişlere eşit dağılmayacaktır ve ne olacağını öngörebilmenin en iyi yolu 3 boyutlu bir yaya simülasyonu yazılımı kullanmaktır.

Ulusal literatüre bakıldığında ise bu tip çalışmaların genellikle mühendislik disiplinleri tarafından gerçekleştirildiği görülmüş, konuyu mimari bakış açısı ile ele alan çok az çalışmaya rastlanmıştır. Özdamar [15] yeraltı metro istasyonlarında pasif yangın güvenliğinin sağlanması için gerekli ulusal ve uluslararası standartları karşılaştırmış, her birindeki parametreler doğrultusunda yolcu simülasyonu çalışmaları gerçekleştirmiş ve sonuç olarak performans odaklı simülasyon yazılımlarının istasyon tasarım süreçlerinde kullanımının yangın güvenliği açısından faydalı olduğunu belirtmiştir. Koç ve Ceylan [16], Varşova Metrosu Powisle İstasyonunda uygulanan çalışma doğrultusunda CFD ve yolcu simülasyon yazılımlarının beraber kullanılması ile üç boyutlu duman, sıcak hava ve insan hareketlerinin geleneksel yöntemlere göre daha gerçekçi bir şekilde modellenebileceğini söylemektedirler. Kırancıoğlu ve Döker [17] ergonomik ve fonksiyonel metro istasyonu tasarımları için yaya simülasyonu teknolojilerinden faydalanılabileceğini belirtmiş ve örnek bir metro istasyonuna ilişkin normal durum işletme senaryosu üzerinden öneriler getirmişlerdir. Türkölmez ve Güneş [18], İzmir Metrosu’nun Konak istasyonu için üç farklı senaryo doğrultusunda acil durum tahliye simülasyonu gerçekleştirmiş, mevcut istasyonun iki senaryoda yolcu güvenliği için gereken sürede tahliye edilemediği sonucuna varmış ve hem tasarım hem de işletme açısından alınması gereken tedbirleri belirtmişlerdir. Bu çalışma kapsamında; seçilen örnek bir metro istasyonunun tüm katları öncelikle normal işletme senaryosu doğrultusunda yolcu sirkülasyonu açısından ele alınmış, ardından da yolcu yüklerine göre kapasite analizi gerçekleştirilerek zirve saat acil durum tahliye senaryoları değerlendirilmiştir. Bu incelemelerin tamamı geçerliliği bilimsel olarak kanıtlanmış 3 boyutlu bir yaya simülasyonu yazılımı ile gerçekleştirilmiş, izlenen yöntem ve bulgular aşağıda verilmiştir.

2. Yöntem

Literatür taraması göstermektedir ki; gerek normal işletme durumundaki yolcu sirkülasyonlarının test edilmesinde gerekse acil durum tahliye senaryolarının değerlendirilmesinde ilk adım, metro istasyonuna ilişkin kapasite analizlerinin gerçekleştirilmesi ve yolcular tarafından kullanılacak tüm mekanların hizmet seviyelerinin belirlenmesidir. Kapasite analizi, bir metro istasyonunun ve sahip olduğu tüm mekanların kullanıcılar açısından güvenli, konforlu ve alan olarak kullanıcı sayısı açısından yeterliliğinin ölçülmesidir [19]. Metro istasyonlarında gerçekleştirilen kapasite analizlerinde kullanılan yöntemlerden biri de hizmet seviyesinin ölçülmesidir. Hizmet Seviyesi (Level of Service) terimi günümüzde kısaca bir mekân ya da güzergâhta kullanıcılar tarafından deneyimlenen farklı yoğunlukları derecelendirme amaçlı olarak kullanılmaktadır. Özellikle mimari tasarımlar gerçeğe dönüşmeden önce, kullanıcı sayıları doğrultusunda tüm mekânların hizmet seviyelerinin belirlenmesi, kritik hataların önceden görülmesini sağlamak ve gerekli revizyonların gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır [20]. Daha önce araç sayıları ve trafik yoğunluklarını tanımlama amaçlı kullanılan bu terim, yayalar açısından ilk defa Fruin [21] tarafından 1971 yılında kapsamlı olarak ele alınmış; düzayak yürüme yolları, merdivenler ve bekleme alanları için ayrı ayrı hizmet seviyesi standartları getirilmiştir (Tablo 1). Hizmet seviyesi arttıkça, yani hiyerarşideki renkler kırmızıdan maviye doğru gittikçe kişi başına düşen alan çoğalmakta; kullanıcıların seyahat konforu ve güvenliği artarken, yolculuk süreleri ise kısalmaktadır [22].

Tablo 1. Fruin hizmet seviyesi hiyerarşisi [21]

Hizmet Seviyesi	Yürüme Yolu (m ² /kişi)	Merdiven (m ² /kişi)	Bekleme Alanı (m ² /kişi)
A	> 3,24	> 1,85	> 1,21
B	3,24 - 2,32	1,85 - 1,39	1,21 - 0,93
C	2,32 - 1,39	1,39 - 0,93	0,93 - 0,65
D	1,39 - 0,93	0,93 - 0,65	0,65 - 0,28
E	0,93 - 0,46	0,65 - 0,37	0,28 - 0,19
F	< 0,46	< 0,37	< 0,19

Bu çalışma kapsamında, hizmet seviyelerinin belirlenmesinde üç boyutlu ve ajan tabanlı bir simülasyon yazılımı olan Massmotion kullanılmıştır. Ajan tabanlı modelleme; bir sistemin ya da bir yapının önceden belirlenmiş kurallar doğrultusunda ajan olarak adlandırılan ve içinde bulunduğu şartlara göre bireysel olarak kendi kararlarını kendi verebilen varlıklar kullanılarak bilgisayar ortamında test edilmesi esasına dayanır [23]. Bu modelleme tekniğini kullanan Cromosim, Crowd Dynamics, AnyLogic, InControl, Quadstone Paramics, Crowdsim3D, PTV Viswalk, Legion gibi yazılımlar bulunmaktadır [24]. Fakat bu yazılımların içinde geliştirilmesi durdurulmuş olanlar, hala 32 bit işletim sistemi üzerinde çok yavaş çalışanlar, ajan sayısı açısından sınırlamalar içerenler, sadece iki boyutlu olanlar ve bilimsel geçerliliği ispatlanmamış olanlar mevcuttur. 64 bit işletim sistemleri ile uyumlu çalışan Massmotion yazılımının geçerliliği, hassasiyet ve doğruluk seviyelerinin yeterliliği; başta Mashhadawi [25], O'Donnell vd. [26], Arup [27] olmak üzere pek çok bilimsel çalışma ile ispatlanmıştır. Bu nedenden ötürü, çalışma için Massmotion kullanımında karar kılınmış, tüm analiz ve hesaplamalar bu yazılım üzerinden gerçekleştirilmiştir. Massmotion yazılımının arka planında Sosyal Kuvvet Modeli çalışmaktadır. Bu model, tek bir insanın hareketlerini tahmin etmenin çok zor olduğu, ama kalabalık ile birlikte

hareket eden bireylerin davranış biçimlerinin istatistiki açıdan anlamlı derecede tahmin edilebileceği esasına dayanmaktadır. Özellikle metro istasyonu gibi kalabalık mekanlarda, insanlar hedeflerine ulaşmak için genelde en kısa yolu tercih ederler ve kendilerine göre normal bir yürüyüş hızıyla ilerlerler. Fakat çevrelerindeki diğer yayaların konumları ve hareketleri ile mekândaki diğer fiziksel etmenler, yolcuların davranış biçimleri ve izleyecekleri güzergâh üzerinde etkili olurlar. Yayalar da mevcut ve değişken çevresel koşullar doğrultusunda kendilerine alternatif güzergâhlar belirleyerek hedeflerine mümkün olan en kısa sürede ulaşmaya çalışırlar. Sosyal Kuvvet Modelinin formülasyonu temelde Newton tarafından oluşturulan hareket yasalarına dayanmaktadır. Bu modele göre, hedefleri doğrultusunda bir yerden bir yere gitmeye çalışan yayalara etki eden itici ve çekici kuvvetler vardır. İtici kuvvetler bireylerin önüne çıkan engeller ve diğer bireyler ile aralarına belli bir mesafe koyma isteği olabilirken; çekici kuvvetler ise diğer yayaların grup halinde belli bir yöne doğru hareketleri veya bireylerin ilgi alanlarına giren cansız nesnelere olabilir [28]. Massmotion yazılımının arka planındaki ajan tabanlı modelleme ve sosyal kuvvetler algoritması sayesinde, simüle edilen yayalar neredeyse gerçek hayattaki insanlar gibi hareket etmektedirler. Bahsi geçen yaya simülasyonu teknolojisi, seçilmiş örnek bir metro istasyonu üzerinde uygulanmıştır. Çalışma alanı olarak Türkiye'nin en kalabalık şehri olan İstanbul'da [3] henüz tasarım aşamasındaki bir metro istasyonu seçilmiştir. Güvenlik amacıyla metro istasyonunun adı, konumu ve hangi raylı sistem hattı üzerinde olduğuna ilişkin bilgiler gizlenmiştir. İlgili raylı sistem hattına ve işletmeye özgü bazı değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yolcu simülasyonunda kullanılan hat esaslı değerler

Değer	Birim	Kapasite
Sefer Aralığı (Headway)	dk	2,25
Peron Boyu	m	180
Peron Genişliği	m	4,2
Uyarı Bandı	m	0,5
Vagon Sayısı	adet	8
Vagon Kapasitesi	kişi/vagon	300

Kapasite analizinin gerçekleştirilmesi ve hizmet seviyelerinin belirlenebilmesi için, hat esaslı değerlere ek olarak, ulusal ve uluslararası standartlar doğrultusunda bazı genel ön kabullerin yapılması gerekmektedir. Tablo 3'te verilen ön kabuller raylı sistemler alanındaki ulusal (TS 12127: Şehir içi yollar - Raylı taşıma sistemleri Bölüm 1: Yer altı istasyon tesisleri tasarım kuralları) ve uluslararası (NFPA 130: A.B.D. Ulusal Yangından Korunma Derneği - Sabit Kılavuz Yollu Taşıma ve Yolculu Raylı Sistemler için Standartlar) geçerliliği olan kaynaklardan yola çıkılarak hazırlanmıştır.

Tablo 3. Yolcu simülasyonunda kullanılan genel kapasite değerleri ve ön kabuller

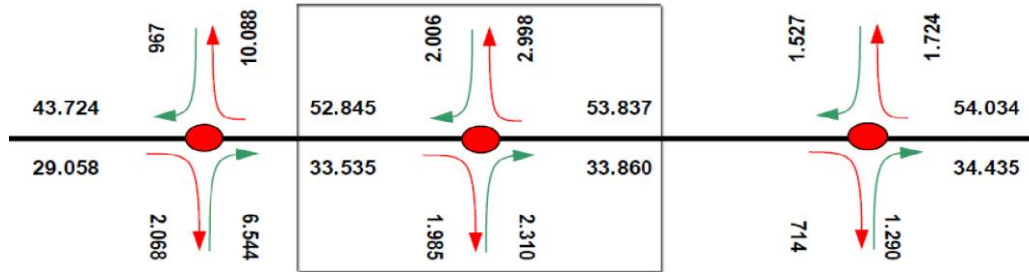
Değer	Birim	Kapasite
Zirve (Pik) Saat Faktörü	katsayı	1,25
Büyütme Faktörü	katsayı	1
Kaçan Tren Faktörü	katsayı	2
Yürüyen Merdiven Kapasitesi (Normal İşletme, Hız: 0,65 m/sn)	kişi/dk/m	120
Yürüyen Merdiven Kapasitesi (Acil Durum)	kişi/dk/m	75
Merdiven Kapasitesi (Normal İşletme)	kişi/dk/0,60m	35

Merdiven Kapasitesi (Acil Durum)	kişi/dk/m	56
Yürüme Hızı (Peron - Acil Durum)	m/dk	37,7
Yürüme Hızı (Konkors - Acil Durum)	m/dk	61
Yürüme Hızı (Merdiven Yukarı - Acil Durum)	m/dk	14,6
Peron Kapasitesi (Normal İşletme)	m ² /kişi	0,5
Güvenli Alan Kapasitesi (izdiham durumu)	m ² /kişi	0,28
Bilet Holü Kapasitesi	m ² /kişi	1
Turnike Kapasitesi - Giriş (Normal İşletme)	kişi/dk	30
Turnike Kapasitesi - Çıkış (Normal İşletme)	kişi/dk	40
Turnike Kapasitesi (Acil Durum - Kapı Tipi)	kişi/dk	50
Turnike Kapasitesi (Acil Durum - Kollu)	kişi/dk	25
Turnike Acil Çıkış Kapısı	kişi/dk	60
Peron-Koridor-Rampa Kapasitesi (Acil Durum)	kişi/dk/m	82
Kapı Çıkış Kapasitesi (Tek Kanatlı Kapı - Acil Durum)	kişi/dk/m	60
Kapı Çıkış Kapasitesi (Çift Kanatlı Kapı - Acil Durum)	kişi/dk/m	82

Çalışmada kullanılacak yöntemin, standartların, hat esaslı değerlerin ve ön kabullerin belirlenmesinin ardından seçilen örnek metro istasyonunda normal işletme ve acil durum tahliye senaryoları doğrultusunda uygulama yapılmış, ilgili hesaplamalar ve bulgular aşağıda verilmiştir.

3. Bulgular

Herhangi bir yapıda yaya simülasyonu çalışması yapılabilmesi, kapasite analizlerinin gerçekleştirilmesi ve hizmet seviyelerinin belirlenebilmesi için bilinmesi gereken en önemli faktör o yapının en yoğun olduğu saatteki (pik ya da zirve saat olarak adlandırılır) kullanıcı sayısıdır. Bu çalışmaya konu olan, A ve B noktaları arasında çalışan raylı sistem hattındaki metro istasyonuna ait 2040 yılı zirve saat yolculuk değerleri Şekil 1'deki kılçık diyagram üzerinde gösterilmiştir. A-B yönü 'Hat 1', B-A yönü ise 'Hat 2' olarak adlandırılmıştır.



Şekil 1. Metro istasyonu 2040 yılı zirve saat tahmini yolcu sayıları

Kılçık diyagram göstermektedir ki metro istasyonuna gelindiğinde; Hat 1 üzerinde A-B istikametinde hareket eden trenden 1985 yolcu inmekte, 2310 yolcu ise araca binmektedir. İstasyona gelen trenin yolcu yükü 33535 iken, bu noktadan sonra trenin yolcu yükü 33860 olmaktadır. Kılçık diyagramın üst kısmında ifade edilen ve Hat 2 üzerinde B-A istikametinde hareket eden trenden ise 2998 yolcu inmekte, 2006 yolcu araca binmektedir. İstasyona gelen trenin yolcu yükü 53837 iken, bu noktadan sonra trenin yolcu yükü 52845 olmaktadır. Tablo 4, Hat-1 ve Hat-2'ye ait yolculuk bilgilerini içermektedir.

Tablo 4. Metro istasyonu Hat 1 ve Hat 2 yolculuk bilgileri

Yolculuk Bilgileri	Hat - 1	Hat - 2	Toplam
Binen Yolcu	2.310 kişi/sa	2.006 kişi/sa	4.316 kişi/sa
İnen Yolcu	1.985 kişi/sa	2.998 kişi/sa	4.983 kişi/sa
Yolcu Yüğü (İnen ve Binen Toplam Yolcu)	4.295 kişi/sa	5.004 kişi/sa	
Tren Yüğü	33.535 kişi	53.837 kişi	
Toplam Yolculuk:			9.299 kişi/saat

Metro istasyonunda Hat 1 doğrultusunda inen ve binen yolcuların toplam sayısı 4295, Hat 2 doğrultusunda inen ve binen yolcuların toplam sayısı ise 5004 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla zirve saatte metro istasyonunu toplam 9299 yolcunun kullanması beklenmektedir. Ayrıca; inen ve binen yolcuları toplam iki noktada yer alan giriş ve çıkışlara eşit olarak dağıttığımızda görülmektedir ki; toplam binen sayısı 4316 kişi olup her bir girişe 2158 yolcu düşmekte, toplam inen sayısı ise 4983 kişi olup her bir çıkışı 2491 yolcu kullanmaktadır. Yolcu sayılarının anlaşılmasının ardından istasyona ilişkin normal işletme ve acil durum tahliye simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

3.1. Normal işletme senaryosu

Normal işletme senaryosunun gerçekleştirilebilmesi için, verilen yolculuk değerlerine ek olarak, zirve saatte tren seferlerine yansıyan ortalama yolculuk değerlerinin de bulunması gerekmektedir. Bu sayede her trene ilişkin inen ve binen yolcuların sayısı bulunarak gerek istasyon geneli gerekse de perondaki yolcu yüklerinin dağılımını bulmak mümkün olacaktır. Normal İşletme senaryosunda sefer başına düşen ortalama yolcu sayısını bulmak için gereken formül, Denklem 1.'de verilmiştir.

$$O_y = Y_y : 60 * S_a * K_t * B_f \quad (2)$$

O_y : Ortalama Yolcu Sayısı (sefer başına toplam inen ve binen yolcu sayısı)

Y_y : Yolcu Yüğü (zirve saat boyunca toplam inen ve binen yolcu sayısı)

Süre: 60 dk, S_a : Sefer Aralığı (dk), K_t : Kaçan Tren faktörü, B_f : Büyütme Faktörü

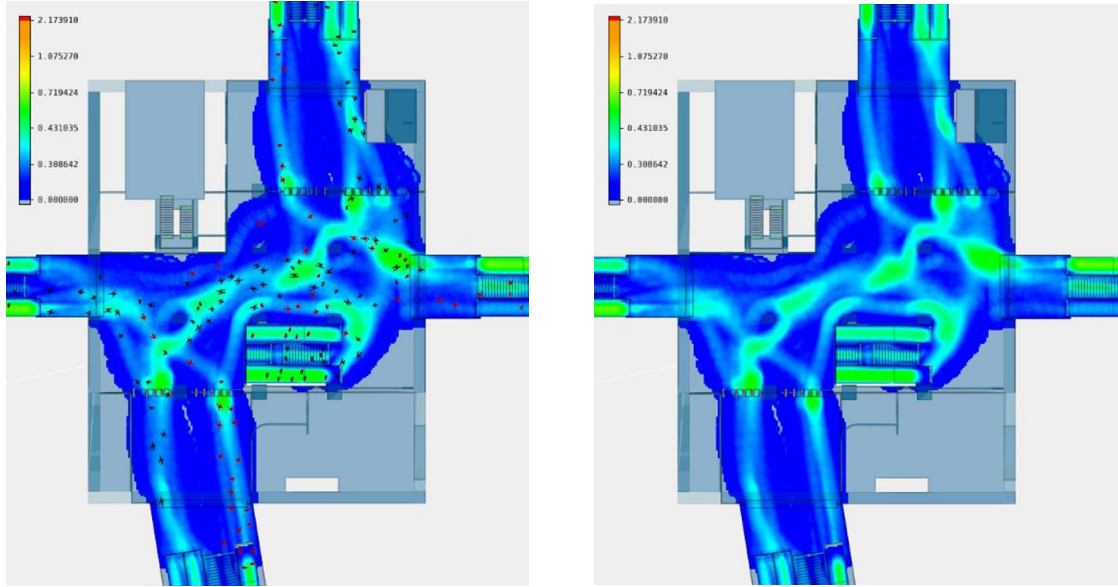
Metro hattındaki ortalama sefer aralığı 2,25 dakika olarak verilmiştir. Bir trenin kaçması durumunda perondaki yolcu sayısı, ilgili hat için, iki katına çıkmaktadır. Bu nedenle Kaçan Tren faktörü için 2 katsayısı kullanılmıştır. Büyütme faktörü ise, yolcu tahminleri 2040 yılındaki en yüksek seviyeye göre yapıldığı için bu çalışma kapsamında 1 olarak alınmıştır. Buna göre, Hat-1 ve Hat-2 için metro istasyonundaki sefer başına ortalama yolcu sayıları şu şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 5. Metro istasyonu Hat-1 ve Hat-2 için sefer başına ortalama yolcu sayıları

Formül:	Yolcu Yüğü	/	Süre (dk)	x	Sefer Aralığı (dk)	x	Kaçan Tren Faktörü	x	Büyütme Faktörü	=	Sefer Başına Ort. Yolcu
Hat - 1	4295	/	60	x	2,25	x	2	x	1	=	322 kişi
Hat - 2	5004	/	60	x	2,25	x	2	x	1	=	375 kişi

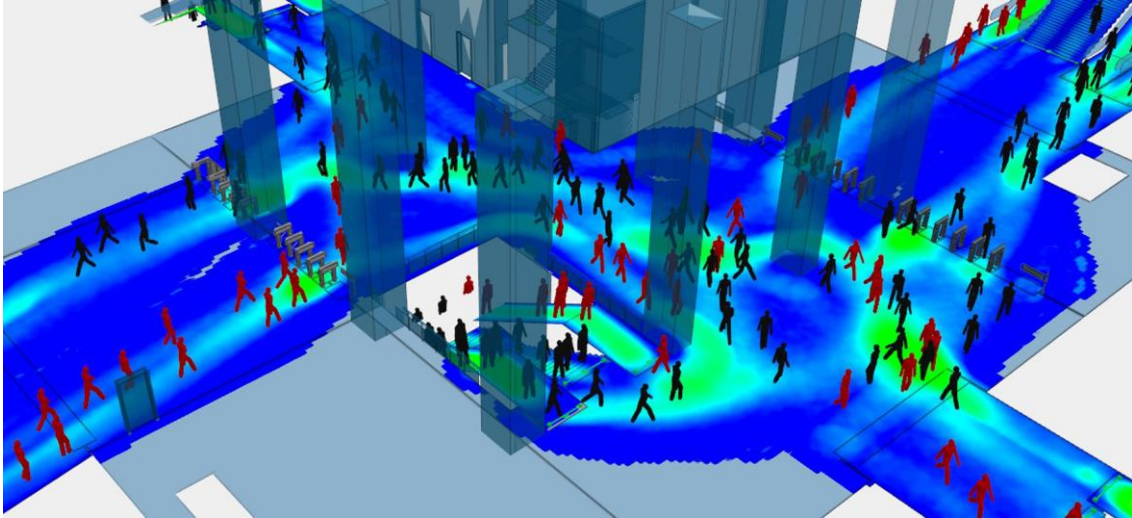
Gerçekçi bir yolcu simülasyonu çalışması için ön kabuller, hesaplanan yolculuk sayıları, hat esaslı değerler ve benzeri verilerin hepsinin bir araya getirilerek 3 boyutlu bir simülasyonu yazılımı ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Autodesk Revit Architecture yazılımında üç boyutlu olarak tasarlanan istasyon Massmotion yazılımına aktarılmıştır. Simülasyonda, yolcular istasyona girerek önce bilet holü katına inmektedirler. Bu nedenle, öncelikle bilet holüne ilişkin

ortalama yoğunluk analizi gerçekleştirilmiş ve Fruin Hizmet Seviyesi Standartları doğrultusunda renklendirilmiştir. Ortaya çıkan yoğunluk haritaları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bilet holü katı ortalama yolcu yoğunluğu haritası

Şekil 3, Bilet Holü katına ilişkin üç boyutlu simülasyon görüntüsünü içermektedir.



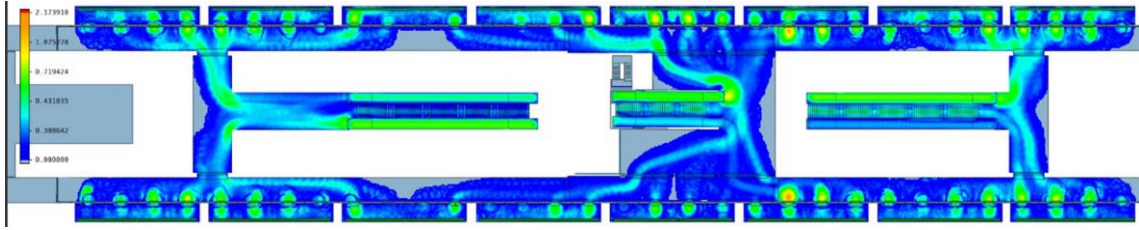
Şekil 3. Bilet holü katı 3d simülasyon görünümü

Bilet Holü yolcu simülasyonu sonuçları göstermektedir ki;

- Bu katta yolcu yükü dağılımı normaldir ve sirkülasyon açısından problem teşkil edecek noktalar bulunmamaktadır.
- 10 normal ve 2 engelli turnikesinden oluşan girişler ile 8 normal ve 2 engelli turnikesinden meydana gelen çıkış turnikelerinin sayısı, yolculuk değerlerine göre yeterli seviyededir.
- Katın orta bölümünde yer alan ve perona iniş için U dönüşü gerektiren yürüyen merdiven bağlantısı yoğun kullanımlarda çok tercih edilmeyen bir faktör olmakla birlikte; bu metro istasyonu için öngörülen yolculuk değerlerine bakıldığında bu dönüşün sirkülasyonu olumsuz etkileyecek derecede etkisinin olmadığı görülmüştür.

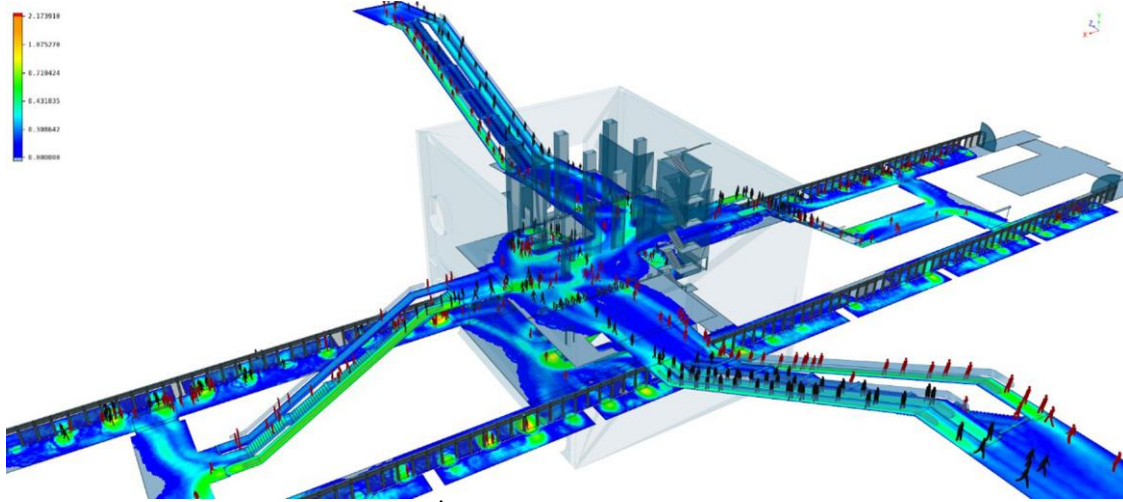
- Hem sabit hem de yürüyen merdivenler sayı ve genişlik açısından yeterlidir, konumları doğrudur.
- Bilet holünün iki yanında doğrudan peron katına erişimi sağlayan sabit merdivenler, yürüyen merdivenler ve asansörler bulunmaktadır. Belirtilen dikey sirkülasyon elemanlarının sayısı yeterlidir.

Konkors katının ardından peron katına ilişkin de 3 boyutlu simülasyon çalışması gerçekleştirilmiş, sonuç haritası Şekil 4'te verilmiştir. İstasyonun orta kısmındaki merdivenler yanlardaki merdivenlere göre daha kısa olarak gözükmetedirler. Bunun nedeni, konkors katından inişte orta kısımda bir balkon katının bulunması ve yolcuların bu katta U dönüşü yaparak peron katına ulaşmalarıdır.



Şekil 4. Peron katı ortalama yoğunluk haritası

Yoğunluk haritasına göre, peron katı yolcu yükü dağılımı normal seviyededir ve hem sirkülasyon hem de bekleme alanları sorunsuz bir şekilde hizmet vermektedir. Platformlar hem bekleyen yolcular hem de trene inip binen yolcular açısından yeterli uzunluğa ve derinliğe sahiptir. Peron katında yer yer sarı ve turuncu alanlar oluşmaktadır ki bu durum tren kapılarına denk gelen bölgelerde son derece normaldir. Bu renkler, kısa süreli bekleme olduğunu ifade etmektedir. Normal işletme senaryosuna ilişkin, metro istasyonunun tamamını kapsayan 3 boyutlu yolcu simülasyonu sonucu Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. İstasyon geneli hizmet seviyeleri

Normal işletme senaryosu doğrultusunda gerçekleştirilen 3D yolcu simülasyonu çalışması göstermiştir ki, istasyonun mimari tasarımı 2040 yılı yolculuk sayıları doğrultusunda herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Yolcu sirkülasyonu son derece rahat, ortak mekânlar ve koridorlar yeterince geniştir. Sabit ve yürüyen merdivenler ile asansörlerin konum ve sayıları yeterli, dikey sirkülasyon istasyon genelinde sorunsuzdur.

3.2. Acil durum tahliye senaryosu

Tahliye simülasyonu, bir yapıyı kullanan insanların acil bir durumda, standartlar tarafından belirlenen süre dâhilinde güvenli alana ulaşmaları için ayrılan tüm yatay ve dikey sirkülasyon elemanlarının, koridorların, merdivenlerin, acil çıkış noktalarının, acil çıkış kapısı genişliklerinin, kısacası insanların zarar görmeden güvenli alana geçiş için gereken tüm faktörlerin yeterli olup olmadığının test edilmesidir [29]. Bu testin gerçekleştirilebilmesi için her yapıda olduğu gibi metro istasyonlarında da uyulması gereken ulusal ve uluslararası standartlar mevcuttur. ‘TS 12127: Şehir içi yollar - Raylı taşıma sistemleri Bölüm 1: Yer altı istasyon tesisleri tasarım kuralları’ ve ‘Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik’ bunlardan en önemlileridir. Ulusal standartlara ek olarak ülkemizde sıklıkla başvurulmuş temel kaynaklardan birisi de özellikle tren istasyonları, metro istasyonları, tren ve metro araçlarının kendileri, bu araçların üzerinde gittiği raylar için olması gereken standartları ve gereklilikleri içeren NFPA 130’dur. Bunların yanı sıra yolcu güvenliğine ilişkin acil durum tahliye senaryoları ile ilgili uyulması gereken kuralları da açıklamaktadır [30]. NFPA 130 tarafından metro istasyonu acil durum tahliye senaryolarının değerlendirilmesi için bazı kurallar belirlenmiştir ve bu çalışmadaki tahliye simülasyonları da bu kurallara uyularak gerçekleştirilmiştir. Acil duruma ilişkin tanımlanan bu kurallar şu şekildedir:

- Acil durumda her iki trenin de tamamen dolu olarak aynı anda istasyonda olacakları varsayılacak, hem trenlerden inen hem de o sırada platformda bekleyen yolcuların toplamı üzerinden tahliye hesapları gerçekleştirilecektir.
- Tek yön kaçış mesafesi en fazla 25 metre olmalıdır.
- Alternatifli çıkışlarda, platformun en uzak noktası ile o noktaya en yakın çıkış arasındaki mesafe 100 metreden az olmalıdır.
- Her katta bir adet yürüyen merdiven bakımda ya da servis dışı olarak kabul edilecek, tahliye hesaplarında kullanılmayacaktır.
- Acil durumda istasyondaki tüm yürüyen merdivenler yukarı yönde çalıştırılacaktır.
- Asansörler yangına dayanıklı olarak imal edilmişlerse; bir tanesi servis dışı bir tanesi de itfaiye kullanımına ayrıldıktan sonra geri kalanlar tahliye amaçlı kullanılabilir. Eğer iki ve daha az sayıda asansör varsa hiçbiri kullanılmayacaktır.
- Platformdaki tüm yolcular en fazla 4 dakika içinde tahliye olmalıdır.
- İstasyondaki tüm yolcular 6 dakika içinde güvenli alana geçmelidir.

Metro istasyonuna yönelik acil durum tahliye simülasyonunun gerçekleştirilebilmesi için öncelikle platformların tahliye edilme süresinin bulunması ve 4 dakika şartının sağlanıp sağlanmadığı anlaşılmalıdır. Bunun için de öncelikle hat bazlı acil durum tahliye yüklerinin belirlenmesi, perondan ne kadar yolcunun tahliye edileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda tren yolcu yüklerinin ve peronda tren bekleyen yolcuların sayılarının belirlenerek toplanması gerekmektedir. Tren yolcu yükü hesabına ilişkin formül Denklem 2.’de; peronda bekleyenlere ilişkin yolcu yükü hesaplama formülü ise Denklem 3.’te verilmiştir.

$$T_{yy} = T_y : 60 * P_s F * S_a * K_t \quad (3)$$

T_{yy} : Tren Yolcu Yükü, T_y : Tren Yükü, Süre: 60 dk

S_a : Sefer Aralığı (dk), K_t : Kaçan Tren faktörü, $P_s F$: Pik Saat Faktörü

Not: Sefer Aralığı 2,25 dk; pik saat faktörü 1,25; Kaçan Tren faktörü 2 olarak alınmıştır.

$$Y_y = B_y : 60 * P_s F * S_a * K_t \quad (4)$$

Y_y : Peron Yolcu Yükü (Peronda Tren Bekleyen Ortalama Yolcu Sayısı)

B_y : Binen Yolcu, Süre: 60 dk, S_a : Sefer Aralığı (dk), K_t : Kaçan Tren faktörü, $P_s F$: Pik Saat Faktörü

Not: Sefer Aralığı 2,25 dk; pik saat faktörü 1,25; Kaçan Tren faktörü 2 olarak alınmıştır.

Acil durum tahliye yükü kapasite hesabı yapılırken 2 senaryo üzerinden gidilmiştir. Yanan trenin Hat-1 veya Hat-2’de olması durumunda ortaya çıkabilecek yolcu yükleri hesaplanmış ve aşağıda verilmiştir.

Tablo 6. Senaryo-1 acil durum tahliye yükü kapasite hesabı

SENARYO - 1											
Peronda Bekleyen Yolcu Sayısı	Binen Yolcu	/	Süre (dk)	x	Zirve Saat Faktörü	x	Sefer Aralığı (dk)	x	Kaçan Tren Faktörü	= Yolcu Yüğü	
Hat-1 Doruk Yön	2.310	/	60	x	1,25	x	2,25	x	2	= 217 kişi	
Tren İçi Yolcu Sayısı	Tren Yüğü	/	Süre (dk)	x	Zirve Saat Faktörü	x	Sefer Aralığı (dk)	x	Kaçan Tren Faktörü	= Tren Yüğü	Tren Maksimum Yüğü*
Hat-1 Doruk Yön	33.535	/	60	x	1,25	x	2,25	x	2	= 3.144 kişi	2.400 kişi
Peronda Bekleyen Yolcu Sayısı	Binen Yolcu	/	Süre (dk)	x	Zirve Saat Faktörü	x	Sefer Aralığı (dk)	=	Yolcu Yüğü		
Hat-2 Normal İşletme	2.006	/	60	x	1,25	x	2,25	=	94 kişi		
Tren İçi Yolcu Sayısı	Tren Yüğü	/	Süre (dk)	x	Zirve Saat Faktörü	x	Sefer Aralığı (dk)	=	Tren Yüğü	Tren Maksimum Yüğü	
Hat-2 Normal İşletme	53.537	/	60	x	1,25	x	2,25	=	2.510 kişi	2.400 kişi	
Acil Durum Peron Toplam Yolcu Yüğü (Yolcu + Tren Yüğüleri) =										5.111 Kişi	

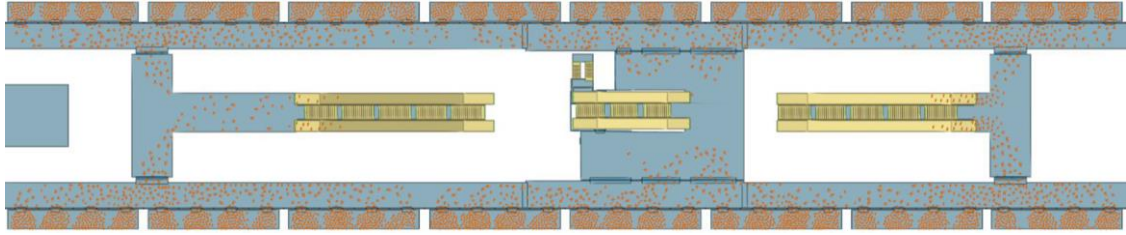
* Tren yolcu yükünün 2400’den yüksek çıktığı durumlarda, trenin maksimum yolcu kapasitesi olan 2400 değeri esas alınmıştır.

Tablo 7. Senaryo-2 acil durum tahliye yükü kapasite hesabı

SENARYO - 2											
Peronda Bekleyen Yolcu Sayısı	Binen Yolcu	/	Süre (dk)	x	Zirve Saat Faktörü	x	Sefer Aralığı (dk)	x	Kaçan Tren Faktörü	= Yolcu Yüğü	
Hat-2 Doruk Yön	2.006	/	60	x	1,25	x	2,25	x	2	= 188 kişi	
Tren İçi Yolcu Sayısı	Tren Yüğü	/	Süre (dk)	x	Zirve Saat Faktörü	x	Sefer Aralığı (dk)	x	Kaçan Tren Faktörü	= Tren Yüğü	Tren Maksimum Yüğü
Hat-2 Doruk Yön	53.537	/	60	x	1,25	x	2,25	x	2	= 5.019 kişi	2.400 kişi
Peronda Bekleyen Yolcu Sayısı	Binen Yolcu	/	Süre (dk)	x	Zirve Saat Faktörü	x	Sefer Aralığı (dk)	=	Yolcu Yüğü		
Hat-1 Normal İşletme	2.310	/	60	x	1,25	x	2,25	=	108 kişi		
Tren İçi Yolcu Sayısı	Tren Yüğü	/	Süre (dk)	x	Zirve Saat Faktörü	x	Sefer Aralığı (dk)	=	Tren Yüğü		
Hat-1 Normal İşletme	33.535	/	60	x	1,25	x	2,25	=	1.572 kişi		
Acil Durum Peron Toplam Yolcu Yüğü (Yolcu + Tren Yüğüleri) =										4.268 Kişi	

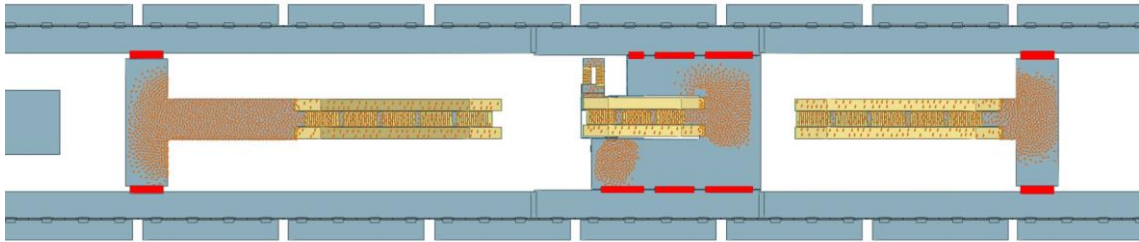
Senaryo 1 neticesinde acil durum peron yolcu yükü 5111 kişi olarak tespit edilmiş, Senaryo 2 neticesinde ise 4268 olarak belirlenmiştir. En kötü durumun simüle edilmesi gerekliliğinden dolayı, 3 boyutlu yolcu simülasyonu kapsamında Senaryo 1 sonucunda ortaya çıkan 5111 değeri kullanılmıştır. Simülasyon kapsamında; Hat-1 üzerinde yer alan trenden 2400 kişi ve Hat-2

üzerinde yer alan trenden 2400 kişi inmiş; istasyonda Hat-1 trenini bekleyen 217 kişi ile Hat-2 trenini bekleyen 94 kişi de simülasyona dâhil edilerek çalışma gerçekleştirilmiştir. İnsan hareketleri sadece mesafelere, alan hesaplarına ve standartlara göre değil aynı zamanda istasyon tasarımına göre de şekillenmekte ve değişmektedir. Kötü tasarlanmış bir istasyonda kısa mesafelere ve çok sayıda çıkışa rağmen zamanında tahliye gerçekleşmeyebilirken, iyi tasarlanmış bir istasyonda da tam tersine çok daha olumlu sonuçlar alınabilmektedir. Simülasyonun başlangıç durumunu göstermek adına simülasyonun ilk saniyelerinden bir görüntü aşağıda verilmiştir. Her vagonun 300 kişi inmekte ve her trende 8 vagon bulunmaktadır.



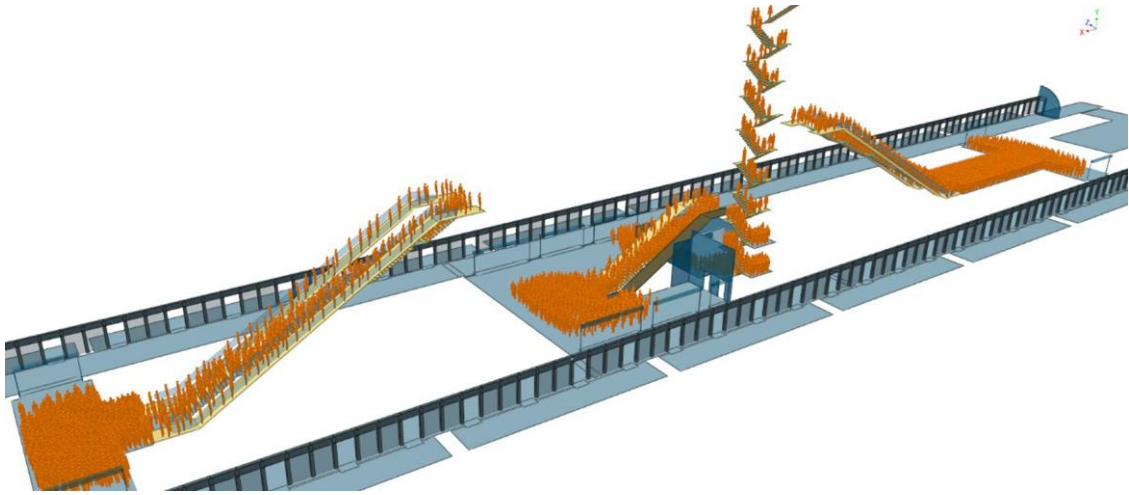
Şekil 6. Acil durum tahliye simülasyonu başlangıç durumu

Peron katında yolcuların tahliyesi için kullanılacak dikey sirkülasyon elemanları; 3 adet sabit merdiven, 5 adet yukarı yönlü çalıştırılacak yürüyen merdiven ve 1 adet de acil durum merdiveni olarak tespit edilmiştir. Bu kapsamda Massmotion yazılımı ile gerçekleştirilen tahliye simülasyonunda, platformlardaki yolcuların tahliye süresi 6 dakika 45 saniye olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre, peron katında 4 dakika hesabının gereklerinin sağlanamadığı açıkça görülmüş ve güvenli alanın peron katında tesis edilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle mimari tasarım aşamasında peron katında gerekli yerlere yangın ve duman perdeleri eklenerek güvenli alanlar oluşturulmuştur. Düşey olarak kolonların arasında kalan bölgelere yerleştirilen yangın perdeleri hem ısı hem de duman geçişini engellemektedirler. Dolayısıyla, otomatik ya da manuel olarak inen bu perdeler yolcular için peron katında güvenli bir alan oluşmasını sağlamaktadırlar. Peron katına yerleştirilen yangın perdelerinin konumları ve platformlardaki yolcuların güvenli alana geçtikleri an Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Yolcuların perondaki güvenli alana geçişlerinin tamamlandığı ana ait görüntü

3D yolcu simülasyonu sonuçlarına göre yolcuların peron katında oluşturulan bu güvenli bölgeye geçişleri 3 dakika 50 saniyede sağlanmaktadır. Bu süre 4 dakika hesabına uygundur. Yolcuların perondaki güvenli alana geçişlerinin tamamlandığı ana ait görüntü Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Yolcuların perondaki güvenli alana geçişlerinin tamamlandığı ana ait görüntü

İstasyondaki tüm yolcuların güvenli alana geçme süresi ise 5 dakika 45 saniye olup, 6 dakika kuralını sağlamaktadır.

4. Sonuç

Metro istasyonlarının mimari tasarım süreçlerine ilişkin normal işletme ve acil durum tahliye simülasyonu çalışmalarının 3 boyutlu simülasyon teknolojisi kullanılarak ulusal ve uluslararası standartlar doğrultusunda nasıl yapılması gerektiğini örnek bir metro istasyonu üzerinden uygulamalı olarak gösterme amacı taşıyan çalışma başarıyla tamamlanmıştır. Genel olarak kapasite analizi ve hizmet seviyesi hesaplamaları üzerinden ilerleyen çalışmada ajan tabanlı modelleme ve sosyal kuvvetler algoritması altyapısına sahip üç boyutlu Massmotion yaya simülasyonu yazılımı kullanılmış, gerek görsel gerekse teknik açıdan tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Gerçekleştirilen kapasite analizi sonuçlarına göre; peron katı, konkors, teknik kat ve girişlerdeki yolcu yoğunlukları herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. İstasyonda yer alan yatay ve dikey sirkülasyon elemanlarının sayıları ve genişlikleri mimari tasarım kriterleri açısından yeterlidir. Yolcular konforlu ve güvenli bir şekilde metro istasyonunu kullanmakta, tasarım kaynaklı süre kayıpları yaşamadan hedeflerine en kısa sürede ulaşabilmektedirler.

Güncel teknolojilerin hayatın birçok alanında olduğu gibi mimari tasarım süreçlerinde simülasyon amaçlı kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Buna rağmen ülkemizde 3 boyutlu yaya simülasyonu teknolojileri kullanımı hala çok düşük seviyededir. Kamu kurumları ve özel teşebbüsler zaman zaman bu teknolojileri kullanmakta ve simülasyon raporları hazırlamaktadırlar. Fakat bu raporlar genelde işveren ve yüklenici firma arasında kalmakta, herkesin ulaşabileceği ve faydalanabileceği bilimsel yayınlara dönüşmemektedir. Literatür taraması da ulusal yayınların bu konudaki kısıtlılığını göstermektedir. Sürece ilişkin gerekli tüm detayların verildiği bu çalışmanın uygulayıcılara yol göstermesi, literatüre katkı yapması ve daha ileri seviyedeki çalışmalara altlık teşkil etmesi ümit edilmektedir.

Kaynakça

- [1] J. M. Joshua, "Urbanization," 2014. [Online]. Available: <https://www.worldhistory.org/urbanization/> [Accessed: 18-Apr-2022].
- [2] Britannica, "Urbanization - Impact of the industrial revolution," 2021. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/topic/urbanization/Impact-of-the-Industrial-Revolution>. [Accessed: 16-Apr-2022].

- [3] Türkiye İstatistik Kurumu, “Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları,” 2021. [Online]. Available: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2021-45500>. [Accessed: 15-Apr-2022].
- [4] C. Shi, M. Zhong, X. Nong, L. He, J. Shi ve G. Feng, “Modeling and safety strategy of passenger evacuation in a metro station in China,” *Saf. Sci.*, vol. 50, pp. 1319-1332, 2012.
- [5] F. Gültekin, “İstanbul Büyükşehir Belediyesi Metro İstanbul A.Ş.,” 2022. [Online]. Available: www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6916702672972607488/. [Accessed: 11-Apr-2022].
- [6] P. Clifford, “Passenger simulation modelling in station planning and design,” *Wit. Trans. Built. Env. Computers in Railways*, vol. 18, pp. 229-237, 1996.
- [7] Z. Li, S. M. Lo, J. Ma ve X. W. Luo, “A study on passengers’ alighting and boarding process at metro platform by computer simulation,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 132, pp. 840-854, 2020.
- [8] S. Seriani ve R. Fernandez, “Pedestrian traffic management of boarding and alighting in metro stations,” *Transp. Res. Part C Emerging Technol.*, vol. 53, pp. 76-92, 2015.
- [9] C. Zhang, B. Han, Y. Wang ve W. Zhou, “Pedestrian gathering and evacuating simulation and facilities optimized analysis of Wangfujing Station of Beijing Metro,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 744-746, pp. 2094-2097, 2015.
- [10] H. Yin, J. Wu, Z. Liu, X. Yang, Y. Qu ve H. Sun, “Optimizing the release of passenger flow guidance information in urban rail transit network via agent-based simulation,” *Appl. Math. Model.*, vol. 72, pp. 337-355, 2019.
- [11] M. Zhong, C. Shi, X. Tu, T. Fu ve L. He, “Study of the human evacuation simulation of metro fire safety analysis in China,” *J. Loss. Prev. Process. Ind.*, vol. 21, pp. 287-298, 2008.
- [12] A. Kallianiotis, D. Papakonstantinou, V. Arvelaki ve A. Benardos, “Evaluation of evacuation methods in underground metro stations,” *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 31, pp. 526-534, 2018.
- [13] F. Li, S. Chen, X. Wang ve F. Feng, “Pedestrian evacuation modeling and simulation on metro platforms considering panic Impacts,” *Procedia Soc. Behav. Sci.*, vol. 138, pp. 314-322, 2014.
- [14] B. C. K. Siong, B. C. J. Jun ve K. S. Yen, “Evacuation simulation modeling for a deep underground subway station,” *Fire and Evacuation Modeling Technical Conference*, 2020.
- [15] E. D. Özdamar, “Yeraltı metro istasyonlarında pasif yangın güvenlik önlemleri: tahliye sürecinin incelenmesi ve bir örneklem,” Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık ABD Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2020.
- [16] G. Koç ve Ö. C. Ceylan, “Metro istasyon ve tünellerinin acil durum havalandırmasında yeni yaklaşımlar ve uygulama esasları,” *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 2013.
- [17] C. Kırlangıçoğlu ve M. F. Döker, “Şehir planlama ve mimari tasarım sürecinde yaya simülasyonu teknolojilerinin kullanımı,” *International Journal of Human Sciences*, vol. 15, no. 3, 2018.
- [18] G. B. Türkölmez ve M. Güneş, “Metro servis sistemlerinde acil tahliye modelleri: İzmir metro uygulaması,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 22, no. 4, pp. 324-339, 2016.
- [19] NetworkRail, “Station capacity assessment guidance,” 2011. [Online]. Available: https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2021/06/NR_GN_CIV_100_02_Station-Design.pdf. [Accessed: 19-Apr-2022].
- [20] E. M. Cepolina, F. Menichini ve P. G. Rojas, “Level of service of pedestrian facilities: modelling human comfort perception in the evaluation of pedestrian behaviour patterns,” *Transp. Res. Part. F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 58, pp. 365-381, 2018.
- [21] J. J. Fruin, *Pedestrian planning and design*, New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.
- [22] A. Azadpeyma ve E. Kashi, “Level of service analysis for metro station with transit cooperative research program (TCRP) manual: a case study—Shohada Station in Iran,” *Urban Rail Transit*, vol. 5, pp. 39-47, 2019, doi: 10.1007/s40864-018-0098-0.
- [23] E. Bonabeau, “Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, pp. 7280-7287, 2002.
- [24] T. Richards, “A review of software for crowd simulation,” 2021. [Online]. Available: https://urban-analytics.github.io/dust/docs/ped_sim_review.pdf. [Accessed: 10-Apr-2022].
- [25] M. Mashhadawi, “Massmotion evacuation model validation,” 2016. [Online]. Available: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8875378&fileId=8875380>. [Accessed: 14-Apr-2022].
- [26] D. O’Donnell, T. Roberts ve P. Debney, “Massmotion – a step in the right direction,” 2013. [Online]. Available: <https://www.oasys-software.com/wp-content/uploads/2018/09/MassMotion-%E2%80%93-A-Step-In-The-Right-Direction-Interflam-2013.pdf>. [Accessed: 16-Apr-2022].

- [27] Arup, “The verification and validation of MassMotion for evacuation modelling,” 2015. [Online]. Available: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8875378&fileId=8875380>. [Accessed: 17-Apr-2022].
- [28] D. Helbing ve P. Molnar, “Social force model for pedestrian dynamics,” *Phys. Rev. E*, vol. 51, pp. 4282-4286, 1995, doi: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
- [29] *NFPA Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems*, NFPA 130, National Fire Protection Association, 2019.
- [30] B. O'Connor, “Means of egress with NFPA 130,” 2021. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Blogs-Landing-Page/NFPA-Today/Blog-Posts/2021/08/27/Means-of-Egress-with-NFPA-130#>. [Accessed: 18-Apr-2022].

Özgeçmiş



Cem KIRLANGIÇOĞLU

1981 yılında İzmir’de doğmuştur. Lisans eğitimini İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde, yüksek lisansını Orta Doğu Teknik Üniversitesinde, doktorasını ise İstanbul Üniversitesinde tamamlamıştır. Sakarya Üniversitesi Mimarlık Bölümünde Doçent olarak görev yapmaktadır. Ulaşım Planlaması, Yaya Simülasyonu, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Sanal Gerçeklik alanlarında çalışmalar gerçekleştirmektedir.

E-Posta: kirlangicoglu@sakarya.edu.tr

Beyan:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Cer Transformatörlerinde Elektriksel Parametrelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE¹, Yunus Berat DEMİROL², Oluş SÖNMEZ¹,
Mehmet Aytaç ÇINAR³, Bora ALBOYACI⁴

¹ Sönmez Transformatör Sanayi ve Ticaret A.Ş., Kocaeli, Türkiye

² GENETEK Güç & Enerji Ltd. Şti., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, Türkiye

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

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

*aytac@kocaeli.edu.tr

(Alınış/Received: 28.04.2022, Kabul/Accepted: 17.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Demiryolu sistemlerinde kullanılan elektrikli trenlerin hareket gücünü sağlamak için kullanılan motor sürücülerini cer transformatörleri beslemektedir. Cer transformatörleri lokomotiflerin altında veya üstünde, boyutları sınırlı bir alana yerleştirilmektedir. Bunun yanında tren sistemlerinde kullanılmakta olan ekipmanların güç ihtiyaçlarını karşılayabilmek için farklı gerilim seviyelerinde çok sayıda sargı yapıları cer transformatörlerinde bulunmaktadır. Demiryolu sistemlerinde sürdürülebilirlik, verim ve işletme güvenliğinin yüksek seviyede olması için cer transformatörlerinin tasarım parametrelerinin özel olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda tasarım aşamasında detaylı analizlerin gerçekleştirilmesi ve standartlar referans alınarak değerlendirilmesi önemli olmaktadır. Cer transformatörlerinde kısa devre empedansı, inrush akımları, kazan kayıpları, çekirdek kayıpları gibi kritik öneme sahip elektriksel parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanması teorik yöntemler ile her zaman mümkün olmamakta veya çok zahmetli olmaktadır. Bu durumda sonlu elemanlar analizi yönteminin birçok açıdan avantajı bulunmaktadır. Sonlu elemanlar analizleri ile yüksek doğrulukta ve kısa sürede hesaplamalar yapılabilmektedir. Bu çalışmada örnek bir cer transformatörünün elektriksel parametreleri Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar analizi yazılımı ile hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler ile ilgili olarak özet bilgiler verilmiş, analiz adımları açıklanmıştır. Bu kapsamda demiryolu sistemlerinde kullanılan trenlerin kritik elemanlarından biri olan cer transformatörlerinin elektriksel analizi için sonlu elemanlar yönteminin gerekliliği ifade edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Cer transformatörü, Sonlu elemanlar analizi, Kısa devre empedansı, Manyetik indüksiyon, İnrush akımı, Eddy kayıpları.

Analysis of Electrical Parameters in Traction Transformers by Finite Element Method

Abstract: Traction transformers feed the motor drivers used in electric locomotives in railway systems. Traction transformers are placed in a limited area above or below the locomotives. Due to the power needs of the equipment used in train systems, there are many winding structures at different voltage levels in traction transformers. Therefore, the design parameters of traction transformers should be specifically evaluated for providing a high level of sustainability, efficiency, and operational safety in railway systems. It is crucial to carry out detailed analyses during the design phase and evaluate them according to standards. Accurate calculation of critical electrical parameters such as short circuit impedance, inrush currents, tank losses and core losses in traction transformers is not always possible or very laborious with theoretical methods. In this case, the finite element analysis method has many advantages. With finite element analysis, calculations can be made with high accuracy and in a short time. This study calculated the electrical parameters of a sample traction transformer with Ansys Electronics Suite finite element analysis software. Summary information about the calculated parameters is given, and the analysis steps are explained. In this context, the necessity of the finite element method for the electrical analysis of traction transformers, which is one of the most critical components in railway systems, has been expressed.

Atıf için/Cite as: S. Çürükova Kale, Y.B. Demirel, O. Sönmez, M.A. Çınar, B. Alboyacı, "Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 66-78, July. 2022 doi: 10.47072/demiryolu.1110515

Keywords: Traction transformer, Finite element analysis, Short circuit impedance, Magnetic induction, Inrush current, Eddy loss.

1. Giriş

Transformatörlerin dizayn parametreleri hem elektrik şebekesinin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için, hem de transformatörün kullanıldığı makinelerde sürdürülebilirlik ve güvenilirlik için son derece önemli olmaktadır. Trenlerin hareket etmesi için gerekli olan cer gücünün üretilmesi amacıyla cer transformatörleri kullanılmaktadır. Cer transformatörleri elektrik enerjisini katener sistemden alıp uygun gerilim dönüşümünü gerçekleştirdikten sonra trenin motor sürücülerine aktarmaktadır. Cer transformatörlerinin çeşitli elektriksel parametreler açısından bazı özellikleri sağlaması gerekmektedir. Bu parametrelerden bazıları kısa devre empedansı, sargı dönüştürme oranları, nüve indüksiyonu, çekirdek kayıpları, kısa devre kuvvetleri, inrush akımı, harmonikli yüklenme durumunda oluşan kayıplar ve metal yapısal bileşenlerde oluşan kayıplar olarak sıralanabilir. Cer transformatörleri lokomotifin altında veya üzerinde dar bir alanda konumlandırıldığı için tasarım aşamasında bazı sınırlamalar olmakta ve tasarımın bu sınırlamalara uygun olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Elektriksel parametrelerin tasarım aşamasında doğru bir şekilde hesaplanması, oluşabilecek istenmeyen durumların önüne geçmektedir.

Cer transformatörleri standart dağıtım veya güç transformatörlerine göre karmaşık yapıda olabilmektedir. Farklı nüve tiplerinde ve farklı sargı yapılarında üretilen cer transformatörlerinin elektriksel parametreleri özel olarak incelenmelidir. Bunun yanında trenlerde farklı güç ihtiyaçlarını karşılamak için cer transformatörlerinde birbirinden bağımsız, seri veya paralel bağlantıda farklı sargılar bulunmaktadır. Bu sargılara örnek olarak cer sargısı, ısıtma sargısı, yardımcı sargı ve filtre sargısı gibi sargılar verilebilir. Trenlerin tasarımına ve güç ihtiyacına bağlı olarak sargıların tasarımı değişebilmektedir. Bu kapsamda üretilen her cer transformatörü için detaylı analiz ve incelemelerin yapılması gerekmektedir. Gerek cer transformatörlerinin karmaşık yapısından dolayı gerek transformatörlerde gerçekleştirilmesi gereken hesaplamaların kompleks yapısından dolayı analizler için teorik yöntemler yetersiz kalabilmekte veya çok uzun süreler alabilmektedir. Bundan dolayı uygun modelleme çalışmaları yapılarak sonlu elemanlar yöntemi gibi çözüm yöntemleri ile analizler kısa zamanda yüksek doğruluk ile gerçekleştirilebilmektedir.

Literatürde, cer transformatörlerinin çeşitli tasarım parametreleri ile çalışma koşullarının incelendiği çeşitli çalışmalara rastlanmaktadır. Bu bağlamda, farklı sargı dizilimleri [1] ve sargı tiplerinin [2] kısa devre empedanslarına ve sargı endüktans değerlerine [3] olan etkileri incelenmiş ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

[4-6]'da kaçak reaktans değerlerinin analitik olarak hesaplanmasına yönelik farklı yöntemler verilmiştir. Bununla birlikte bu yöntemler ile elde edilen sonuçların cer transformatörleri için doğruluk düzeyinin çok yüksek olmadığı görülmekte ve benzetim çalışmalarının önemi ortaya çıkmaktadır.

Transformatörlerin tasarım parametrelerinin [7, 8] ve fiziksel boyutların [9] transformatörün manyetik devresi ve güç kayıplarına olan etkileri incelenmiştir. Ek olarak, [10]'da çalışma koşullarında sargılar arasında meydana gelen kısa devre olayları [11]'de ise farklı yüklenme durumları incelenerek inrush akımları ve kısa devre kuvvetlerinin etkileri belirlenmiştir. [12, 13]'te harmonikli akım dalga şekli ile çalışma durumları incelenmiş ve güç kayıplarının değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. [14, 15]'te sırasıyla cer transformatörünün çevresinde meydana gelen elektromanyetik alanlar ve transformatörün termal çalışma koşulları incelenmiştir.

Çalışma koşullarında transformatörlerinde meydana gelen yapısal bozulmalar ve etkileri incelenmiş olup bu bozulmaların tespiti amacıyla kısa devre testi [16, 17], SFRA [18, 19], FRA [20-23], ultrasonik ölçüm elemanlarının kullanımı [24] ve verici-alıcı antenlerin transformatör içerisine yerleştirilmesi [25, 26] gibi yöntemler açıklanmıştır.

[27-29]'da ise cer transformatörlerinin çalışma sürekliliği ve güvenilirliğinin sağlanması bakımından kısmi boşalma olayları ve izolasyon şartları incelenerek sağlık durumunun tespiti gerçekleştirilmektedir.

Bunun yanında demiryolu sistemlerinde sonlu elemanlar analiz yöntemi ile çeşitli konularda gerçekleştirilmiş termal [30] ve yapısal analiz [31, 32] çalışmaları da bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, örnek bir cer transformatörü Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar analizi yazılımında modellenmiş ve çeşitli analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu makale içerisinde hem sayfa sayısını azaltmak hem de okuyucuyu sıkmamak adına gerçekleştirilen tüm analizlerde çok detaylı veriler gösterilmemiştir. Gerçekleştirilen tüm analizler başlı başına bir çalışma konusu olmakla beraber, bu çalışma içerisinde sonlu elemanlar yönteminin kabiliyetleri, üstünlükleri ve cer transformatörleri için gerçekleştirilebilecek olan analizler gösterilmiştir.

2. Metot

Elektrik sistemlerinde kullanılan ekipmanların performanslarının tasarım kriterlerine göre üretim aşamasından önce değerlendirilebilmesi günümüzde işletme güvenliği, verimlilik ve sürdürülebilirlik için kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda teorik olarak hesaplanması oldukça zor veya mümkün olmayan parametrelerin hesaplanması için sonlu elemanlar analizi yönteminin kullanılması günümüzde vazgeçilmez olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile tüm model geometrilerinde deri, yakınlık, eddy etkilerine bağlı olarak kayıplar, akım dağılımları, geçici durumlar, kuvvetler, kaçak reaktans gibi birçok elektriksel parametre hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile, ilgili geometri üzerinde sonlu sayıda bir ağ yapısı oluşturulmakta ve bu ağ yapısı üzerinde Denklem 1.-Denklem 4. çözülmektedir [33].

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

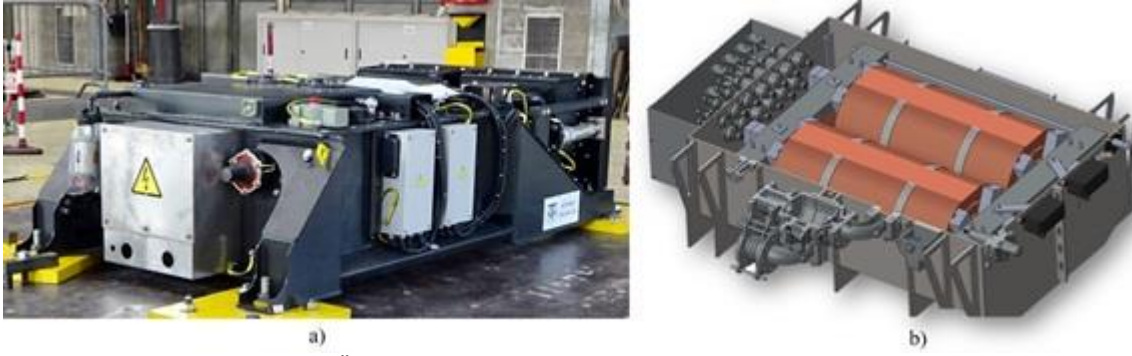
$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

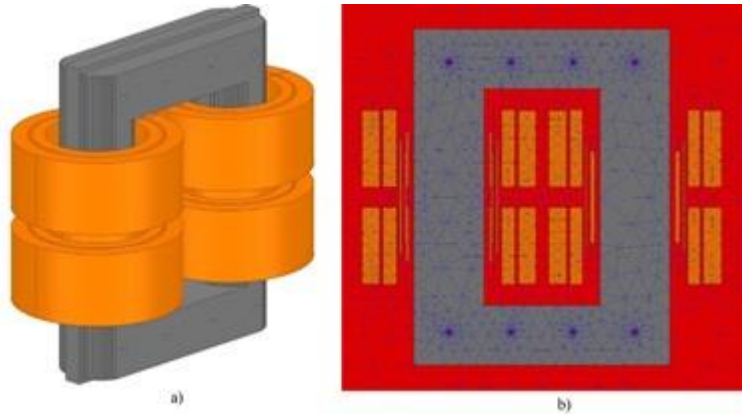
Burada, H manyetik alan şiddeti vektörü (A/m), J akım yoğunluğu vektörü (A/m²), D elektrik akı yoğunluğu vektörü (C/m²), t zaman (s), E elektrik alan şiddeti vektörü (V/m), B manyetik alan yoğunluğu vektörü, ρ yük yoğunluğu (C/m²) olarak tanımlanmaktadır.

2.1. Modelleme çalışmaları

Sonlu elemanlar yönteminde analizi gerçekleştirilecek olan cer transformatörü modeli SolidWorks programında 3 boyutlu olarak çizilmiştir ve Şekil-1 üzerinde gösterilmiştir.



SolidWorks programında çizilen modelin aktif kısımları (sargılar ve nüve) sonlu elemanlar programı içerisine aktarılmıştır (Şekil-2 (a)). Analizi gerçekleştirilecek olan parametrelerin özelliklerine göre sonlu elemanlar programının kullandığı model geometrisi düzlemine ve çözücüyü değiştirmek gerekmektedir. Değerlendirilmesi hedeflenen parametrelerin hesabına yönelik olarak kullanılan matematiksel denklemlerin gerekliliklerine göre manyetik analiz çözücülerinden transient, eddy veya magnetostatik çözüm yöntemleri üç boyutlu, kartezyen veya silindirik model geometrilerinde kullanılabilir.



Şekil 2. Sonlu elemanlar programına aktarılan cer transformatörü modeli a) Aktif kısımların 3D görünümü b) 2D XY koordinat düzleminde ağ yapısı

2.2. Uyarma devresi

Analizlerde incelenen cer transformatörünün sargı bilgileri Tablo-1 üzerinde gösterilmiştir. Analiz modelinde fiziksel olarak bulunan her sargı, bir adet endüktansı ifade etmektedir. Bu endüktanslar program içerisinde external devre ile uygun şekilde bağlanıp ilgili analizler çalıştırılmıştır. Transient analizlerde uyarma gerilimi eksponansiyel olarak yapılmıştır, bu sayede geçici durum atlanmıştır (Şekil-4).

Tablo 1. Cer transformatörü sargı verileri

Sargı ismi	Gerilim (V)	Güç (kVA)	Açıklama
Yüksek gerilim	25000	1703	Dört adet paralel
Cer	1050	1413	Dört adet bağımsız
Filtre	1126	500	Bir adet
Yardımcı	370	180	Bir adet
Isıtma	1500	800	İki adet 1000 V ve 1500 V kademeli

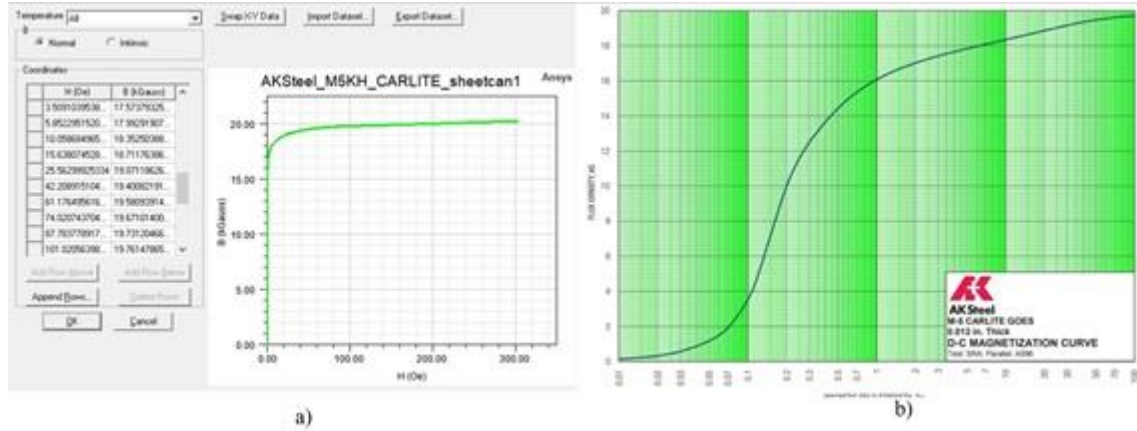
2.3. Ağ yapısı

Sonlu elemanlar yazılımında oluşturulan ağ yapısının yoğunluğu hesaplanması hedeflenen parametrenin özelliklerine göre değişmektedir. Örneğin harmonikli durumlarda oluşan kayıpları incelerken eddy etkisine bağlı olan kayıpların hesaplanabilmesi için deri kalınlığı içerisinde yüksek miktarda dört yüzlü bulunması gerekmektedir. Benzer şekilde kazan kayıpları hesaplanırken oluşturulan ağ yapısının kazan duvarının deri kalınlığı içerisinde kalması gerekmektedir. Farklı analizler için farklı ağ yapısı oluşturulması gerekmektedir. Ansys Electronic Suite yazılımı ile adaptif ağ yapısı oluşturulabilmektedir. Bunun yanında 11 adet farklı ağ yapısı oluşturma ayarı ile yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebilmektedir.

Oluşturulan ağ yapısının yoğunluğuna göre analiz süresi önemli derecede değişkenlik göstermektedir. Örnek olarak kısa devre empedansının hesaplandığı üç boyutlu model için toplam 260123 dörtyüzlü oluşturulmuştur ve analizler %0.809 enerji hatası 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.

2.4. Malzeme parametreleri

Analizlerde kullanılan malzemelerin elektriksel parametreleri analiz sonuçları için kritik önem taşımaktadır. Malzemelerin iletkenlik değeri, göreceli manyetik geçirgenlik değeri gibi elektriksel parametrelerin doğru bir şekilde programa tanımlanması gerekmektedir. Sıcaklığa bağlı parametre tanımlaması da gerçekleştirilebilmektedir. Lineer olmayan B-H (Şekil-3) veya B-P gibi eğriler ne kadar yüksek örnekleme ile programa aktarılsa sonuçlar o kadar güvenilir olmaktadır.

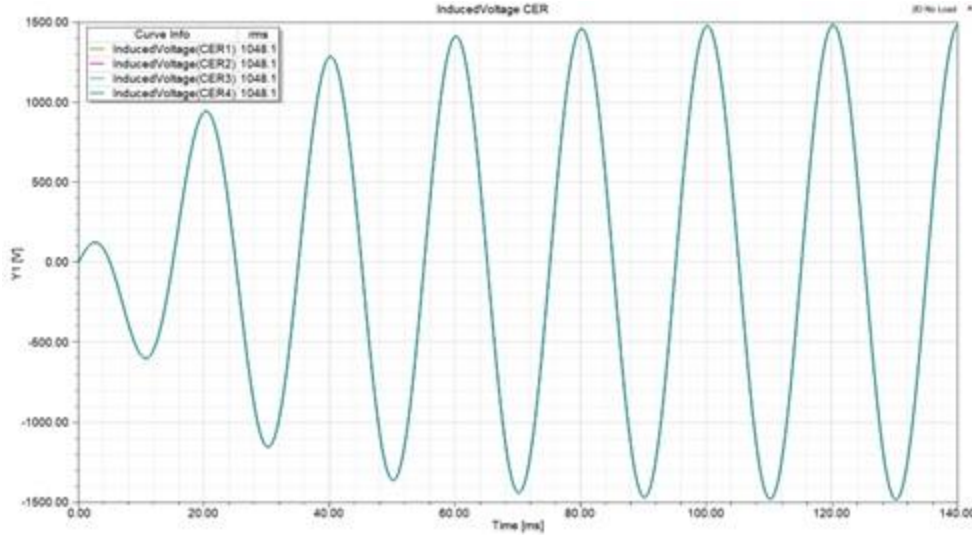


Şekil 3. B-H eğrisi a) Programa tanımlanan veri b) Üretici kataloğunda bulunan eğri [34]

3. Bulgular

Bu çalışma kapsamında incelenen cer transformatörünün sargı dönüştürme oranı, nüve manyetik induksiyonu, çekirdek kayıpları, boşta çalışma akımı, kısa devre empedansı, kazan kayıpları, harmonikli durumda oluşan sargı kayıpları ve inrush akımı incelenmiştir. İncelenen parametreler hakkında bu bölümde bilgiler verilmiştir.

3.1. Sargı dönüştürme oranları

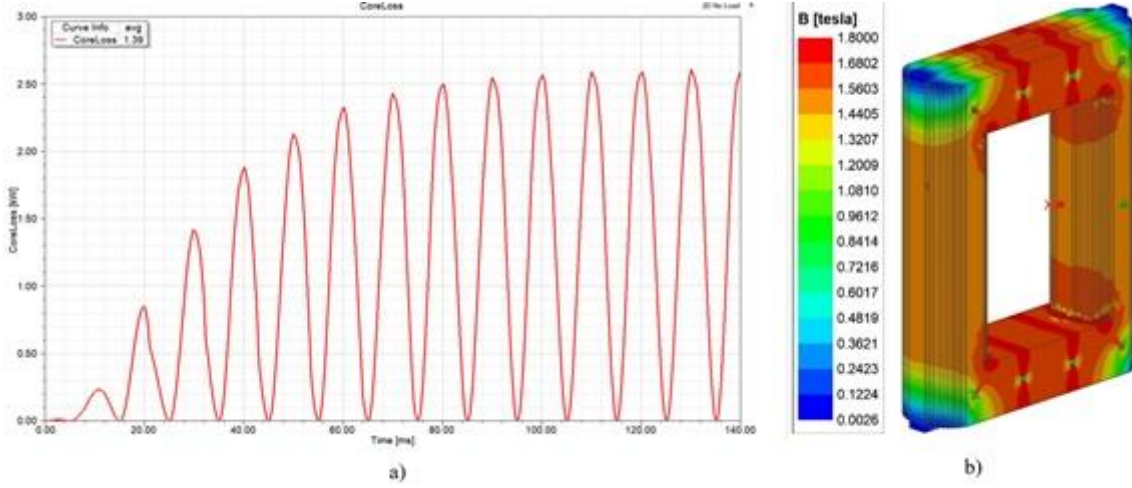


Şekil 4. Sargı dönüştürme oranlarının doğrulanması için analiz sonucu

Cer transformatörü için analizlerde, modelleme gerçekleştirilip sargı bağlantıları oluşturulduktan sonra ilk olarak gerilim dönüştürme oranları doğrulanmıştır. Gerilim dönüştürme oranı doğrulandıktan sonra diğer analizlere devam edilmiştir. Sargı dönüştürme oranlarının doğrulanmasına yönelik analiz üç boyutlu, iki boyutlu kartezyen eksen veya iki boyutlu silindirik eksen sisteminde transient veya eddy akımı çözücülerinde gerçekleştirilebilmektedir. Analitik olarak dönüştürme oranı sarım sayısı oranlarına göre hesaplanabilmektedir fakat buna göre sargı dirençleri, kaçak reaktans, çekirdek kayıpları ve B-H eğrisinin etkisi ihmal edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile bu parametreler de değerlendirilmeye alınmaktadır. Bunun yanında sargı bağlantılarının doğruluğu ve sarım yönleri de teyit edilmektedir. İncelenen model için cer sargısı gerilimleri Şekil-4 üzerinde gösterilmiştir.

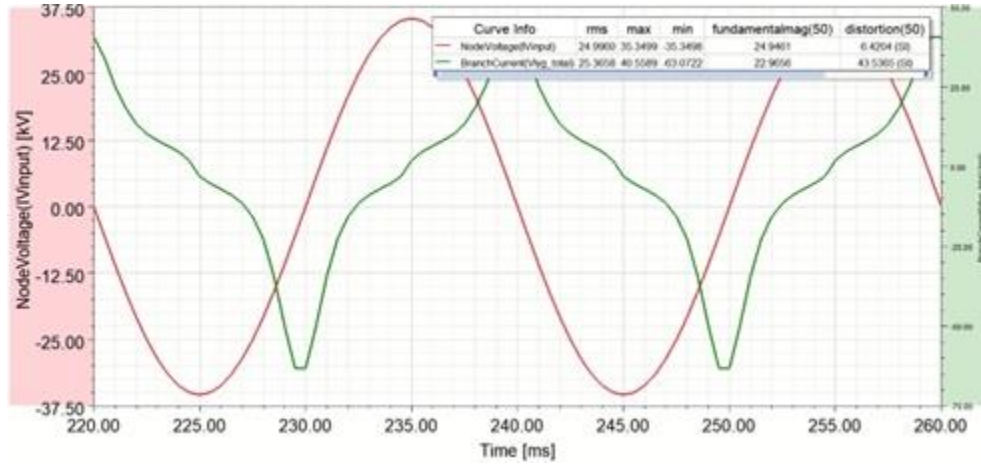
3.2. Nüve manyetik indüksiyonu ve çekirdek kayıpları

Nüve indüksiyonu programa tanımlanan B-H eğrisine göre, çekirdek kayıpları ise B-P eğrisine göre hesaplanmaktadır [35]. Şekil-5 (a) üzerinde çekirdek kayıpları, Şekil-5 (b) üzerinde nüve indüksiyonu gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çekirdek üzerinde manyetik alanın yoğunlaştığı, kayıpların yükseldiği bölgeler tespit edilebilmektedir. Cer transformatörlerinde bulunan karmaşık sargı yapılarının oluşturduğu manyetik indüksiyon yüksek doğruluk ile hesaplanabilmektedir.



Şekil 5. a) Çekirdek kayıpları b) Nüve indüksiyonu

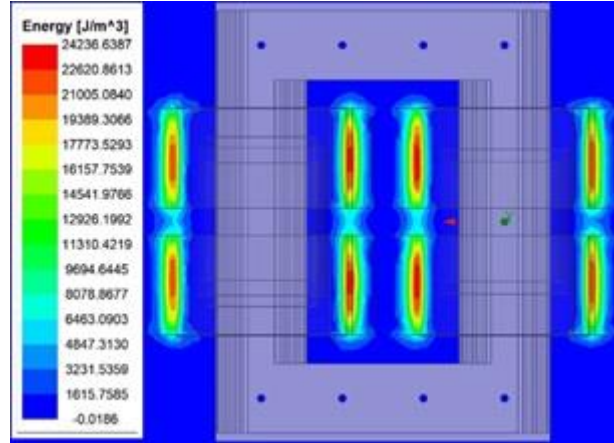
3.3. Boşta çalışma akımı



Şekil 6. Sonlu elemanlar analizi sonucunda bulunan boşta çalışma akımı

Boşta çalışma akımının dalga formu sonlu elemanlar analizi ile hesaplanabilmektedir. Boşta çalışma akımı cer transformatörü enerjilendirildikten sonra geçici durumun bitmesi halinde çekilen akım formudur. Bu akım formu nüve özelliklerine, uyarma gerilimine ve modelin geometrik yapısına bağlıdır [36]. Uygun analiz ayarları ile birlikte Şekil-6 üzerinde gösterilen boşta çalışma akımı bulunabilmektedir.

3.4. Kısa devre empedansı

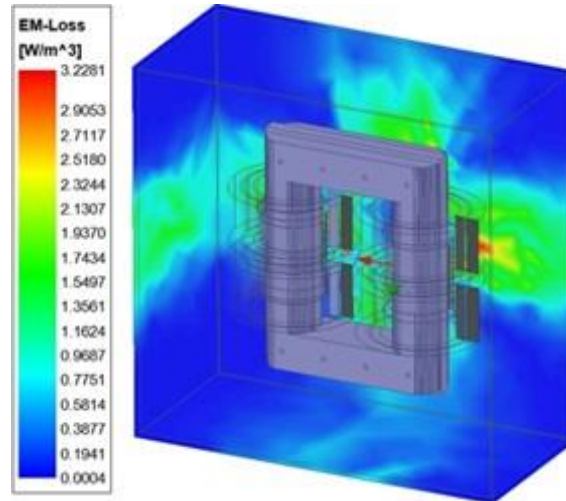


Şekil 7. Kısa devre empedansı hesabında oluşan enerji dağılımı

Kısa devre empedansı cer transformatörleri için en önemli parametrelerden biridir. Cer transformatörlerinin kısa devre empedansı gereksinimleri genellikle transformatör üreticisinden özel olarak istenmektedir. Bu sebepten dolayı henüz tasarım aşamasındayken transformatörün kısa devre empedansı değerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi önem taşımaktadır. IEEE C57.12.00 standardına göre transformatörlerde belirlenen kısa devre empedansı değerine göre $\pm 10\%$ tolerans ile üretim kabul edilmektedir [37].

Kısa devre empedansı basit sargı yapıları için teorik yöntemler ile hesaplanabilmektedir [4-6]. Cer transformatörleri gibi çok sayıda sargı içeren, paralel veya seri sargı gruplarından oluşan, nüve bacalarına dağılmış sargıları bulunan modeller için sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler yüksek güvenilirlikte sonuçlar vermektedir. Bundan dolayı kısa devre empedansı hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi kullanmanın birçok avantajı bulunmaktadır. Kısa devre empedansı hesabında oluşan enerji dağılımı Şekil-7 üzerinde gösterilmiştir.

3.5. Kazan kayıpları



Şekil 8. Kazan kayıpları

Kazan kayıpları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir [38, 39]. Bu hesaplamalar yapılırken cer transformatörünün tankı üzerinde deri kalınlığının içerisinde kalan ağ yapısı oluşturulup bu ağ yapısı içerisinde eddy analizi gerçekleştirilebilir [40]. Fakat bu yöntem çok

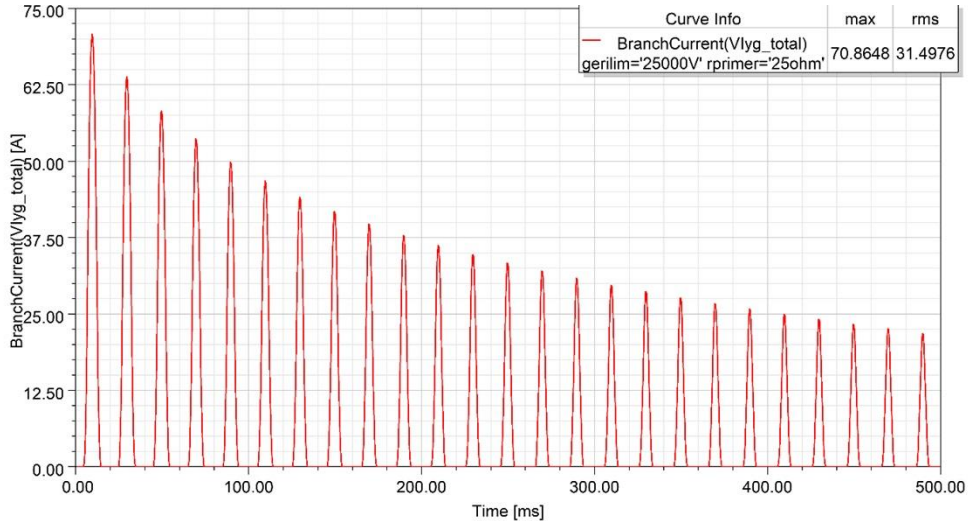
önemli derecede zaman almaktadır. Bu yöneme alternatif olarak ‘impedance boundry’ yöntemi de kullanılabilir [41]. Şekil-8 üzerinde kazan kayıplarının hesaplanmasına yönelik bir analiz sonucunda oluşan kayıp dağılımı gösterilmiştir.

3.6. Harmonikli durumlarda oluşan kayıplar

Cer transformatörünün harmonikli akımlar ile yüklenmesi durumunda sargılarda oluşan eddy kayıpları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Bunun için transformatör sargısı içerisinde bulunan iletkenlerin tek tek modellenmesi gerekmektedir. Sargılar tek tek modellendikten sonra uygun ağ yapısı tanımlanarak transient veya eddy analizi yapılabilir. Transient analizlerde harmonik spektrumu uyartım dalgası içerisine tanımlanıp bir tek bir analizde tüm harmonik bileşenlerinin oluşturduğu kayıp değerleri hesaplanabilmektedir. Bu uygulama için analiz zaman adımının, yüksek frekanslı bileşenlerin etkisinin ihmal edilmeyeceği seviyede küçük olması gerekmektedir. Bunun yanında eddy analizi ile harmonik spektrumu içerisinde bulunan tüm bileşenler için ayrı ayrı analizler ile hesaplanıp kayıp değerleri süper pozisyon teoremine göre toplanabilmektedir.

Özellikle akım formunun harmonik bileşenleri içermesi durumunda bu analizlerin yapılması gerekmektedir. Analizler sonucunda sargı üzerinde oluşan hot-spot noktalar görülebilmekte [42, 43] yüksek kayıp durumunda revizyonlar gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanında yüksek güçlü sargılarda paralel iletkenler kullanılması durumunda iletkenler arasında oluşan akım dağılımları bu analizler ile hesaplanabilmektedir. Paralel iletkenlerin dengesiz yüklenmesi durumunda transpozisyon yapılması durumunun etkisi incelenip performans değerlendirmesi gerçekleştirilebilmektedir.

3.7. Inrush akımı



Şekil 9. Cer transformatörü için inrush akımı

Transformatörler enerjilendirildiğinde tasarım parametrelerine bağlı olarak inrush akımları çekmektedir (Şekil-9). Transformatörün mekanik tasarımı inrush akımlarında zarar görmeyecek şekilde olmalıdır. Bundan dolayı inrush akımlarının hesaplanması önemli olmaktadır. Inrush akımları sargı parametrelerine, nüve parametrelerine, enerjilendirme anındaki faz açısına, transformatörün sekonderinin yük durumuna göre değişmektedir [30]. Inrush akımının hesaplanmasına yönelik olarak teorik formüller bulunmakla beraber bu formüllerin bazı durumlarda yetersiz olduğu görülmektedir. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen hesaplamalarda yüksek doğruluk ile sonuçlar elde edilmektedir.

4. Sonuç

Cer transformatörlerinin çok sayıda sargı içermesi ve kompleks yapılarından dolayı elektriksel parametrelerinin teorik yöntemler ile hesaplanması zahmetli olmaktadır. Bu kapsamda sonlu elemanlar analizi yöntemi hesaplama hızı ve doğruluk açısından önemli derecede avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada örnek bir cer transformatörünün elektriksel parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması gösterilmiştir. Sargı dönüştürme oranı, nüve manyetik indüksiyonu, çekirdek kayıpları, boşta çalışma akımı, kısa devre empedansı, kazan kayıpları, harmonikli yüklenme durumlarında oluşan kayıplar ve inrush akımını hesaplayamaya yönelik analiz çalışmalarından bahsedilmiştir. Bahsedilen analizlerin hepsi kendi içerisinde çok detaylı analizler olduğundan dolayı bu çalışma içerisinde sadece özet bilgiler gösterilmiştir. Sonuç olarak cer transformatörlerinin elektriksel parametrelerinin analizi için sonlu elemanlar yönteminin gerekliliği gösterilmiş, örnekler üzerinden açıklanmıştır.

Kaynakça

- [1] Z. Ye *et al.*, “A calculation method to adjust the short-circuit impedance of a transformer,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223848–223858, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3042983.
- [2] D. Azizian and M. Bigdeli, “Leakage inductance calculations in different geometries of traction transformers,” *ECTI Trans. Electr. Eng. Electron. Commun.*, vol. 12, no. 2, pp. 28–34, 2014.
- [3] B. G. Park, T. S. Kim, K. J. Lee, R. Y. Kim, and D. S. Hyun, “Magnetic-field analysis on winding disposition of transformer for distributed high-speed train applications,” in *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, no. 6, doi: 10.1109/TMAG.2010.2043646.
- [4] W. H. Ali, M. N. O. Sadiku, S. L. Abood, *Fundamentals of Electric Machines: A Primer with MATLAB*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2019.
- [5] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde. *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2017.
- [6] K. Dawood, B. Alboyaci, M. A. Cinar, O. Sonmez, “A new method for the calculation of leakage reactance in power transformers”, *J. Electr. Eng. & Tech.*, vol. 12, no. 4, pp. 1883-1890, 2017, doi: 10.3390/JEET.2017.12.5.1883.
- [7] I. Sitar, M. Bilo, and D. Vale, “New design of traction transformers for fixed installations,” in International Colloquium Transformer Research and Asset Management, 2009, pp. 1–10.
- [8] I. Sitar and M. Jurković, “Modern design of EMU traction transformers,” in *Automation in transportation*, 2014, pp. 234–237.
- [9] D. Liu, B. Xiong, Z. Cheng, and F. Liu, “Effects of axial gap length between disc windings on magnetic fields and power losses of evaporative cooling traction transformers,” in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Nanjing, China, 2020, pp.1-7.
- [10] C. Yang, Y. Ding, H. Qiu, and B. Xiong, “Analysis of turn-to-turn fault on split-winding transformer using coupled field-circuit approach,” *Processes*, vol. 9, no. 8, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/pr9081314.
- [11] D. Azizian, “Nonlinear behavior analysis of split-winding dry-type transformer using a new star model and a coupled field-circuit approach,” *Arch. Electr. Eng.*, vol. 65, no. 4, pp. 773–787, 2016, doi: 10.1515/aee-2016-0054.
- [12] J. Smajic, G. Di Pino, C. Stemmler, W. Mönig, and M. Carlen, “Numerical study of the core saturation influence on the winding losses of traction transformers,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1109/TMAG.2014.2360918.
- [13] J. El Hayek, “Influence of harmonics on traction transformers losses,” in *ICEMS 2003 – Proc. 6th Int. Conf. on Elect. Mach. and Syst.*, Beijing, China, 2003, vol. 1, pp. 347–350.
- [14] 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.
- [15] S. Yuan *et al.*, “Modelling method for thermal field of turbulent cooling dry-type on-board traction transformer in EMUs,” *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 8, no. 1, pp. 298–311, 2021, doi: 10.1109/TTE.2021.3097876.

- [16] A. Palani, S. Santhi, S. Gopalakrishna, V. Jayashankar, “Real-time techniques to measure winding displacement in transformers during short-circuit tests”. *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 726-732, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.911110.
- [17] M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava, “Review of condition assessment of power transformers in service”. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 12-25, 2002, doi: 10.1109/MEI.2002.1161455.
- [18] J. R. Secue, E. Mombello, “Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers”. *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 6, pp. 1119-1128, 2008, doi: 10.1016/j.epsr.2007.08.005
- [19] N. Swamy, U. Savadamuthu, “Sweep frequency response based statistical approach for locating faults in transformer windings using sliding window technique”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 194, no. 1, pp. 1-8, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107061.
- [20] Zhao Z, Tang C, Islam S. Interpretation of transformer winding deformation fault by the spectral clustering of FRA signature. *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.*, vol. 130, no. 1, pp. 1-8, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106933.
- [21] CIGRE, *Advances in the interpretation of transformer frequency response analysis (FRA)*. Technical Note 812, 2020
- [22] L. Zhou, J. Jiang, W. Li, Z. Wu, S. Gao, L. Guo, H. Liu, “FRA modelling for diagnosing axial displacement of windings in traction transformers”, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 12, pp. 2121-2127, 2019, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0362.
- [23] M. F. M. Yousof, C. Ekanayake, T. K. Saha, “Frequency response analysis to investigate deformation of transformer winding”. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 4, pp. 2359–2367, 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004750.
- [24] S. Naiqiu, Z. Can, L. Fang, L. Qisheng, Z. Lingwei, “Study on ultrasonic measurement device for transformer winding deformation”. in *IEEE Conference on Power System Technology*, Kunming, China, 2002. pp. 1401-1404.
- [25] M. A. Hejazi, G. B. Gharehpetian, G. Moradi, H. A. Alehosseini, M. Mohammad, “On-line monitoring of transformer winding axial displacement and its extent using scattering parameters and k-nearest neighbor method”, *IET Gener. Trans. & Distr.*, vol. 5, pp. 824-832, 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0802.
- [26] S. A. Mousavi, M. Bigdeli, S. M. Mousavi, “A feasibility study on application of positioning sensors to online detect of the transformer winding axial displacement”. in *IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications*, Kuching, Malaysia, 2013. pp. 1-3.
- [27] X. Li et al., “Partial discharge characteristics of oil-paper insulation for on-board traction transformers under superposed inter-harmonic AC voltages,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 27, no. 1, pp. 240–248, 2020, doi: 10.1109/TDEI.2019.008404.
- [28] B. Jia, P. Zhang, and Z. Li, “Aging life assessment of oil-paper insulation of traction transformer under shock load,” in *Asia Energy and Electrical Engineering Symposium*, Chengdu, China, 2020, pp. 1045–1050.
- [29] L. Zhou et al., “Experimental studies on the estimated life of oil-immersed insulation paper in traction transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 36, no. 5, pp. 2646–2657, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3024839.
- [30] A. Ünal, N. Akkuş, and S. Kandil, “Demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 1, no. 15, pp. 134–144, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1027982.
- [31] F. Çeçen and B. Aktaş, “Lamine CFRP donatılı traverslerin deneysel ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 1, no. 14, pp. 26–38, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.869946.
- [32] M. E. Arı and İ. Esen, “Design of a metro train and structural analysis of the metro vehicle body by finite element method,” *Railway Engineering*, vol. 1, no. 15, pp. 30–45, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1018663.
- [33] V. Shrikrishna, S. V. Kulkarni, and S. A. Khaperde, *Transformer engineering: design and practice*. CRC Press, 2004.
- [34] AkSteel, “AkSteel Product Catalog,” 2022. [Online]. Available: https://www.aksteel.de/files/downloads/AK_CARLITE_GOES_BV_060412.pdf.
- [35] M. A. Cinar, “Evaluation of the technical and economic feasibility of mixed grade cores in transformer design according to EN50588-1,” *Teh. Vjesn.*, vol. 28, no. 4, pp. 1136–1144, 2021, doi: 10.17559/TV-20200402220152.

- [36] T. R. Specht, "Transformer magnetizing inrush currents," *Electr. Eng.*, vol. 70, no. 4, pp. 324–324, 1951, doi: 10.1109/ee.1951.6437380.
- [37] *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, IEEE Std C57.12.00-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2010), 2016.
- [38] M. A. Çınar, B. Alboyacı, S. Çürükova, O. Sönmez, and R. Yapıcı, "Calculation of optimum dimensions of magnetic shunt elements to reduce stray losses on transformer tank walls," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 32, no. 4, pp. 1337–1346, 2017, doi: 10.17341/gazimmfd.369855.
- [39] Y. Li, S. L. Ho, N. Wang, and R. Y. Tang, "Numerical analysis of eddy current field in the ascending flange for the bushings and tank wall of a large transformer", in *Joint Int. Conf. Power Syst. Tech. And IEEE Power India Conference*, New Delhi, India, 2008, pp. 1-7.
- [40] C. Guérin and G. Meunier, "Surface impedance for 3D non-linear eddy current problems - application to loss computation in transformers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 3 PART 2, pp. 808–811, 1996, doi: 10.1109/20.497364.
- [41] M. A. S. Masoum, P. S. Moses, and A. S. Masoum, "Derating of asymmetric three-phase transformers serving unbalanced nonlinear loads," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 2033–2041, 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.923057.
- [42] D. Pejovski, K. Najdenkoski, and M. Dugalovski, "Impact of different harmonic loads on distribution transformers," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 202, pp. 76–87, doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.696.
- [43] J. E. Holcomb, "Distribution transformer magnetizing inrush current," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 80, no. 3, 1961, doi: 10.1109/AIEEPAS.1961.4501117.

Özgeçmiş



Serenay ÇÜRÜKOVA KALE

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi'nde 2013 yılında, yüksek lisans eğitimini ise 2017 yılında 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 Transformator 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 Ltd. Şti.'nde 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. Transformator 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. Transformator 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.



Raylı Sistem Traverslere, Bazalt Tozu İlavesinin Buz Çözücü Tuz Etkisine Katkısı

Kamuran ARI^{ID}

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Kayseri, Türkiye

kamuran@nny.edu.tr

(Alınış/Received: 10.05.2022, Kabul/Accepted: 20.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Günümüzde lastik tekerlekli kent içi toplu taşıma araçlarının yerini tren, metro, tramvay, hafif raylı sistemler gibi daha modern, düzenli ve konforlu toplu taşıma sistemleri almaktadır. Bunlardan en yaygın uygulanan sistem raylı sistemlerdir. Raylı sistem elemanları açık havada çeşitli çevresel etkiler altındadır ve elemanlar tasarlanırken bunlar göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada karayollarıyla hemzemin veya temas halindeki raylı sistemlerin traverslerinin çevre şartlarına bağlı olarak çatlama ve bozulmalarını önlemek ve servis ömrünü uzatmak amaçlanmıştır.

Bu deneysel çalışmada metot olarak, karayollarında buzlanmayla mücadelede kullanılan kimyasal yöntemlerin, raylı sistem elemanlarından traverslere vereceği zararı önlemek için farklı dozajlarda bazalt tozu kullanılarak numuneler üretilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento ile ikame edilerek bazalt tozu (havuz çökeltisi, $d=90\mu$) katkılı beton ve LVT (low vibration track) tipi ikiz-blok traversler için 5 farklı seri numuneler üretilerek beton deneyleri ile traversler üzerinde durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buz çözücü tuz etkisi için katkısız ve bazalt katkılı numunelerin yüzeyine 0,150 gr/cm² miktarında NaCl ham tuz konsantrasyonu uygulanarak donma çözülme deneyi gerçekleştirilmiştir.

Numuneler akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanarak üretilmiştir. Taze beton için kıvam tayini, su emme, hava içeriği deneyleri, sertleşmiş beton için basınç, yarmada çekme, eğilme, aşınma ve donma çözülme deneyleri yapılmıştır.

Travers numuneler uygulamada kullanıldığı gibi üzerine raylar monte edilerek basınç dayanımı için yükleme yapılmış, böylelikle bazalt tozu katkısının traverslerin özelliklerine etkileri gerçeğe yakın davranışlarla belirlenmiştir. Sonuç olarak dayanım ve durabilite özellikleri açısından kıyaslamalar yapılarak elde edilen sonuçlar, bazalt tozunun beton traverslerin durabilite özelliklerinde oluşturacağı iyileştirme düzeyinin belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemler, LVT tipi ikiz-blok Traversler, Bazalt tozu, Donma-çözülme, Mekanik özellikler

Influence of Basalt Filler Addition to Rail System Sleepers on Defrosting Salt Efficiency

Abstract: Nowadays, rubber-tired urban public transportation vehicles are being replaced by more modern, regular and comfortable public transportation systems such as trains, subways, trams and light rail systems. Of these, the most widely applied system is the rail systems. Rail system elements are exposed to various environmental effects in open air and these issues should be taken into account when designing the elements. In this study, it is aimed to prevent the cracking and deterioration of the concrete sleepers, which form the infrastructure of the rail systems, and to ensure their longevity.

In this experimental study, samples are produced using different dosages of basalt powder in order to prevent the damage to concrete sleepers by chemical methods used in the fight against snow and ice on highways and tests are performed on these samples. Fresh concrete and concrete sleeper samples that consist of control series and 5 different samples with basalt powder (pool sediment) additives at 0%, 5%, 10%, 15% and 20% by volume are produced. Durability tests are then carried out on these samples. The samples are subjected to a freeze-thaw cycle by means of a deep freeze. Unrefined NaCl salt concentration of 0.150 gr/cm² are used on the surface of the specimens with and without basalt addition.

Atıf için/Cite as: K.Arı, "Raylı sistem traverslere, bazalt tozu ilavesinin buz çözücü tuz etkisine katkısı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 79-90, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1114732

The samples are produced using a plasticizer additive. Consistency determination, water absorption and air content tests for fresh concrete; compression, splitting tensile, bending, abrasion and freeze-thaw tests for hardened concrete are carried out.

The sleeper specimens are loaded to compressive strength by mounting rails on them as utilized in the application, so the effects of basalt powder addition on the sleepers are determined with realistic behavior. The results obtained by making comparisons in terms of strength and durability properties allowed to determine the level of improvement that basalt powder will create in the durability properties of concrete sleepers.

Keywords: Rail systems, LVT type-twin-block sleepers, Basalt powder, Freeze-dissolve, Mechanical properties

1. Giriş

Karayollarında Tesisler ve Bakım Dairesi Başkanlığı tarafından karla mücadele kapsamında yollarda buzlanma öncesi (anti-icing) veya buzlanma sonrası uygulamalar yapılmaktadır. Elemanlara zarar vermeyen özel kimyasal solüsyonlar çok pahalı olduğundan uçak pistleri, köprüler viyadükler gibi özel uygulamalarda kullanılırken, karayollarında buzlanmaya karşı aşındırıcı olarak agrega, ıslatılmış tuz, çözelti (NaCl , CaCl_2 , MgCl_2) kullanılmaktadır. Karayollarında buzla mücadelede için kullanılan yöntemler hemen yanında bulunan raylı sistemlerin raylarına, traverlere beton birleşim elemanlarına zarar vermemelidir. Ancak buzlanma ile mücadelede kullanılan yöntemlerin özensiz uygulanması ve oluşabilecek zararlara karşı alınmayan önlemler yüzünden raylı sistem elemanları zarar görmekte ve sürekli bakım ve onarım gerektirmektedir. Bunun sonucunda da büyük maliyetler ortaya çıkmaktadır.

Klor tuzları buzlanma önlemi için yaygın kullanılan tuzlardır. Klor tuzları arasında ise buzlanmaya çözüm için, sodyum klorür (NaCl) kullanılır. Bunun sebebi sodyum klorürün (NaCl) ucuz ve bol olması, kolay depolanması, serpilerek basit uygulanabilmesidir. Katı ve sıvı formda, buzlanmayı önleme amacıyla kullanılmaktadır. CaCl ve MgCl ise NaCl malzemesinin çözüm olmadığı soğuk havalarda kullanılır [1]. Bundan dolayı bu çalışmada sodyum klorür (NaCl) kullanılması tercih edilmiştir.

Yollarda, köprülerde, viyadüklerde sıvı kimyasal kullanımı ile geçişlerin karla kaplanmasını ya da buzlanmasının önlemek mümkün olmaktadır. Bu uygulamalar sonucunda, karla mücadele araçları ile yolları temizlemek kolaylaşmaktadır. Kullanılan sıvı ya da katı kimyasalların uygulanmasında özel araçlara ihtiyaç duyulmaktadır [2]. Beton yüzeyindeki hasar, kaya tuzu ve kalsiyum klorür ile buzun sık sık kaldırılmasından sonra ortaya çıkmaktadır. Etki bu tuzların birkaç defa kullanılmasından sonra belirginleşir [3].



Şekil 1. Ray mesnet blokları traverler

Raylı sistemlerde en çok dikkat edilmesi gereken elemanlar traverlerdir. Çünkü traverler, rayın ötelenme, dönme ve çökme hareketini önleyerek, vagonun titreşimsiz ve güvenli bir şekilde

ilerlemesini sağlayan mesnet bloklardır. Şekil 1’de görüldüğü gibi raylar mesnet blokları olan traverslerin üzerine monte edilerek kullanılmaktadır.

Beton traversler ekonomik ve mekanik özellikleri açısından uygun görülmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak üretilen traverslerde iklim şartları, maruz kalınan kimyasal ortam ve bakım koşulları nedeniyle traverslerde sorunlar yaşanmaktadır. Raylı sistemlerin yanındaki asfalt yollarda kış şartlarında buzlanmayı önlemek için atılan tuzlar sıçrayarak raylı sistemin beton kısımlarına ve traverslere sıçramakta ve Şekil 2’de görüldüğü gibi çatlama ve bozulmalara yol açmaktadır.



Şekil 2. Traverslerde buz çözücülerden kaynaklanan çatlama ve bozulmalar

Beton birçok yapı elamanının üretiminde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, betonun dayanımı, davranışı ve mekanik özellikleri ilave katkı malzemeleri yardımıyla sürekli iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Traverslerin mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek için bu çalışmada bazalt tozu kullanılmıştır. Traverslerde yaşanabilecek kusurlarının tespiti, hat verimliliğinin artırılması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesinde ilk adımdır. Kusurların tespit edilmesinden sonra, bu kusurun nedenlerini bulmak için araştırma yapmak ikinci önemli adımdır. Beton ve beton traverslerin özelliklerini iyileştirmek için çok sayıda araştırma mevcuttur [4-5-6]. Konkasörlerde kırma taş üretilirken doğal malzemeden çıkan atık toz malzemeler betonda değerlendirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır [7,8]. AKYÜNCÜ ve ark. [9] tarafından yapılan çalışmada Tekirdağ bölgesinde yer alan bazalt ocaklarından çıkan atık bazalt tozunun harç numunelerine katılması araştırılmıştır. Geçirimlilik ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bazalt tozunun harç üretiminde kullanım miktarının ve harç özelliklerinde iyileştirme yaptığı ortaya konulmuştur. Ayrıca betonda volkanik kökenli bazaltın; lif katkı maddesi, agrega, mineral katkı gibi kullanılabilirliği ile ilgili araştırmalar yapılmış sonuçları tartışılmıştır [10,11]

Bazalt tozu insan sağlığına ve çevreye zarar vermektedir. Laibao ve ark. [12] tarafından yapılan deneysel çalışmada bazalt tozunun kimyasal bileşimi ve puzolanik aktivitesi tespit edilmiştir. Atık olarak ortaya çıkan bazalt tozu ile harç numuneleri üretilmiş basınç dayanımları belirlenmiştir. Sonra atık bazalt tozlu harçların izotermal kalorimetrik ölçüm, x ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) testi ile özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak bazalt tozunun belirgin bir puzolan faaliyet gösterdiği ve bir mineral katkı maddesi olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada Kayseri-Erkilet bölgesindeki doğal taş bazalt ocaklarından kaplama malzemeleri üretimi yaparken ortaya çıkan Şekil 3’de görüldüğü gibi havuz çökeltisi atık bazalt tozu kullanılmıştır. Bu tozlar firma tarafından depolanması zor, çevreyi kirleten atık bir üründür.



Şekil 3. Bazalt tozu havuz çökeltisi ve depolanması

2. Metot

Yapılan çalışmada, su/çimento oranı 0.46 olan C 30/37 beton sınıfı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılacak agregaların kuru yüzey doygun özgül ağırlıkları ince agrega 2.73 kg/dm^3 , iri agrega 2.67 kg/dm^3 ve kum 2.60 kg/dm^3 olarak bulunmuştur. Çalışmada üretilen bütün betonlarda, çimento olarak TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 R türü çimento kullanılmıştır [13]. Bazalt tozunun ve çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. 1 m^3 beton için kullanılan malzemelerin karışım değerleri ise Tablo 2’de verilmiştir. Kimyasal katkı olarak TS EN 934–2+A1 standardına uygun, Sikament F-05, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır [14]

Tablo 1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Bileşim (%)	CEM I 42.5 R	Bazalt Tozu
CaO	61.97	12.37
SiO ₂	19.03	43.97
Al ₂ O ₃	5.37	12.02
Fe ₂ O ₃	3.26	10.60
MgO	1.16	9.57
SO ₃	2.74	0.44
Na ₂ O/K ₂ O	0.21/0.75	0.84/2.35
Cl-	0.0412	0.220
İncelik (90 µ Elek kalan %)	0.2	48.1

Beton karışım hesapları hazırlanırken mutlak hacim yöntemi dikkate alınmıştır. Çimento ve su oranları hesaplandıktan sonra TS 802’ye göre hava boşluğu hacmi dikkate alınmıştır. Hesaplanan oranlar Tablo 2’de görülmektedir [15].

Tablo 2. Beton ve travers numunelerinin (C30/37) karışım ağırlıkları

Numune Kodu	Portland Çimentosu (kg/m ³)	Bazalt Tozu (kg/m ³)	0-4 mm (kg/m ³)	4-8 mm (kg/m ³)	8-16 mm (kg/m ³)	Kimyasal Katkı (kg/m ³)
BT%0	360	-	790	470	650	3,6
BT%5	342	18	790	470	650	3,6
BT%10	324	36	790	470	650	3,6
BT%15	306	54	790	470	650	3,6
BT%20	288	72	790	470	650	3,6

Sertleşmiş beton özelliklerini tespit etmek amacıyla basınç dayanımı TS EN 12390-3, eğilmede çekme dayanımı TS EN 12390-5, yarmada çekme dayanımı TS EN 12390-6, su emme oranı deneyleri ise TS EN 12390-7 standartları esas alınarak belirlenmiştir [16,17,18, 19].

Üretilen tüm farklı seriler için TS EN 12350–2 taze beton deneyleri çökme deneyinde anlatıldığı şekilde çökme deneyleri yapılmıştır. Böylelikle bazalt tozunun betonun işlenebilirlik özelliğine nasıl bir etki yaptığı da araştırılmıştır [20].

Sürtünme ile böhme aşınma kaybı deneyi için TS EN 13892-3'e uygun olarak her seri için 5'er adet kenar uzunlukları 7*7*7 cm'lik küpler üretilerek, tartılıp, kaydedilmiştir. Sürtünme ile böhme aşınma kaybı deneyi 20 g ± 0,5 g zımpara tozu ve 294 ± 3 N ile yükleme yapılan numuneler üzerinde 22 devirden meydana gelen çevrim, 16 kez uygulanmıştır. Deney numunesi temizlendikten sonra numune ağırlığı ölçülmüştür. 16 çevrim sonunda aşınma; numunenin kütlece % azalma değerleri hesaplanmıştır [21].

Hazırlanan karışımlarla her seri için küp numune ve travers numuneler üretilmiştir. Numuneler kalıplarında 24 saat 20±3°C ve %90 nem içeren laboratuvar ortamında bekletildikten sonra Şekil 4'de görüldüğü gibi normal sıcaklıktaki kirece doygun su içerisinde deney gününe kadar kür edilmişlerdir.



Şekil 4. Üretilen beton numuneler

%0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında bazalt tozu (havuz çökeltisi) katkılı traversler sac kalıplar kullanılarak laboratuvar ortamında 5 farklı seri olarak Şekil 5'de görüldüğü gibi 10'ar adet üretilerek buz çözücü etkisine karşı durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. LVT tipi ikiz-blok travers numune kalıpları ve üretilmesi

Numunelerin 4'er tanesi derin dondurucuda 20 defa donma-çözülme döngüsüne tabi tutulmuştur. Donma-çözülme için katkısız ve bazalt katkılı numunelerin yüzeyine Şekil 6'da görüldüğü gibi 0,150 gr/cm² miktarında NaCl ham tuz konsantrasyonu kullanılmıştır.



Şekil 6. NaCl ham tuz konsantrasyonu ile numunelerinin donma çözülme döngüsü

3. Bulgular

3.1. Taze ve sertleşmiş beton deney sonuçları

Taze beton ve beton travers numuneleri, hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında bazalt tozu (havuz çökeltisi) katkılı 5 farklı seri numuneler üzerindeki taze ve sertleşmiş beton deneyleri ile traversler üzerinde durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Taze beton numunelerinin deney sonuçları

Numune Kodu	Kıvam Değeri (cm)	Kütüce Su Emme Değeri (%)	Hava Miktarı (%)
BT%0	11,5	10,1	1,7
BT%5	11,2	9,8	1,5
BT%10	10,9	9,4	1,4
BT%15	10,7	8,8	1,4
BT%20	10,4	8,7	1,3

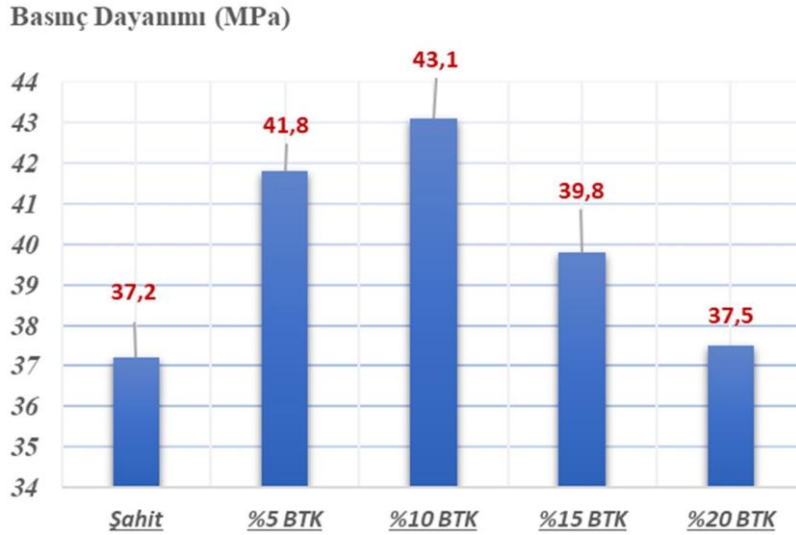
%0, %5, %10, %15 ve %20 bazalt tozu katkılı üretilen taze beton numuneleri üzerinde yapılan kıvam deneyleri sonucunda, Tablo 3'de görüldüğü gibi şahit numunelere göre bazalt tozu katılan numunelerde kıvam değerleri düşüş eğilimi göstermiştir. Çimento-bazalt tozu ikame oranının %0 ile %20 olduğu durum arasında 1.1 cm'lik bir fark oluşmaktadır.

Bazalt tozu katkısı betonda hava miktarını düşürmektedir. Yapılan çalışmada, bazalt tozu katkılı numunelerde taze betondaki agrega-çimento pastası ara yüzeyindeki boşlukları doldurup, kompoziteyi arttırdığı söylenebilir. Bazalt katkılı beton numunelerinde hava miktarı, kıvam değerleri ve su emme değerlerinde şahit numunelere göre düşüş görülmesi bu durumla ilişkilendirilebilir.

Tablo 4. Sertleşmiş beton deney sonuçları

Numune Kodu	Basınç Dayanımları (MPa)	Eğilme Dayanımları (MPa)	Yarmada-Çekme (MPa)	Aşınma-Kütle Kaybı (%)
BT%0	37,2	5,8	5,2	4,1
BT%5	41,8	6,5	5,5	4,2
BT%10	43,1	6,8	5,8	4,3
BT%15	39,8	6,2	4,8	4,6
BT%20	37,5	5,9	4,5	4,7

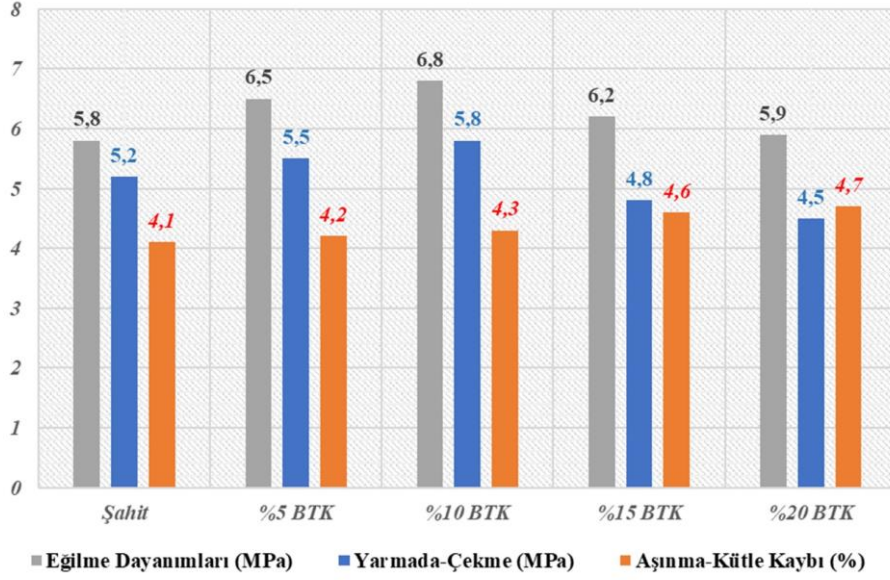
%0, %5, %10, %15 ve %20 bazalt tozu katkılı üretilen beton numuneler üzerinde yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneylerine göre Tablo 4’de verildiği gibi %5 ve %10 bazalt tozu katkılı üretilen numunelerde basınç dayanımlarının şahit numunelere göre arttığı görülmektedir. Bu artış eğilimi %15, %20 bazalt tozu katkılarında azalma eğilimine girmesine rağmen gene de şahit numunelerin ortalamasına göre yüksek dayanım elde edilmiştir. Basınç dayanımının, bazalt tozu katkı oranına bağlı olarak değişimi Şekil 7’de görülmektedir.

**Şekil 7.** Sertleşmiş beton basınç dayanımı deney sonuçları

Tablo 4’de verilen eğilme deneylerine göre %5 ve %10 bazalt tozu katkılı numunelerde eğilme dayanımlarının şahit numunelere göre arttığı görülmektedir. Ancak ince malzemenin artması sonucunda eğilme dayanımları %15 ve %20 bazalt tozu katkılı numunelerde düşmektedir.

Katkısız ve %5, %10, %15 ve %20 bazalt tozu katkılı olarak üretilen sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan yarmada-çekme deneylerine göre Tablo 4’de verildiği gibi %5 ve %10 bazalt tozu katkılı numunelerin yarmada çekme dayanımlarının şahit numunelere göre arttığı görülmektedir. %15 ve %20 bazalt tozu katkılı numuneler şahit numunenin değerlerine göre düşük kalmıştır. Bazalt tozu katkısının artmasına paralel ince malzeme miktarının artması, %15 ve %20 bazalt tozu katkılı numunelerde yarmada-çekme dayanımlarının azalmasına yol açmaktadır. Yarmada-çekme dayanımlarının, bazalt tozu katkı oranına bağlı olarak değişimi Şekil 8’de görülmektedir.

Böhme cihazında yapılan aşınma deneyleri, numunelerin yüzey pürüzleri giderilerek gerçekleştirilmiştir. Böhme aşınma deneyleri sonucunda şahit numunelerde kütle kaybı ortalaması %4,1 olmuştur. Bazalt katkısıyla birlikte ince tanelerin artması, aşınma kaybı değerlerini %4,7'ye yükseltmiştir.

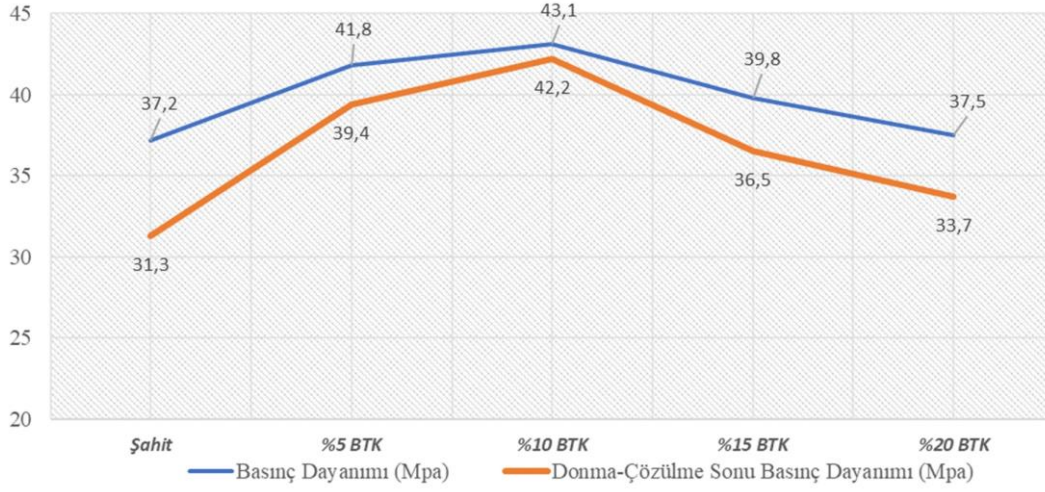


Şekil 8. Beton deneyleri sonuçları

Donma-çözülme için katkısız ve %5, %10, %15, %20 bazalt tozu katkılı beton ve travers numunelerin yüzeyine 0,150 gr/cm² miktarda NaCl ham tuz konsantrasyonu uygulanmıştır. NaCl ham tuz konsantrasyonu katkısız numunelerin boşluklarına daha kolay nüfuz ederek betonun doygunluk derecesini arttırmıştır. Böylelikle Tablo 5 ve Şekil 9'da verildiği gibi özellikle şahit numunelerde donma çözülme döngüleri sonucunda don hasarı %15,86 olarak belirlenmiş, %2,09 değişim oranı ile en az %10 bazalt tozu katkılı beton numuneler etkilenmiştir.

Tablo 5. Beton numunelerin NaCl ham tuz konsantrasyonu ile donma-çözülme deneyi sonuçları

Numune Kodu	Basınç Dayanımları (MPa)	Donma-Çözülme Sonu Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim (%)
Şahit	37,2	31,3	-15,86
%5 BTK	41,8	39,4	-5,74
%10 BTK	43,1	42,2	-2,09
%15 BTK	39,8	36,5	-8,29
%20 BTK	37,5	33,7	-10,13



Şekil 9. Beton numunelerinin donma çözülme deneyleri sonuçları

Araştırmada LVT sistemli ikiz-blok traversler kullanılmıştır. Deneye tabi travers numuneler boyuna 4 adet $\Phi 8$, enine 3 adet $\Phi 6$ donatı kullanılarak üretilmiştir. %0, %5, %10, %15 ve %20 dozajlarında üretilen travers numuneler uygulamada kullanıldığı ve Şekil 10'da verildiği gibi üzerine raylar monte edilerek TS EN 13230-3 de belirtilen tasarım ve üretim için basınç dayanımı yüklemeleri yapılmış, böylelikle bazalt tozu katkısının traverslerin özelliklerine etkileri gerçeğe yakın davranışlarla belirlenmiştir [21].



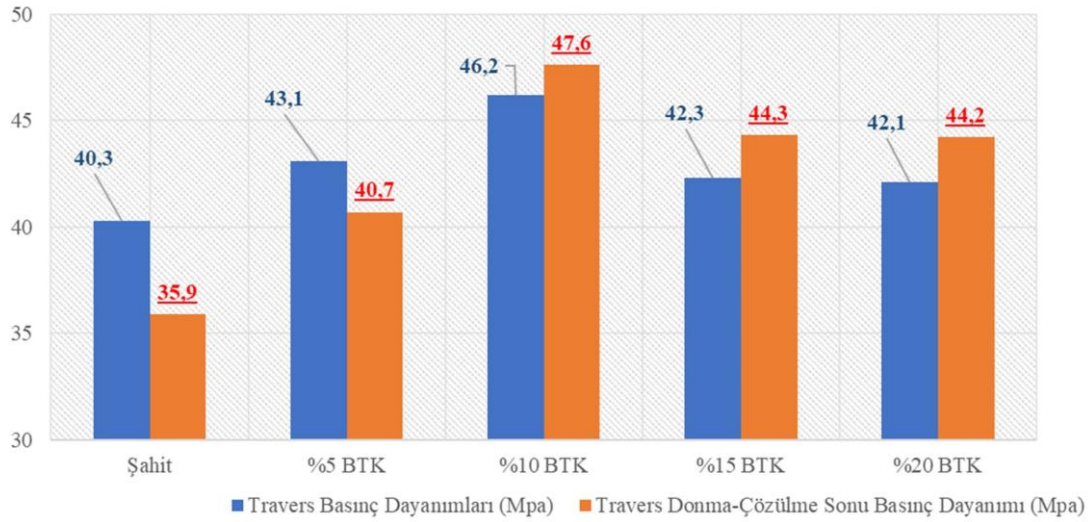
Şekil 10. Traverslerin basınç dayanımı deneyi

Tablo 6. Travers numunelerinin NaCl ham tuz konsantrasyonuyla donma-çözülme deneyi

Numune Kodu	Yükleme Alanı (mm ²)	Donma Çözülme Öncesi ve Sonrası Kırılma Yükleri (kN)	Travers Basınç Dayanımları (Mpa)	Travers Donma-Çözülme Sonu Basınç Dayanımı (Mpa)
Şahit	35280	1421,8 / 1266,6	40,3	35,9
%5 BTK	35280	1520,6 / 1435,9	43,1	40,7
%10 BTK	35280	1629,9 / 1608,8	46,2	45,6
%15 BTK	35280	1492,3 / 1386,5	42,3	39,3
%20 BTK	35280	1485,3 / 1379,5	42,1	39,1

Raylı sistem travers numunelerinin basınç dayanımı deneyleri sonucunda Tablo'6 da görüldüğü gibi, en yüksek değerler %10 bazalt tozu katkılı travers numunelerinde görülmüştür. Raylı olarak uygulanan basınç dayanımı deneyi sonucunda şahit numunelerin ortalaması 40,3 MPa olarak belirlenmişken, %10 bazalt tozu katkılı numunelerin ortalaması 46,2 MPa ile en yüksek artış oranını sağlamıştır.

Raylı travers numunelere buz çözücü etkisini belirlemek için NaCl ham tuz konsantrasyonu uygulanması sonucunda Şekil 11'de görülebileceği gibi şahit numunelerin ortalaması 40,3 MPa'dan, 35,9 MPa değerine düşmüştür. %10,92 oranında bir düşüş söz konusu olmaktadır. En avantajlı numuneler %10 bazalt tozu katkılı numuneler olmuştur. Donma çözülme döngüsünden önce numunelerin ortalaması 46,2 MPa iken döngü sonucunda 45,6 MPa olarak belirlenmiştir. %10 bazalt tozu katkılı numuneler %1,3 düşüş oranıyla buz çözücü etkisine en dayanıklı numuneler olmuştur.



Şekil 11. Travers numunelerinin donma çözülme deneyleri sonuçları

4. Sonuç

Karayollarında buzlanmayla mücadele kapsamında tuz kullanılmasının özellikle kent içindeki raylı sistem elemanlarından beton traverslere etkisini araştırmak ve servis ömürlerini arttırmak amacı ile yapılan bu deneysel araştırmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. %0, %5, %10, %15 ve %20 bazalt tozu katkılı üretilen taze beton numuneleri üzerinde yapılan kıvam deneyleri sonucunda, şahit numunelere göre bazalt tozu katılan numunelerde kıvam değerleri düşüş eğilimi göstermiş, işlenebilirlik zorlaşmıştır.
2. Bazalt tozu katkısı yeterli işlenebilirlik sağlanması kaydıyla betonda hava miktarını düşürmektedir. Yapılan çalışmada, bazalt tozu katkılı numunelerde taze betondaki agrega-çimento pastası ara yüzeyindeki boşlukları doldurup, kompoziteyi arttırdığı söylenebilir.
3. Beton numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneylerine göre %10 bazalt tozu katkısına kadar basınç dayanımlarının şahit numunelere göre arttığı görülmektedir. Bu artış eğilimi %15, %20 bazalt tozu katkılarında azalma eğilimine rağmen şahit numuneye göre yüksek dayanım elde edilmiştir.

4. Bazalt tozu katkılı üretilen raylı beton travers numunelerin basınç dayanımı deneyleri sonucunda beton numunelerde olduğu gibi en yüksek değerler %10 bazalt tozu katkılı travers numunelerinde görülmüştür. Bazalt tozunun çimento ikamesiyle kullanımı sayesinde traverslerin mekanik özellikleri iyileşecek, çimento tüketimi azalacağından hem ekonomik hem de çevresel fayda sağlanacaktır.
5. Donma-çözülme döngüleri sonucunda tuz etkisinde beton büyük oranda aşınmakta ve zamanla ufalanmaktadır. Bunu önleyecek optimum bazalt tozu katkı oranının %10 olduğu bulunmuştur.
6. Raylı travers numunelerin yüzeyine 0,150 gr/cm² NaCl ham tuz konsantrasyonu uygulanması sonucunda şahit numunelerin basınç dayanımında %10,92 oranında bir düşüş söz konusu olmaktadır bu değer en optimum oran olarak tespit edilen %10 bazalt tozu katkılı numunelerde %1,30 seviyelerinde olmuştur.

Raylı sistemlerin alt yapısını oluşturan beton travers elemanlara, %10 bazalt tozu katkısı, buz çözücü tuzların etkisini azaltarak, durabilite özelliklerini iyileştirmektedir. Bu çalışmanın sonucunda bazalt doğal taşları kesilirken, atık olarak açığa çıkan havuz çökeltisi bazalt tozu malzemesinin ekonomiye kazandırılması sağlanacaktır. Raylı sistem traverslerinin tuz çözücülerden zarar görmemesi için bu çalışmaya ek olarak hava sürükleyici katkı maddeleriyle bazalt tozunun birlikte kullanılması araştırmacılara bir sonraki çalışma olarak önerilebilir.

Kaynakça

- [1] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Kar ve buzla mücadele rehberi, Sy 4, 2019
- [2] Michigan department of transportation, agricultural by-products for antiicing and deicing use in michigan, research report R1418., 2002
- [3] Ş. Berberoğlu, Beton yollarda buz çözücü tuz etkisine su-çimento oranının etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011
- [4] F. Çeçen, “Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforced concrete railway sleepers,” Master Thesis, Gazi Osman Paşa University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 156 pages, Tokat, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22723.43049>
- [5] C. Esveld, *Modern railway track*. ISBN 978-1-326-05172-3, 2014
- [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] Dobiszewska, M., Schindler, A.K., Pichór, W., “Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition”, *Construction and Building Materials*, 177, 222-229, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.133>
- [8] Saraya, M.E.I., “Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study”, *Construction and Building Materials*, 72, 104-112, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.071>
- [9] V. Akyüncü, and M. T. Cihan, Bazalt tozu katkılı harçların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21 (2), 697-707, 2019. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.636998>
- [10] H. Dilbas, and Ö. Çakır, “Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete” *Construction and Building Materials*, 254, 119216, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119216>.
- [11] P. P. Li, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, “Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC)”. *Construction and Building Materials*, 170, 649-659, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.109>
- [12] Laibao, L., Yunsheng, Z., Wenhua, Z., Zhiyong, L. and Lihua, Z., “Investigating the influence of basalt as mineral admixture on hydration and microstructure formation mechanism of cement”, *Construction and Building Materials*, 48, 434-440, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.021>
- [13] “Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, TS EN 197-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002

- [14] “Kimyasal katkıları-Beton, harç ve şerbet için-Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları-Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme” TS EN 934-2+A1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013
- [15] “Beton karışım tasarımı hesap esasları”, TS 802, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016
- [16] “Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini”, TS EN 12390-3, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019
- [17] “Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini”, TS EN 12390-5, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019
- [18] “Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, TS EN 12390-6, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010
- [19] “Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini”, TS EN 12390-7, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019
- [20] “Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabii tutulması”, TS EN 12390-2, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019
- [21] “Deney yöntemleri- Bölüm 3: Aşınma direncinin tayini-Böhme” TS EN 13892-3, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015
- [22] “Demiryolu uygulamaları-Yol-Beton traversler ve mesnetler-Bölüm 3: Donatılı ikiz traversler” TS EN 13230-3, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016

Özgeçmiş



Kamuran ARI

1975 yılında Kırıkkale’de doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini Kayseri’de tamamladı. 2001 yılında Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2001 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2002’de Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak işe başladı. 2009’da Çukurova Üniversitesi’nde doktorasını tamamladı. Halen Dr.Öğr.Üyesi olarak Nuh Naci Yazgan Üniversitesi’nde görev yapmaktadır. İlgi Alanları: Özel betonlar, Betonun fiziksel-mekanik özellikleri, Çimento.
E-Posta: kamuran@nny.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Kaynak İşleminde Sıcaklık Dağılımının İki Boyutlu Sayısal Simülasyonu

Osman ÜNAL^{*1}, Nuri AKKAS¹, Ahmet Taner SARIHAN²

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

² TÜRASAS Genel Müdürlüğü, Vagon Gövde Şube.Müd., Sakarya, Türkiye

*osman92unal@gmail.com

(Alınış/Received: 07.06.2022, Kabul/Accepted: 29.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Bu çalışmada, raylı sistem araç gövdelerinde kullanılan EN AW 6005A T6 alaşımlı profillerin gaz altı kaynağı yapılırken meydana gelen ısı akışının iki boyutlu sayısal bir simülatörü geliştirilmiştir. İş parçası üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı, düzgün olmayan hareketli ısı kaynakları ve taşınımla ısı transferi terimini içeren geçici ısı iletimi probleminin sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözümlenmesiyle elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, kaynak işlemindeki erimiş havuzun düşük sıcaklık bölgesinde sıvı metalin erken katılaşmasını önleyecek optimum sıcaklık dağılımını, geliştirilen simülasyon sayesinde araştırabilmektir. Önerilen iki boyutlu simülatör sayesinde, optimum sıcaklık dağılımını elde etmek için yapılacak olan deneylerin sayısı azaltılarak işletme maliyetleri düşürülebilecektir. Geliştirilen simülatörün en belirgin avantajları, zaman adımı boyutlarını, ızgara boyutlarını, toplam simülasyon süresini, kaynakların güç büyüklüklerini, elektrotlar arasındaki mesafeyi, kaynakların hızını değiştirebilmektir. Ayrıca bu simülatör, farklı malzemelerde tek telli kaynak ve tandem kaynak işlemleri için de kullanılabilir. İkinci olarak, sayısal sonuçları doğrulamak için Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş' de (TURASAS) Fluke Thermal Imager kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizden elde edilen maksimum sıcaklığın, deneysel sonucun maksimum sıcaklığından sadece %1 farklı olduğu görülmüştür. Bu sonuç, önerilen iki boyutlu simülatörün, deneysel çalışma ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Son olarak, geliştirilmiş iki boyutlu sayısal simülatör ile ilgili tüm Matlab kodları, bu çalışmanın üç boyutlu sayısal simülasyonu üzerinde çalışmak isteyen diğer araştırmacıların çalışmalarını kolaylaştırmak için makalenin sonuna eklenmiştir.

Anahtar kelimeler: İki boyutlu sayısal simülatör, Sonlu farklar yöntemi, Alüminyum tandem kaynak

Two-Dimensional Numerical Simulation of Temperature Distribution in Welding Process of Aluminum Alloys Used in Rail Vehicles

Abstract: In this study, a two-dimensional numerical simulator of the heat flow occurring during gas metal arc welding of EN AW 6005A T6 alloy profiles used in rail system vehicle bodies has been developed. The temperature distribution on the work piece is obtained by solving the problem of transient heat conduction, which includes the term of non-uniform moving heat sources and convection heat transfer, using the finite difference method. The aim of this study is to investigate the optimum temperature distribution that will prevent premature solidification of the liquid metal in the low temperature region of the molten pool in the welding process, by means of the developed simulation. Due to the proposed two-dimensional simulator, operating costs can be reduced by reducing the number of experiments to be carried out to obtain the optimum temperature distribution. The most obvious advantages of the developed simulator are being able to change the time step sizes, grid sizes, total simulation time, power sizes of the welds, distance between the electrodes, and speed of the welds. In addition, this simulator can be used for single-wire and tandem welding operations in different materials. Secondly, the experimental studies were carried out using Fluke Thermal Imager in Turkey Rail System Vehicles Industry Inc. (TURASAS) to verify the numerical results. The maximum temperature obtained from the numerical analysis was found to differ only 1% from the maximum temperature of the experimental result. This result shows that the proposed two-dimensional simulator is compatible with the experimental work. Finally, all Matlab codes related to the developed two-dimensional numerical

Atıf için/Cite as: O. Unal, N. Akkas, A.T. Sarihan, "Raylı sistem araçlarında kullanılan alüminyum alaşımlarının kaynak işleminde sıcaklık dağılımının iki boyutlu sayısal simülasyonu" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 91-101, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1127197

simulator are included at the end of the article to facilitate the work of other researchers' work who wants to work on the three-dimensional numerical simulation of this study.

Keywords: Two-dimensional numerical simulator, Finite difference method, Aluminium tandem welding

1. Giriş

Raylı sistemler güvenli ulaşım, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet üstünlüğü gibi konularda diğer ulaşım sistemlerine göre daha avantajlı olması nedeniyle tüm dünyada yeniden önem kazanmıştır [1]. Toplu taşıma araçları içinde yoğun olarak tercih edilen demiryolu araçları üretiminde alüminyum alaşımları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Araç üretiminde kullanılan başlıca imalat yöntemlerinden olan kaynak prosesinde, ısıdan etkilenen bölgenin kontrolü ve çarpılma etkisinin azaltılması gerekmektedir. Bu amaçla tek tel beslemeli gazaltı kaynak yöntemi geliştirilerek, çift tel beslemeli tandem kaynağı kullanılmaya başlanmıştır. Tandem kaynağı, birçok araştırmacının ortaya koyduğu gibi, kaynak verimliliğini artırmaktadır [2],[3]. Çift telli kaynak, tek telli kaynağa göre daha yüksek yığıma hızına ve üretim verimliliğine sahip olduğundan, ağır sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Çift telli kaynak prosesinde, yüksek kaynak hızı ve yığıma hızı elde edilebilmektedir. Yığıma oranı, tandem kaynak prosesinde, konvansiyonel gaz altı kaynağına oranla alüminyum kaynağında bir buçuk katına, çelik kaynağında ise iki katına çıkarılabilir [5],[6]. Tandem kaynağı, tek tel yaklaşımına kıyasla kalın alüminyum plakalar için gerekli kaynak paso sayısını yarıya düşürebilir [7]. Tek telli kaynak işlemlerinde, kaynak banyosunun dar olması nedeniyle erken katılma ve daha fazla yüzeysel kusur oluşmaktadır [8]. Çift telli kaynak kullanılarak kök nüfuziyetsizliği ve ergime yetersizliği gibi kaynak kusurları önlenir [9]. Bu çalışmada, kaynak işleminin basitleştirilmiş bir formunun iki boyutlu sayısal çözümü kullanılarak tek telli ve çift telli kaynağın sıcaklık dağılımı karşılaştırılmıştır. Tek telli ve çift telli kaynak proseslerinin sayısal çözümlerini ifade etmek için, düzgün olmayan hareketli ısı kaynağı ve taşınım ile ısı transferi terimini içeren geçici ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Geçici ısı iletim denklemindeki çok boyutlu ölçekleme, taşınım ile ısı transfer faktörü terimi ve homojen olmayan ısı kaynakları nedeniyle literatürde bu karmaşık problem için analitik bir çözüm bulunmamaktadır. Bu karmaşık problemi simüle etmek için sayısal bir çözüm geliştirilmiştir [10]. Kısmi diferansiyel denklemlerini sayısal olarak çözenin en önemli ve etkin tekniklerinden biri sonlu farklar yöntemidir [11]. Bu çalışmada geliştirilen sayısal çözüm sonlu farklar yöntemine dayandırılmaktadır. Sonlu farklar yöntemi, türevlerin yaklaşık değerlerini hesaplamak için kullanılır [12]. Denklem 1., çift telli kaynak işleminin basitleştirilmiş bir formu için kısmi diferansiyel denklemi göstermektedir.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q - \frac{hP(T-T_{\infty})}{A} \quad (1)$$

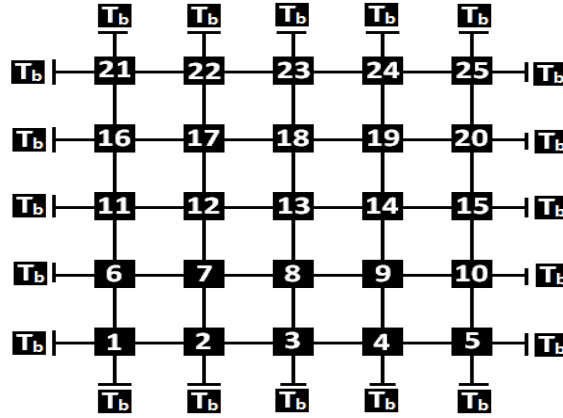
Denklem 1' de; sol taraftaki terim birikim terimi, sağ taraftaki ilk terim iletim terimi, sağ taraftaki ikinci terim ısı kaynağı terimi ve sağ taraftaki son terim ise konveksiyon terimidir [13]. Bu çalışmanın temel amacı, tek telli ve çift telli kaynak işlemleri için Denklem 1'in sayısal çözümünü elde etmektir. Yüksek hızlı tek telli kaynak işlemlerinde, erimiş havuzun düşük sıcaklık bölgesinde sıvı metalin erken katılması nedeniyle kaynak görünümü kusurları gözlenmektedir [8]. Çift telli kaynak kullanılarak alttan kesme ve tümsek kaynak kusurları önlenmektedir [9]. Bu çalışmada, tek telli ve çift telli kaynağın sıcaklık dağılımını karşılaştırmak için kaynak işleminin basitleştirilmiş bir formunun sayısal çözümü geliştirilmiştir. Geliştirilen sayısal model sayesinde, çok fazla deney yapılmadan alüminyum kaynak işleminde istenilen ısı girdisinin belirlenmesi sağlanabilecektir. Kaynak işleminde doğru ısı girdisinin bulunması kaynak kusurlarını azaltacaktır.

2. Metot

Bu bölüm EN AW 6005A T6 alüminyum alaşımlı profil kaynağının sıcaklık dağılımını elde etmek için sayısal çözümü ve deneysel çalışmayı içermektedir. İlk olarak kaynak prosesinin sıcaklık dağılımını simüle etmek için sayısal bir çözüm geliştirilecektir. İkinci olarak, sayısal çözüm deneysel çalışma ile doğrulanacaktır.

2.1. Sayısal çalışma

Bu bölümde Denklem 1'in sayısal çözümü için yirmi beş düğüm (veya nokta) olduğu varsayılmaktadır. Sayısal hesaplamayı daha kolay ifade edebilmek için her satırda ve sütunda beş düğüm olduğu varsayılmaktadır. Şekil 1, iki boyutlu sayısal çözüm için uzay ayrıklaştırmasının ve sınır koşulunun şemasını göstermektedir. Bulduğu konumdan dolayı herbir nokta için sınır koşulları farklı olacağından, herbir nokta için geliştirilen denklem de farklı olacaktır. Farklı sayılardaki düğüm sayıları için tüm durumları genelleştiren bir denklem sisteminin türetilmesi gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için aşağıda yer alan tüm denklemler ayrıntılı bir şekilde yazılmıştır.



Şekil 1. İki boyutlu sayısal simülasyon için uzay ayrıklaştırması ve sınır koşulu

Denklem 2, satır numarası $r=1$ ve sütun numarası $c=1$ (düğüm 1) için örtük zaman ayrıklaştırması (implicit time discretization) [14] ve ikinci türev uzayı ayrıklaştırma tekniği kullanılarak Denklem 1'in sayısal çözümünü gösterir.

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta r} + k \frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (2)$$

$r=1$ ve $1 < c < c_n$ ($c_n=5$, son sütun sayısı) için ayrıklaştırılmış denklem (2, 3 ve 4 düğümleri için) (Denklem 3):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta r} + k \frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (3)$$

$r=1$ ve $c=c_n$ (5. düğüm için) için ayrıklaştırılmış denklem (Denklem 4):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta r} + k \frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (4)$$

$1 < r < r_n$ ($r_n=5$, son satır sayısı) ve $c=1$ (6, 11 ve 16 düğümleri için) için ayrıklaştırılmış denklem (Denklem 5):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c/2}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (5)$$

$1 < r < rn$ ve $1 < c < cn$ için ayrılaştırılmış denklem (7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18 ve 19 iç düğümleri için) (Denklem 6):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (6)$$

$1 < r < rn$ ve $c = cn$ (10, 15 ve 20 düğümleri için) için ayrılaştırılmış denklem (Denklem 7):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (7)$$

$r = rn$ ve $c = 1$ için ayrılaştırılmış denklem (düğüm 21 için) (Denklem 8):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta c/2}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (8)$$

$r = rn$ ve $1 < c < cn$ için ayrılaştırılmış denklem (22, 23 ve 24 düğümleri için) (Denklem 9):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (9)$$

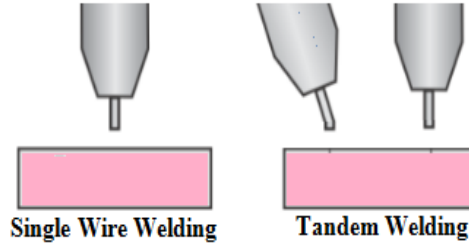
$r = rn$ ve $c = cn$ için ayrılaştırılmış denklem (son düğüm 25 için) (Denklem 10):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (10)$$

Yukarıda yer alan denklemlerdeki T^{n+1} değerleri her bir nokta için bir sonraki zaman adımında yer alan bilinmeyen sıcaklık değerleridir. T^n değerleri ise bir önceki zaman adımındaki bilinen sıcaklık değerleridir. P perimetre alanını, c özgül ısı kapasitesini, h konvektif ısı transfer katsayısını, k termal iletkenliği, q ısı kaynağını, ρ yoğunluğu, Δt zaman adımlarını, Δr satır boyunca konum aralığını, Δc sütun boyunca konum aralığını ifade etmektedir. Bu denklem sisteminin çözümü ile ilerleyen her bir zaman adımındaki bilinmeyen sıcaklık değerleri her bir nokta için bulunur. Denklem 1'in örtük (implicit) [15] sayısal çözümünü elde etmek için, her zaman adımı için Denklem 2' den Denklem 10' a kadar tüm bilinmeyenler ve katsayılar matris formuna getirilmeli ve matris çözümü [16] hesaplanmalıdır (matris çözümü hakkında daha ayrıntılı bilgi almak için Ekler kısmına bakınız). Kaynak işleminin sıcaklık dağılımı bu matris çözümü ile belirlenir.

2.2. Deneysel çalışma

Tek tel kaynağı, en çok kullanılan ark kaynağı işlemlerinden biridir. Daha küçük çaplı bir tel, daha yüksek akım yoğunluğu nedeniyle aynı akımda daha yüksek yığıma sağlar. Küçültülmüş tel çapı, hem derinlemesine nüfuz eden hem de nispeten ince olan bir kaynak dikişi ile sonuçlanır. Yüksek performans/kaynak hızı ve iki iş parçası arasındaki geniş kaynak boşluklarını doldurma yeteneği, tek telli kaynağa göre tandem kaynağının avantajlarından biridir [17]. Şekil 2, tek telli kaynak ve tandem kaynak işlemlerini şematik biçimde göstermektedir.



Şekil 2. Tek tel ve tandem kaynak işlemlerinin şematik görünümü

Tandem kaynağı, iki farklı kaynak sisteminin senkronize edilmesini içeren bir işlemdir. Birbirine bağlı olmayan tel elektrotlar, bir gaz nozülü ve izole edilmiş kontak uçları olan ayrı tel besleyiciler aracılığıyla bir torç hortum paketiyle beslenir. Kaynak havuzunu oluşturmak için iki ark birleşir. Her iki tel elektrodu senkronize etmek için bir Twin Controller kullanılabilir. Kaynak her iki yönde de yapılabilir. Bu yaklaşım çok daha kararlıdır ve ince saclarda son derece yüksek kaynak hızlarına imkan verir. Kalın saclar için bu yaklaşım, önemli ölçüde daha büyük bir kaynak dikişi hacmine izin vererek yüksek yağma hızı sunar.

Bu çalışmadaki tüm deneyler Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş. (TÜRASAŞ)' de yapılmış olup, sistem Milli Elektrikli Tren Seti Alüminyum alaşımlı gövde imalatında kullanılmaktadır. Kaynak deneyi için 600 mm x 80 mm x 3 mm boyutlarında EN AW 6005A T6 alüminyum alaşımlı sac kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin yoğunluğu 2,70 g/cm³, çekme mukavemeti 300 MPa, Young modülü 68 GPa, akma mukavemeti 250 MPa ve termal genleşme değeri 23 µm/m-K'dir. Kaynak operasyonu sırasında kullanılan malzemenin bileşimi Tablo 1' de verilmiştir [18].

Tablo 1. EN AW 6005A T6 alüminyum alaşımlı malzemenin bileşimi

Si	Mn	Fe	Cu	Mg	Ti	Cr	Zn	Al
%0,40	%0,05	%0,175	%0,05	%0,675	%0,05	%0,05	%0,05	%98,5

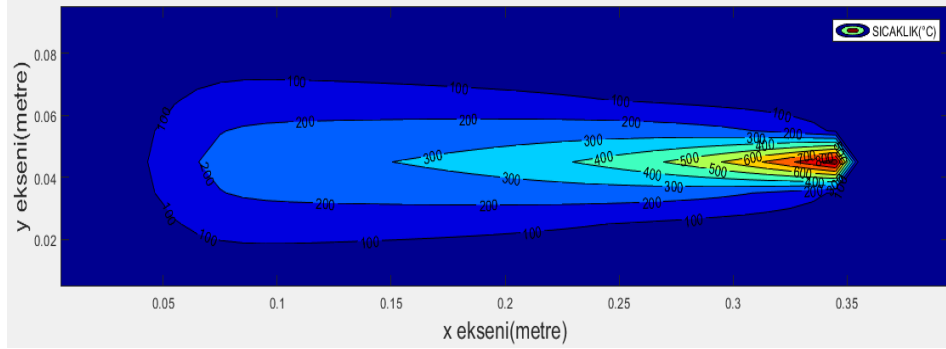
Bu araştırmada tek telli ve tandem kaynak yöntemlerinde 5356 AlMg5 tipi elektrotlar kullanılmıştır. Kaynak akımı 186 A ve kaynak voltajı 21,8 V'tur. Kaynak teli besleme hızı 10,4 m/dk'dır. Bu çalışmada, iş parçasına ısı girdisini azaltabilmek kaynak hızı artırıldığından, kaynak teli besleme hızı da artırıldı. Buna bağlı olarak, akım ve voltaj değerleri kaynak makinesi tarafından otomatik olarak belirlendi. TÜRASAŞ'ta yapılan tandem kaynak işlemi Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. TÜRASAŞ'ta yapılan tandem kaynak işlemi

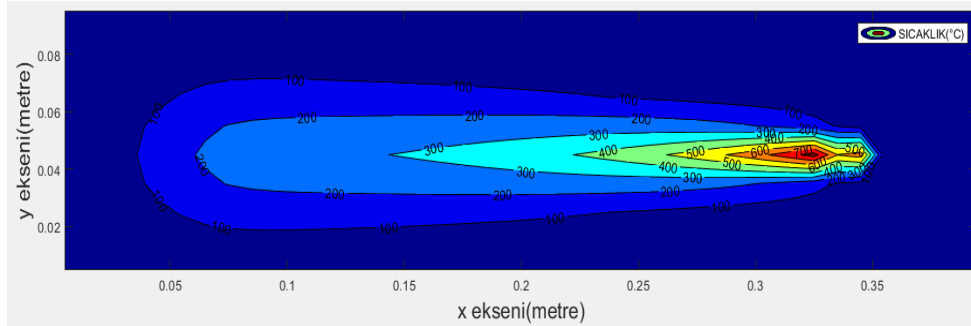
3. Bulgular

Üniform olmayan hareketli ısı kaynağı ve konvektif ısı transferi terimi ile geçici ısı iletimi probleminin iki boyutlu sayısal simülasyonu, istenilen zaman adımı boyutları, farklı düğüm (yada nokta) sayısı, tek ve tandem kaynak işlemleri için geliştirilmiştir (bkz. Ekler) . Şekil 4, 400 düğüm ($m=10$ ve $cn=40$) kullanan Denklem 1'in sayısal çözümünü göstermektedir. Tek telli kaynak işlemi için ortam sıcaklığının 20°C olduğu, tek hareketli ısı kaynağının olduğu, sol ve sağ sınır koşullarının 20°C olduğu varsayılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi, kaynak sonrası sıcaklık alüminyumun erime noktasının (660°C) hemen altına düşer [19] ve sıvı metalin erken katılaşması nedeniyle kaynak görünümü bozukluklarına yol açabilir.



Şekil 4. Tek telli kaynak için iki boyutlu simülasyon

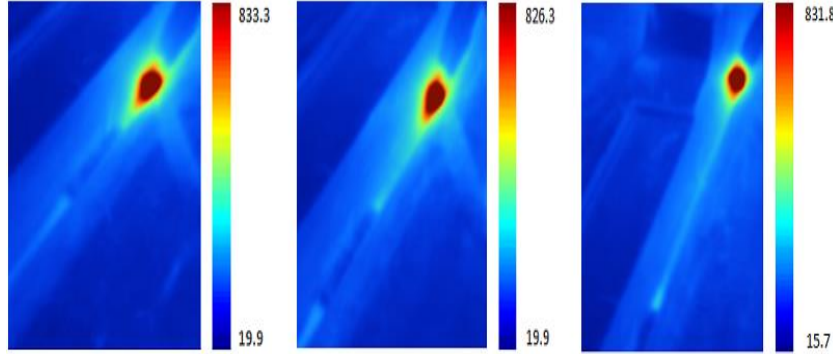
Şekil 5, üniform olmayan hareketli 2 ısı kaynağı ve taşınım ile ısı transferi terimi ile geçici ısı iletimi probleminin sayısal çözümünü göstermektedir. Şekil 5'te farklı güçte iki elektrot bulunmaktadır. Şekil 5'te yer alan ikinci elektrot, iş parçasına daha homojen bir ısı girdisinin sağlanması için kullanılmaktadır [9]. Zayıf penetrasyon, gözeneklilik, kök nüfuziyetsizliği vb. gibi kaynak görünümü kusurları, tandem kaynak işlemi kullanılarak engellenebilir [2]. Düşük sıcaklık bölgesinde sıvı metalin katılaşması için toplam süre ikinci elektrot kullanılarak uzatılabilir. Kaynak ilerleme yönü referans alındığında arkada kalan elektrot, sıvı metalin aniden soğumasını önler. Bu sayede ani ısı değişiminin sebep olduğu, kaynak görünümü kusurları önlenir [8].



Şekil 5. Tandem kaynağı için iki boyutlu simülasyon

Deneyel olarak elde edilen alüminyum kaynak işleminin sıcaklık dağılımı Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 6'da yer alan görüntüleri elde etmek için, Fluke Thermal Imager kullanılmıştır. Bu kamera, iş parçası üzerindeki sıcaklık dağılımını iki boyutlu olarak gösterebilmektedir. Şekil 6'da üç deneysel sonuç gösterilmiştir. Bu üç deneysel sonuç, deneysel hataları azaltmak için kullanılmıştır. Daha güvenilir bir doğrulama yapabilmek için üç deneyden elde edilen verilerin ortalaması alınarak, sayısal analizden elde edilen sonuç ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, sayısal sonuçları doğrulamak için maksimum sıcaklık kullanılmıştır. Sayısal sonucun maksimum sıcaklığı $838,64^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarının maksimum

sıcaklıkları 833,33 °C, 826,31 °C ve 831,82 °C'dir. Deney sonuçlarının ortalama sıcaklığı 830,49 °C olarak belirlenmiştir. Sayısal sonuç, deneysel verilerle oldukça yakından eşleşmektedir. Elde edilen veriler, sayısal yöntemin sonuçlarının deneysel çalışmanın bulgularıyla doğrulandığını açıkça göstermektedir.



Şekil 6. Alüminyum kaynak işleminin sıcaklık dağılımları (°C)

4. Sonuç

Bu çalışma, üç farklı ısı transferi probleminin (üniform olmayan hareketli ısı kaynağı, taşınım ve ısı transferi ve geçici ısı iletimi) birleştirilmesiyle elde edilen kısmi diferansiyel denklemi kullanarak tandem kaynak işleminin matematiksel modelinin oluşturulabileceğini önermektedir. Önerilen matematiksel modelin iki boyutlu sayısal çözümünün sonlu farklar yöntemi ile elde edilmesi ve sayısal çözümün deneysel verilerle doğrulanması, bu çalışmayı özgün kılan değerdir. İkinci olarak, bu iki boyutlu sayısal simülasyon kullanılarak erimiş havuzun düşük sıcaklık bölgesinin sıcaklık dağılımını araştırmak için tek ve çift telli kaynak işlemleri karşılaştırılmıştır. Düşük sıcaklık bölgesinde sıcaklığın hızlı düşmesinin ikinci elektrot kullanılarak önenebildiği ve kontrol edilebildiği gözlemlenmiştir. Üçüncü olarak, alüminyum kaynak işleminin deneysel sıcaklık dağılımlarını elde etmek için Fluke Thermal Imager kullanılmıştır. Deneysel hataları azaltmak ve sayısal analiz ile daha güvenilir bir kıyaslama yapabilmek için üç termal görüntü çekilmiştir. Sayısal sonuçları deneysel testlerle doğrulamak için maksimum sıcaklık dikkate alınmıştır. Sayısal simülasyon kullanılarak sayısal sonucun maksimum sıcaklığı 838,65 °C olarak belirlenmiştir. Üç deney sonucunun ortalama sıcaklığı 830,49 °C olarak belirlenmiştir. Yüzde 1 hata ile sayısal sonucun deneysel sonuca oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Geliştirilen simülasyon sayesinde farklı malzemeler ve farklı ilerleme hızlarındaki kaynak işlemleri için optimum ısı girdisi voltaj ve akım değerleri değiştirilerek bilgisayar ortamında belirlenebilecek ve deney sayıları azaltılarak işletme maliyetleri düşürülebilecektir. Son olarak, sayısal simülasyon ile ilgili tüm MATLAB kodları ve Google Drive linki çalışmanın sonuna dahil edilmiştir. Çalışmanın sonuna eklenen iki boyutlu simülasyonun kodları ve makale içerisine detayları ile yazılan denklemler, sıcaklık dağılımının üç boyutlu sayısal simülasyonu üzerine çalışmak isteyen diğer araştırmacılara katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışma kapsamında Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş'ye (TÜRASAŞ) göstermiş oldukları yardım ve desteklerinden dolayı teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] A. Aktaş , Ö. Akbayır ve K. Aksay , "Türkiye Demiryolu Araçları, Tramvaylar ve Komponentleri Sektörünün Uluslararası Rekabet Gücü Analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 15, ss. 60-74, Oca. 2022, doi:10.47072/demiryolu.944301
- [2] D. Chen, M. Chen, and C. Wu. "Effects of phase difference on the behavior of arc and weld pool in tandem P-GMAW," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 225, pp. 45-55, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.05.022
- [3] L. Zhang. "Investigation of arc behaviour and metal transfer in cross arc welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 37, pp. 124-129, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.11.018
- [4] H. Zargari. "Visualizing the vibration effect on the tandem-pulsed gas metal arc welding in the presence of surface tension active elements," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 161, pp.1-14, Nov. 2020 . doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120310
- [5] T. Ueyama. "Effects of torch configuration and welding current on weld bead formation in high speed tandem pulsed gas metal arc welding of steel sheets." *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 10, pp. 750-759, July 2005, doi: 10.1179/174329305X68750
- [6] K. Lee, C. Kim, and D. Kim. "High deposition rate pulse gas metal arc welding for Al 5083 thick plate." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 227, pp. 848-854, Apr. 2013, doi: 10.1177/0954405413476860
- [7] C. Kim. "High-deposition-rate position welding of Al 5083 alloy for spherical-type liquefied natural gas tank." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 230, pp. 818-824, May 2015, doi: 10.1177/0954405414563553
- [8] G. Qin, C. Feng, and H. Ma. "Suppression mechanism of weld appearance defects in tandem TIG welding by numerical modeling." *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 14, pp. 160-173, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.06.042
- [9] G. Qin, X. Meng, and B. Fu. "High speed tandem gas tungsten arc welding process of thin stainless steel plate." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 220, pp. 58-64, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.01.011
- [10] C. Li, and A. Chen. "Numerical methods for fractional partial differential equations." *International Journal of Computer Mathematics* vol. 95, pp. 1048-1099, Jan. 2018, doi: 10.1080/00207160.2017.1343941
- [11] D. Fernández, J. Hicken, and D. Zingg. "Review of summation-by-parts operators with simultaneous approximation terms for the numerical solution of partial differential equations." *Computers & Fluids* vol. 95, pp. 171-196, May 2014, doi: 10.1016/j.compfluid.2014.02.016
- [12] D. Hawken, J. J. Gottlieb, and J. S. Hansen. "Review of some adaptive node-movement techniques in finite-element and finite-difference solutions of partial differential equations." *Journal of Computational Physics*, vol. 95, pp. 254-302, Aug 1991, doi: 10.1016/0021-9991(91)90277-R
- [13] Z. Wang. "A perspective on high-order methods in computational fluid dynamics." *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, vol. 59, pp. 1-6, Jan. 2016, doi: 10.1007/s11433-015-5706-3
- [14] Z. Torabi. "Stable time integration suppresses unphysical oscillations in the bidomain model." *Frontiers in Physics*, vol. 2, pp. 40-49, Nov. 2014, doi: 10.3389/fphy.2014.00040
- [15] C. Lubich, and A. Ostermann. "Linearly implicit time discretization of non-linear parabolic equations." *IMA journal of numerical analysis*, vol. 15, pp. 555-583, Nov. 1995, doi: 10.1093/imanum/15.4.555
- [16] G. Golub. "Numerical methods for solving linear least squares problems." *Numerische Mathematik* vol. 7, pp. 206-216, May 1965, doi: 10.1007/BF01436075
- [17] J. Tušek, I. Umek, and B. Bajcer. "Weld-cost saving accomplished by replacing single-wire submerged arc welding with triple-wire welding." *Science and Technology of Welding and Joining* vol. 10, pp.15-22, Jan. 2005, doi: 10.1179/174329305X24299
- [18] T. Bajor. "The analysis of the extrusion process of al 6005 alloy section." *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 56, pp. 637-642, Nov 2021, doi: 10.1007/s00170-011-3609-7
- [19] G. Kanel. "Dynamic yield and tensile strength of aluminum single crystals at temperatures up to the melting point." *Journal of Applied Physics*, vol. 90, pp.136-143, July 2001, doi: 10.1063/1.1374478

Özgeçmiş**Osman ÜNAL**

1992 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini İTÜ Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği'nde tamamlamıştır. İlgi alanına giren araştırma konuları Sayısal Analiz ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğidir.

E-Posta: osman92unal@gmail.com

**Nuri AKKAŞ**

Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümünde doçent olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları kaynaklı imalattır.

E-Posta: nuriakkas@subu.edu.tr

**Ahmet Taner SARIHAN**

1980 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini İTÜ Makina Mühendisliği'nde tamamlamıştır. ODTÜ'de Uluslararası kaynak Mühendisliği diplomasını almıştır. TÜRASAS Genel Müdürlüğü Sakarya Bölge Müdürlüğünde çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları demiryolu araç tasarım ve kaynaklı imalattır.

E-Posta: ahmettaner.sarihan@turasas.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.

Ekler

```
tic; clc; clearvars;
tt=3;%Total simulation time(second)
dt=0.1;%Time interval(second)
thickness=0.003;%(meter)
rn=10;%Row number
dr=0.01;%Row interval(meter)
R=dr/2:dr:rn*dr-dr/2;%Row distance
cnlnn=40;%Column number
dc=0.01;%Column interval(meter)
C=dc/2:dc:cnlnn*dc-dc/2;%Column distance
k=167;%Thermal conductivity: W/(m.K) = W/(m.)
rc=2.7*10^6*0.9;%g/m3 * J/(g.K) = J/(m3.K)= J/(m3.°C)
h=10;%Convective heat transfer coefficient: W/(m2.K) = W/(m2.°C)
H=h*2*(dr+dc)/dr/dc;
Te=20;%Ambient(environment) temperature(°C)
Tp(1:rn,1:cnlnn)=20;%Initial condition(°C)
Tb=20;%Boundary condition(°C)
Corrn=1.28;
VI=21.8*186*Corrn;%Volt*Amper
E1=VI/thickness/dr/dc;%Heat generation(W/m3)
E2=E1/2;%Heat generation(W/m3)
%Numerical Solution
A=zeros(rn*cnlnn,rn*cnlnn); B=zeros(rn*cnlnn,1);
for t=1:tt/dt%Time iteration
q=zeros(rn,cnlnn);
q(rn/2,cnlnn/10-1+t)=E2; q(rn/2,cnlnn/10+2-1+t)=E1;
for r=1:rn
```

```

for c=1:cnl1nn
if r==1 && c==1
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==1 && 1<c && c<cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-2*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==1 && c==cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif 1<r && r<rn && c==1
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-2*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif 1<r && r<rn && 1<c && c<cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-2*k/dr^2-2*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif 1<r && r<rn && c==cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-2*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==rn && c==1
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==rn && 1<c && c<cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-2*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==rn && c==cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
end
end
end
T=sparse(A)\sparse(B);
i=1;
Tn=zeros(rn,cnl1nn);
for a=1:rn
for b=1:cnl1nn
Tn(a,b)=T(i);
i=i+1;
end
end
end
Tp=Tn;
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
[X,Y]=meshgrid(C,R);
contourf(X,Y,Tn, 'ShowText', 'on')
colormap(jet)
axis equal
xlabel('Column(meter)', 'fontsize', 16)
ylabel('Row(meter)', 'fontsize', 16)
legend('Temperature(°C)')
title(sprintf('2D Sim: time=%1.1f second', t*dt), 'fontsize', 16)

```



```
pause (0.001)  
end  
toc
```

Matlab dosyalarına ulaşmak için lütfen aşağıdaki Google Drive bağlantısını kullanınız:
<https://drive.google.com/drive/folders/1kAzkMeu3HxIBFbwmskgWlwGqJjCUXKUn?usp=sharing>

**Pantograf Boynuz Hatalarının Derin Öğrenme ve Görüntü İşleme Teknikleri ile Tespiti**

Mahmut Ömer BAŞTÜRK^{*}, Veysel YÜKSEL, Yusuf Engin TETİK,
Mehmet YILMAZ, Mustafa GÜNER, Tolgahan KAYA

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

**mahmut.basturk.d@tubitak.gov.tr.*

(Alınış/Received: 17.06.2022, Kabul/Accepted: 06.07.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Görüntüler üzerinden hata ve anomalilerin otomatik tespiti, özellikle demiryolu taşımacılığı için kestirimci bakım uygulamalarında gün geçtikçe daha fazla yer bulmaktadır. Geleneksel bakım teknikleri, trenler için tam olarak güvenilemeyecek manuel çözümler içerirken; günümüzde görüntü işleme sayesinde daha sağlam çözümler üretilmektedir. Bu sayede bakım maliyetleri ve bakım süreleri de azalmaktadır. Trenler uzun mesafeler kat ettiğinden, trendeki sistemlerin yol boyunca zarar görmesi çok olasıdır. Hasar görme riski yüksek olan bu sistemlerden bir tanesi de pantograf-katener sistemidir. Pantografin katener ile temas eden bölgesi karbon şerittir ve katener sistemdeki elektriği trene iletmeye sebebiyle trene bağlı bileşenlerden en önemlilerinden bir tanesidir. Bu öneminden dolayı, karbon şeridi ağaç dalları gibi hasar verebilecek dış etkenlerden korumak için pantograf boynuzlarına ihtiyaç vardır. Karbon şerit yerine pantograf boynuzları hasar gördüğü için pantograf boynuzlarının bakıma ihtiyacının olup olmadığının bilinmesi önemlidir. Hasarlı boynuzların tespiti, görüntü işleme ve derin öğrenme tekniklerinden yararlanılarak otomatik olarak yapılabilir. Bu çalışmada, farklı çevresel koşullarda farklı hatalara sahip olan ve olmayan pantograf boynuzlarını içeren 34 adet simülasyon videosu oluşturulmuştur. Bu videolardan elde edilen kareler ayrı ayrı işlenmiştir. Temel görüntü işleme teknikleri sayesinde pantograf dışındaki arka plan nesneleri kaldırılmış, derin öğrenme modeli ile pantograf boynuz bölgeleri tespit edilmiş ve evrişimli sinir ağı sayesinde bir boynuzun hatalı olup olmadığı sınıflandırılmıştır. Oluşturulan metod ile bir pantograf boynuzunun hatalı veya sağlıklı olmasına %95,36 oranında doğru karar verilmektedir. Yüksek doğrulukla çalışan bu yeni yöntem, pantograf boynuz analizi üzerine literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Pantograf boynuzu, Görüntü işleme, Arka plan çıkarma, Sınıflandırma, Evrişimli Sinir Ağı

Detection of Pantograph Horn Defects Based on Deep Learning and Image Processing

Abstract: Automated anomaly and defect detection via images finds its place more and more in predictive maintenance applications, especially for rail transport. While traditional maintenance techniques include manual solutions that cannot be fully trusted for trains, today more robust solutions are produced thanks to image processing. In this way, maintenance costs and maintenance times are also reduced. Because trains travel long distances, it is quite possible for systems on the train to be damaged along the way. One of these systems with a high risk of damage is pantograph-catenary systems. The part of the pantograph that contacts the catenary is carbon strip which receives electricity from catenary and transmits it to the train. Therefore, pantograph horns are needed to protect the carbon strip from damaging external factors such as tree branches. It is important to know if the pantograph horns need maintenance or not since they are damaged instead of carbon strips. Detection of damaged horns can be realized using image processing and deep learning techniques. In this study, 34 simulation videos containing pantograph horns with and without defects in different environmental conditions were created. Obtained frames from these videos are processed separately. Thanks to image processing, background objects other than the pantograph were removed, pantograph horn regions were detected with the deep learning model, and the horn was classified as healthy or defected via convolutional neural network. With the created method, 95.36% correct decision is made whether a pantograph horn is faulty or healthy. This new method, which works with high accuracy, makes an important contribution to the literature on pantograph horn analysis.

Atıf için/Cite as: M.Ö. Baştürk, V. Yüksel, Y.E. Tetik, M. Yılmaz, M. Güner, T. Kaya "Pantograf boynuz hatalarının derin öğrenme ve görüntü işleme teknikleri ile tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 102-115, July, 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1132123

Keywords: Deep learning, Pantograph horn, Image processing, Background subtraction, Classification, Convolutional Neural Network

1. Giriş

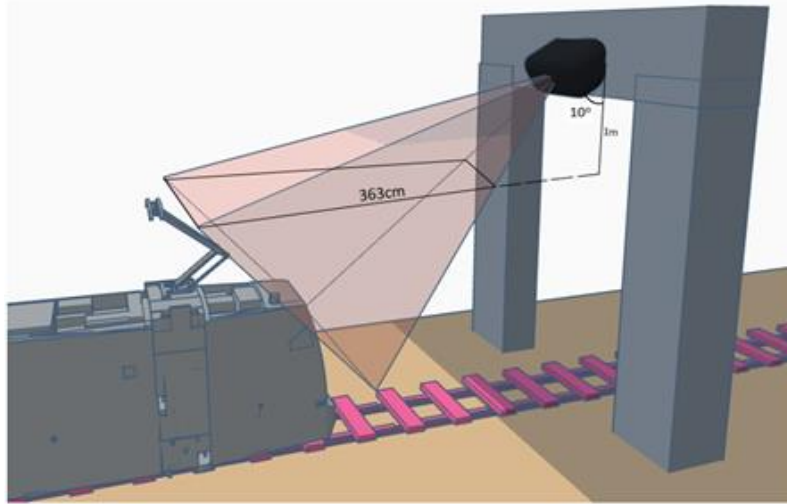
Tren bileşenlerindeki arızaların erken tespiti ve ilgili parçalarda meydana gelmesi muhtemel daha büyük sorunların ortaya çıkmadan müdahale edilebilmesi kestirimci bakım açısından kritik bir uygulamadır. Trenlerde büyük bir soruna neden olabilecek en kritik bileşenlere örnek olarak pantograf verilebilir. Pantograflar elektriği trene iletmek için katener sistem ile temas eden yapılardır. Pantograf, içinde birkaç alt yapıdan oluşan genel bir isimdir. Bu çalışmada üzerinde durulan kısımlar daha çok pantograf karbon şeridi ve ana konu olan pantograf boynuzlarıdır. Katener telindeki elektrik, pantograf karbon şeridi ve katener telinin sürtünmesi yoluyla trene iletilir. Meydana gelen sürtünme sebebiyle karbon şerit üzerinde aşınmalar gerçekleşir ve bu aşınmaların boyutlarının çikartılması da başka bir önemli araştırma konusudur [1-3].

Tren seyahat ederken pantografin karbon şeridinin ağaç dallarından zarar görme riski çok yüksektir. Eğer karbon şerit çok fazla hasar görür ise katenerden trene giden elektrik kesintiye uğrayabilir. Bu durumu önlemek için pantograf boynuzları kullanılır. Pantograf boynuzları, pantografin her iki ucundaki kıvrımlı yapılardır ve karbon şeridi ağaç dalları gibi dış etkilerden korumak amacıyla pantografa yerleştirilirler. Pantograf boynuzuna temas eden dış etkiler, pantograf boynuzlarında eğilme ve kırılma gibi hasarlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle, pantograf boynuzlarının incelenmesi, önleyici bakım adına bir gerekliliktir.

Pantograf boynuzlarının görüntü tabanlı incelenmesinden önce muayene işlemi; tren, istasyonda durduğunda görevli personelin trenin üzerine çıkıp göz ile muayene yapmasıyla gerçekleştirilir. Bu yöntemin dezavantajları, muayene işleminin yalnızca tren durduğunda gerçekleştirilebilmesi ve trenin çatısında yapılması sebebiyle görevli personelin hayatının riske atılmasıdır. Görüntü tabanlı yaklaşımlar, pantograf boynuzları için daha güvenli ve güvenilir sonuçlar üretebilmektedir. Ek olarak bu sistemlerin kurulumu da kolaydır [4]. Görüntü tabanlı yaklaşımda, katener sistem ile pantograf karbon şeridinin temas noktasının bulunması, pantograf muayenesi, pantograf arıza tespiti ve pantograf boynuz tespiti gibi farklı amaçlar için farklı yöntemler ve farklı algoritmalar kullanılmaktadır. Karaköse ve diğ. pantograf kontak şeritleri ile katener kontak tellerinin etkileşimi ile oluşan pantograf yüzeyindeki kontak noktası bölgelerini, görüntü işleme tabanlı algoritmalar ile izlenerek arızaların tespitini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada pantograf ve katener telinin algılanmasında kenar tespiti ve Hough dönüşümü tekniklerini kullanmışlardır [5]. Dong Li, pantograf aşınmasının temassız izlenmesi için etkili bir stereo tabanlı yöntem önermiştir. Bu çalışmada pantograf karbon şerit ve boynuzdaki bozuklukları nokta-bulut karşılaştırma yöntemi ile tespit etmektedirler [6]. Yao ve diğ., pantograf aşınması ve duruş tespiti için görüntü tabanlı bir çevrimiçi izleme sistemi gerçekleştirmiştir. Bu sistemde de pantograf boynuzları Hough dönüşüm algoritması yardımıyla tespit edilmiştir [7]. Yaman ve diğ. pantograf katener sistemlerinden alınan görüntüler kullanılarak pantograf sisteminin geometrik modelini oluşturup, hangi tür pantograf olduğu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada pantograf tespiti için Hough dönüşümü ve bulanık mantık tekniklerini birlikte kullanmışlardır [8]. Benzer şekilde Karaköse ve diğ., pantograf katener sistemlerde görüntü işleme tekniklerini kullanarak ark tespitini yapmışlardır [9]. Bu çalışmada kenar bulma algoritmalarından eşikleme metotlarına kadar birçok yöntem kullanmışlardır. Görüldüğü üzere pantograf-katener sistemleri ile ilgili yapılan bu çalışmalarda temel görüntü işleme tekniklerinden derin öğrenmeye kadar birçok farklı metot geliştirilmiştir. Ancak, son araştırmalar, derin öğrenme ve makine öğrenimi modellerinin daha sağlam olduğunu ve güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Zhang ve diğ., Derin Evrimsel Ağ'a dayalı sağlam bir pantograf-katener etkileşim durumu izleme sistemi geliştirmişlerdir [10]. Chang ve diğ., pantograf boynuzlarının tespit edilmesi için SSD obje algılama yöntemini kullanmışlardır [11]. Shen ve diğ. tren açık havada uzun süreli operasyonda yüksek hız ve istikrarlı durum analizi gerçekleştirmek için parametre uyarlamasına dayalı pantograf ve katener sistem

durumunun çevrimiçi algılanması üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada pantograf boynuzlarının algılanması için RefineDet makine öğrenimi modeli kullanılmıştır [12].

Bu çalışma, gerçekleştirilmesi planlanan pantograf denetleme sisteminin simülasyon ortamında oluşturulup pantograf boynuzunun sağlıklı veya kusurlu olmasına nasıl karar verileceğini incelemek adına yapılmıştır. Kamera açısı ve kameranın pantograf boynuzuna olan mesafesi gerçekte kurulabilecek bir sistem için hesaplanmış ve Unity’de simüle edilmiştir. Bu çalışmada maksimum 30 km/saat hız ile seyahat eden trenlerin pantograf boynuzlarının muayenesi planlanmıştır. Pantograf denetleme sistemi seçilen bir tren istasyonunun giriş veya çıkışına konulabilecektir. Bu sistem ile belirtilen hızda ilerleyen trenler için pantograf boynuzlarındaki hataların tespitinin yapılabilmesi mümkün olacaktır. Yüksek hızlarda muayene gereken sistemlerde kamera ve uygun lens seçimi büyük önem arz etmektedir. Yüksek hızlarda çalışan sistemlerin muayenesinde veri toplama için kullanılan kameraların saniye başına toplayabileceği görüntü sayısı (FPS) yüksek olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan kamera, açılı yerleştirilmiş ve pantograf sistemini yukardan görecektir şekilde ayarlanmıştır. Kamera, pantograf sisteminden dikeyde 1 metre yüksekliğe, 10 derece açı ile yerleştirilmiştir, bu sayede daha büyük bir görüş alanı elde edilmiştir. Şekil 1’de kamera görüş açısı ve simülasyon ortamında gerçekleştirilen sistemin temsili görülebilir.



Şekil 1. Kamera ve görüş alanı

Açılı bir şekilde yerleştirilen kamera sayesinde oluşturulacak bu büyük görüş alanında trenin geçişi esnasında 1000 kare toplanması hedeflenmiştir. Bu çalışmada 2295 saniye başına kare hız ve 1920x1080 çözünürlükte bir kamera kullanılmıştır. 30 km/saat hızda giden bir tren için 2295 saniye başına kare hızda çalışan bir kamera kullanıldığında 1000 kare toplayabilmek için olması gereken görüş alanı Denklem 1’deki gibi hesaplanıp 3,63 m olması gerektiği bulunmuştur. Burada V tren hızını, FS analiz için hedeflenen kare sayısını, FPS kamera görüntü toplama hızını ve Y görüş alanını temsil etmektedir.

$$Y = \frac{V \left(\frac{\text{metre}}{\text{saniye}} \right) FS}{FPS} \quad (1)$$

Bu görüş alanını elde edebilmek için kameranın koyulması gereken açı Denklem 2’deki gibi hesaplanmıştır.

$$\beta = \frac{S}{2F} \quad (2)$$

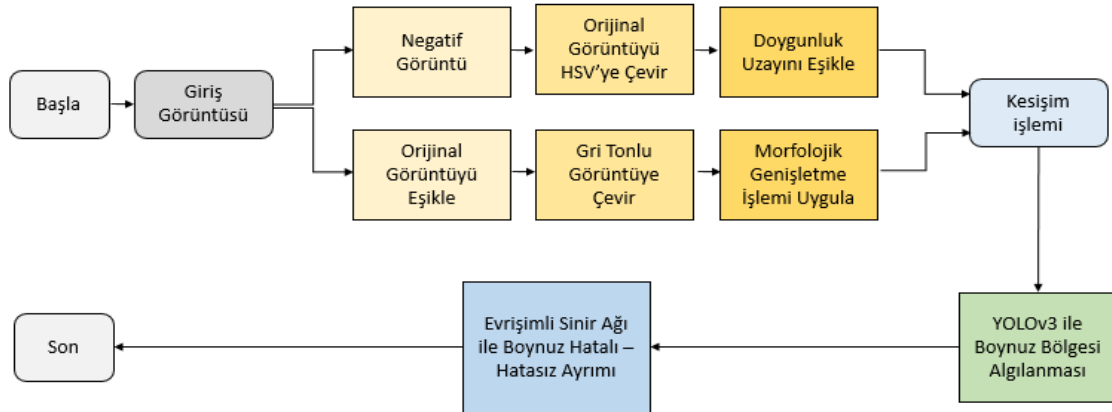
$$a = \tan \left(\sqrt{\frac{\frac{y}{h} - 2\beta}{2\beta + \frac{y}{h}\beta^2}} \right) - \tan^{-1}(\beta) \quad (3)$$

Burada α kamera açısını, Y görüş alanını, h kameranın pantograftan yüksekliğini, S kamera sensör genişliğini ve F odak uzaklığını gösterir.

Bu çalışmada, bir pantograf denetleme sistemi fiziksel dünyada gerçekleşmeden önce aynı sistemin simülasyon ortamında gerçekleştirilmesi yapılmış ve sağlıklı ve kusurlu olarak hazırlanan farklı pantograf boynuzlarına ait videoların görüntü işleme, derin öğrenme ve Evrişimli Sinir Ağları (ESA) modellerinin kademeli olarak kullanımı ile pantograf boynuzunun sağlıklı veya kusurlu şeklinde sınıflandırılabilmesi için bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin görüntü işleme ile arka plan çıkarma, önceden eğitilmiş bir YOLOv3[10] modeli ile pantograf boynuz bölgelerinin tespiti ve tasarlanan bir ESA modeli ile pantograf boynuzlarının sağlıklı veya kusurlu olarak sınıflandırılması olmak üzere üç aşaması vardır. Bu makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Kısım II, önerilen yöntemin detaylı açıklaması; Kısım III, simülasyon videolarında koşturulan yöntemin sonuçları; Kısım IV, sonuçların yorumlanması ve değerlendirme şeklindedir.

2. Metot

Pantografin ve arka planın bütün olarak görülebildiği ham giriş görüntüleri incelenerek öncelikle herhangi bir ön işlem yapılmadan pantograf boynuzlarının tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Pantograf boynuzunu bütün resimde öne çıkaran iki temel ayırt edici öznelik bulunmaktadır: siyaha yakın bir renk tonunun olması ve pantografin iki ucunda kıvrımlı yapıda olması. İlk denemelerde pantograf boynuz tespiti üzerine yoğunlaşıp bir sonuç üretmek üzere odaklanılması gereken noktalar olarak bu özneliklerin bulunması amaçlanmıştır. Bu aşamada SIFT[14] ile söz konusu ayırt edici özelliklerin tespiti ile nesne tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Bu deneme arka planın çok karmaşık olması sebebi ile başarılı olmamıştır. Benzer şekilde ham görüntü üzerinde YOLOv3 ve Unet[15] gibi nesne tespitinde sıklıkla kullanılan ESA tabanlı derin öğrenme modelleri koşturulmuş olmasına rağmen boynuz bölgeleri istenilen oranda başarıyla tespit edilememiştir. Bu nedenle, pantograftan arka plan görüntüsünün çıkarılması denenmiştir ve bu çalışmada önerilen yöntem bu temeller üzerine kurulmuştur. Önerilen yöntem, arka plan çıkarma (görüntü işleme), tespit (derin öğrenme) ve karar (evrişimli sinir ağı) olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemle ait akış diyagramı Şekil 2’de görülebilir.



Şekil 2. Algoritma akış diyagramı

2.1. Veri seti

Geliştirilen algoritmaları çalıştırmak ve test etmek amacıyla Unity programında simülasyon modelleri ve bu modellerden 34 adet simülasyon veri seti oluşturulmuştur. Simülasyon modellerinde TCDD'nin sıklıkla kullandığı E68000 elektrikli lokomotiflerinde kullanılan, Tip 1600 pantograf modeli kullanılmıştır. Tip 1600 pantograf modeli, hızlı tren ve metro hatları dışında kalan “ana hat” diye ifade edilen hatlarda kullanılan modellerden biridir. Simülasyonlarda, tren yaklaşık 30 km/h saat hızla ilerlerken, pantograf, kendisinden yaklaşık 1 metre yüksekliğe yerleştirilmiş ve düşeyle 45 derece açı yapan 2295MP bir kamera ile gözlemlenmiştir. Simülasyon ortamı, geliştirilen algoritmaların çalışırılığının görülebilmesi amacıyla farklı çevresel koşulları (güneş açısı, zemin vs.) içerecek şekilde oluşturulmuştur. Daha sonra pantograf boynuzlarında en sık görülen hatalara bakılarak Blender üç boyutlu yapı modelleme programında pantograf boynuzlarında bükülme ve kırılma gibi farklı türde kusurlar oluşturulmuştur. Son olarak, videolar, sağlam bir veri seti oluşturmak için rastgele ortamlar ve farklı kusurların kombinasyonu ile kaydedilmiştir. Farklı pantograf boynuz kusurlarına sahip simülasyon videolarından toplanan görüntü örnekleri Şekil 3'te görülebilir.

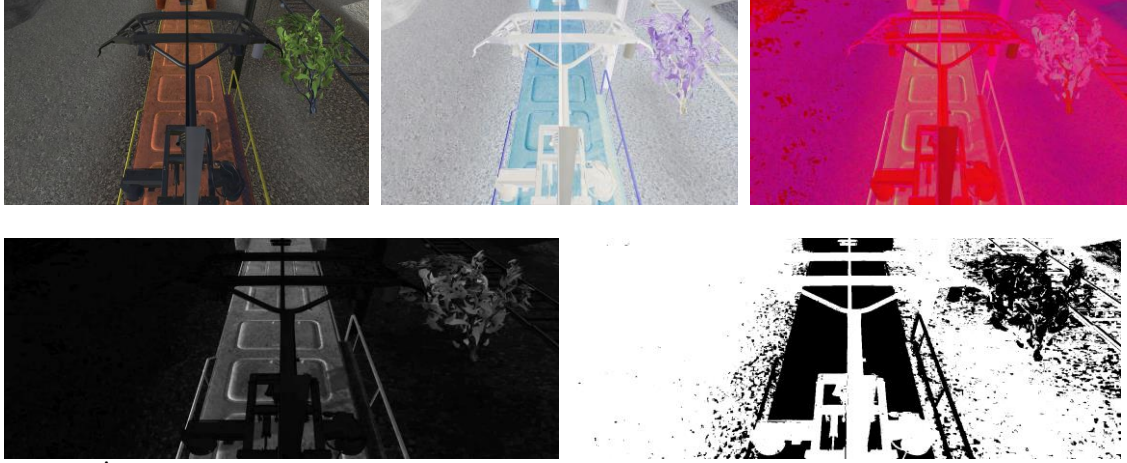


Şekil 3. Simülasyon verilerinden alınan farklı görüntü örnekleri

2.2. Aşama I: Arka plan çıkarma – görüntü işleme

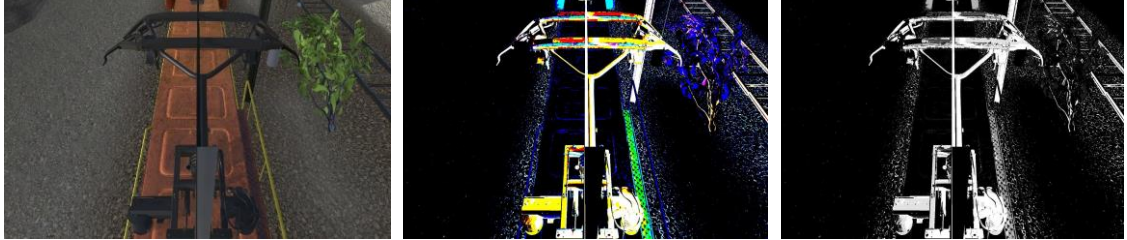
Arka plan çıkarma aşamasında, pantografin bütün olarak arka plandan ayrıştırılabilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu kısımda yalnızca temel görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Pantografin renk özneliğine odaklanılarak arka planı çıkarılmış görüntü elde edilmiştir. Başarılı bir arka plan çıkarılmış görüntü elde etmek için aynı orijinal giriş görüntüsü Şekil 2'deki algoritma akış diyagramında da görülebileceği gibi iki farklı kolda farklı işlemler uygulanarak işlenmiştir. Daha sonra iki farklı kolda elde edilen çıktı görüntülerinin kesişimi alınarak birkaç görüntü dışında yalnızca pantografin görülebildiği çıktı görüntüsü elde edilmiştir.

İlk koldaki görüntü işleme kısmında, orijinal görüntünün negatifi alınır ve kırmızı-yeşil-mavi (*eng. RGB*) renk uzayından ton-doygunluk-değer (*eng. HSV*) renk uzayına geçilir. Doymunluk-ton-değer görüntüleri ayrı ayrı incelendiğinde doymunluk görüntüsünün siyah renkli cisimlerin oldukça iyi ayrıştırıldığı anlaşılmıştır. Bu sebeple doymunluk görüntüsünde siyah tonlara eşikleme uygulanarak ilk kola ait çıktı görüntüsü elde edilmiştir. İlk görüntü işleme koluna ait her bir adımdaki çıktı görüntüsü ise Şekil 4'te görülebilir.

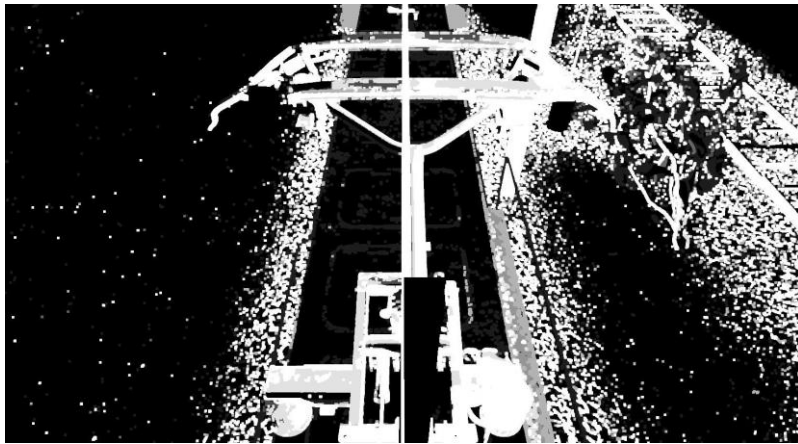


Şekil 4. İlk görüntü işleme kısmındaki çıktı görüntüleri a) Orijinal görüntü b) Negatif görüntü c) HSV renk uzayı görüntüsü d) S uzayı görüntüsü e) Eşiklenmiş görüntü

İkinci koldaki görüntü işleme kısmında, orijinal görüntü direkt olarak eşiklenir. Buradaki eşiklemenin amacı çok parlak renkli olan nesnelere görüntüden kaldırmaktır. Daha sonra eşiklenmiş kırmızı-yeşil-mavi renkli görüntü gri seviyeli görüntüye çevrilir. Eşikleme sonrası bazı objelerde yerel boşluklar oluşabilmektedir. Bu sebeple morfolojik genişleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemler sonrasında daha çok parlak renkli objeler görüntüden kaldırılmış ve pantografin bütünü büyük oranda elde edilmiştir. İkinci kolda yapılan her bir işlem sonrası elde edilen çıktı görüntüleri Şekil 5'te görülebilir. Şekil 6'da ise en son morfolojik genişleme işlemi sonrası elde edilen görüntü görülebilir.



Şekil 5. İkinci görüntü işleme kısmındaki çıktı görüntüleri a) Orijinal görüntü b) Eşiklenmiş RGB görüntü c) Gri seviyeye dönüştürülmüş görüntü



Şekil 6. Genişletme işlemi çıktısı

Birinci ve ikinci kısımdaki görüntü işleme adımları tamamlandığında, oluşan iki adet çıktı görüntüsünün kesişimi alınarak tek bir görüntü oluşturulur. Bu görüntüde pantografin bütün hali arka plandan ayrıştırılmış şekilde elde edilir. Bununla birlikte bazı arka plan nesnelere de görüntüler şeklinde gözükmetedir. Elde edilen çıktı görüntüsü Şekil 7’de görülebilir.

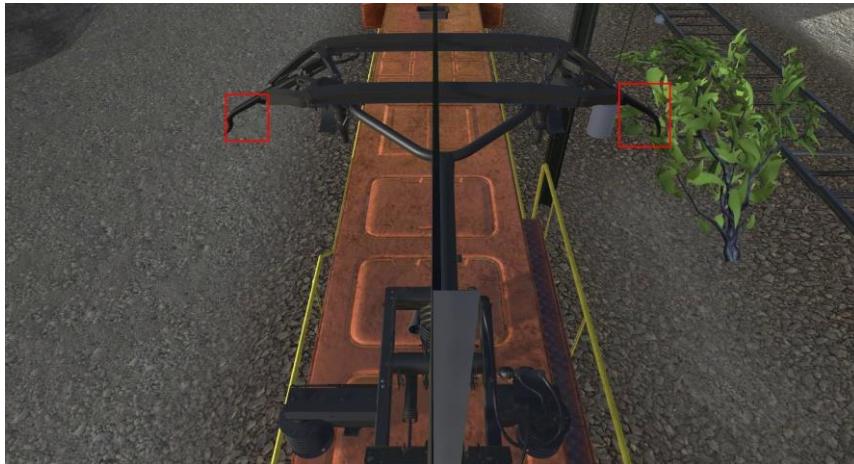


Şekil 7. Kesişimi alınmış görüntü

2.3. Aşama II: Tespit – derin öğrenme

Tespit aşamasında, arka plan çıkarma işlemi sonrasında oluşturulan çıktı görüntüsü YOLOv3 derin öğrenme modeline verilerek boynuz bölgelerinin tespiti sağlanır. Bu aşamada sağlıklı ve kusurlu ayrımı yapmaksızın pantograf boynuzlarının hepsinin bulunması amaçlanmaktadır. Modelin eğitimi için simülasyon videolarındaki görüntüler arka planları çıkartılmış şekilde ayrı olarak kaydedilmiştir. Bu görüntüler üzerinde yalnızca boynuz bölgelerinin olduğu kısımlar sınırlayıcı kutular içerisinde alınarak etiketlenmiştir. Bu aşamada tek sınıflı bir nesne tespit işlemi yapılmıştır. Eğitimde toplamda hatalı ve hatasız olacak şekilde 6996 adet görüntü üzerinde eğitim yapılmıştır. Eğitim 620. iterasyonda erken sonlandırma ile durdurulmuş ve model ortalama kayıp değeri yüzde 0,24 olarak sonuçlanmıştır.

Doğrulama işlemi için 870 adet görüntü kullanılmış ve model 870 adet görüntü ile test edilmiştir. Model başarıyla eğitilmiş ve test görüntülerindeki pantograf boynuz bölgelerini ayırt edebilmiştir. Aşağıdaki Şekil 8’de örnek bir tespit algoritması çıktısı görülebilir.



Şekil 8. YOLOv3 ile tespit edilen boynuzlar

2.4. Aşama III: Karar – Evrişimli Sinir Ağı (ESA)

Karar aşamasında pantografin sağlıklı veya kusurlu şeklinde sınıflandırılması gerçekleştirilir. Tespit aşaması sonucunda bir simülasyon videosundaki her bir görüntü üzerindeki iki adet pantograf boynuzu tespit edildiğinden bahsedilmiştir. Bulunan pantograf boynuzları sınırlayıcı kutular ile konumlandırılır. Bu konumlar orijinal görüntü üzerinden bulunur ve yalnızca boynuzların olduğu görüntüler elde edilir. YOLOv3 ile tespit edilen sağ ve sol pantograf boynuzlarına ait kırmızı-yeşil-mavi renkli görüntüler ayrı bir dosya üzerinde kaydedilmiştir. Aşağıdaki Şekil 9’da örnek çıktılar görülebilir.



Şekil 9. Tespit edilen pantograf boynuzları

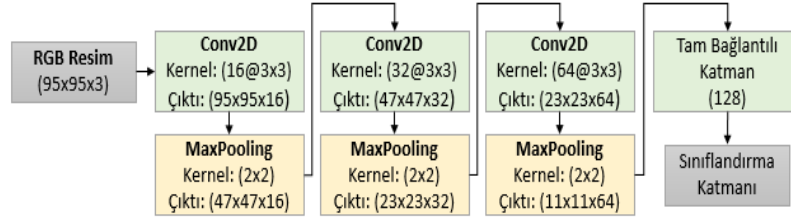
Bu işlem sonucunda toplamda 7804 adet boynuz tespit edilmiştir. Bu boynuzlar hatalı boynuz simülasyonlarından gelenler için hatalı boynuzlar klasöründe; hatasız boynuz simülasyonlarından gelenler için hatasız boynuzlar klasöründe tutulmuştur. Buradan da anlaşılacağı üzere iki sınıflı bir problem elde edilmiştir. Toplamda elde edilen 7804 adet boynuz görüntüsünün %10’u doğrulama ve %10’u test veri setlerini oluşturmak için ayrıştırılmıştır. Buna göre 6244 adet eğitim, 780 adet doğrulama ve 780 adet test verisi elde edilmiştir. Eğitim verilerindeki 6244 adet boynuz görüntüsü üzerinde veri artırma işlemi gerçekleştirilmiş ve 130994 adet eğitim verisi oluşturulmuştur.

Boynuzların sınıflandırılabilmesi için ESA tabanlı bir derin öğrenme modeli oluşturulmuştur. ESA, derin öğrenme modellerinde sıklıkla kullanılan, çok küçük özneteliklerden çok büyük özneteliklere kadar bütün öznetelikleri adaptif şekilde öğrenebilen bir algoritmadır. Genel olarak bir ESA algoritması bir giriş katmanı, birkaç adet evrişim ve ortaklama katmanlarından, tam bağlantılı katmanlardan ve bir çıkış katmanından oluşur. ESA algoritması sayesinde görüntüler üzerinden nesne tespiti yapmak mümkündür. Bu çalışmada ESA ile bir pantograf boynuzunun hatalı veya sağlıklı olmasının sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen eğitim verilerindeki boynuz görüntülerinden yararlı öznetelikler çıkartmak için evrişim katmanları kullanılır. Bu katmanlarda öznetelik çıkarma işlemi belirlenen filtre (kernel) sayısı kadar yapılır. Evrişim katmanlarının derinliği kullanılan evrişim filtre sayısı ile tanımlanır. Görüntülerdeki öznetelikler, filtrelerin orijinal görüntü ile korelasyonunun alınması sonucu elde edilir. Elde edilen korelasyon görüntüsü doğrusal olmayan bir fonksiyon ile çarpılır. Sonuçta ise öznetelik haritası verilen bir katman elde edilir. Ortaklama katmanları evrişim katmanlarından

sonra kullanılır ve elde edilen öznelik haritalarını birçok dikdörtgen kernel oluşturacak şekilde bölerek alt örnekleme yapar. Ortaklama işlemi, öznelik haritasının boyutunu küçültme olarak da bilinir ve kernel'lerin maksimum değerini bularak yapılabilir. Bu işleme maksimum ortaklama denirken benzer şekilde kernel'lerin ortalama değerini bularak ortalama ortaklama yapılabilir. Ortaklama işlemi sayesinde boyut küçültmesi sağlandığı için işlem süresi düşer ve modelin aşırı uyum (*eng. Overfitting*) olma ihtimalini azaltır. ESA mimarisinin son aşamasında tam bağlantılı (*eng. Fully-connected*) katmanlar bulunur. Bu katmanlarda daha önceden elde edilmiş 2 boyutlu öznelik haritaları yan yana eklenerek 1 boyutlu vektöre dönüştürülür. Elde edilen 1 boyutlu vektör üzerinde daha sonrasında bir yapay sinir ağı uygulanarak sınıflandırma veya regresyon işlemi gerçekleştirilir. En son katmanda sınıflandırma işlemi iki sınıflı bir problem olmasından dolayı "ikili çapraz entropi" (*eng. Binary Cross Entropy*) kullanılmış ve sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada eğitim seti için ayrılmış olan pantograf boynuzlarının sağlıklı veya kusurlu olarak sınıflandırılması için bir ESA modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan model Şekil 10'da görülebilir.



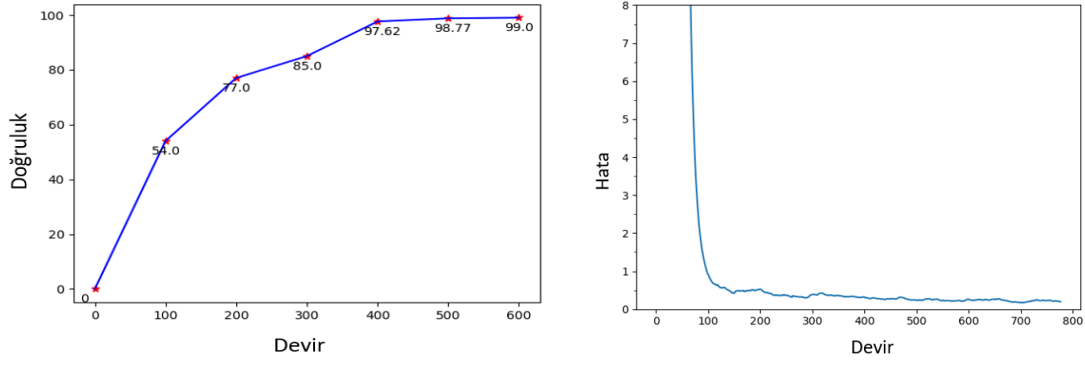
Şekil 10. Oluşturulan evrişimli sinir ağı yapısı

ESA modelinin girişine verilmeden önce bütün görüntüler aynı boyutta olmaları için 95x95 olarak ölçeklendirilmiştir. Önerilen model birkaç evrişim katman ve buna bağlı ortaklama katmandan oluşmaktadır. En sonda ise 1 adet tam bağlantılı katman ile sınıflandırma yapılır. Kurulan modelin ilk evrişim katmanında 16 adet filtre 3x3 boyutunda kernel boyutuyla hesaplanır. Dolgu (*eng. Padding*) "aynı" (*eng. Same*) olarak seçilmiştir. Bunun anlamı evrişim işlemi sonrasında orijinal resmin boyutu aynı kalacaktır. Böylelikle giriş görüntüsündeki bütün elemanlara filtre uygulanmış olacaktır. Evrişim işlemi sonucunda elde edilen çıkış hala doğrusal bir davranış sergilemektedir. Doğrusal olmayan hale getirmek için görüntüye her evrişim işlemi ile birlikte doğrultulmuş lineer birim aktivasyon fonksiyonu (*eng. ReLU*) uygulanır. Benzer şekilde her evrişim işleminden sonra 2x2 boyutunda maksimum ortaklama uygulanır. En son evrişim ve maksimum ortaklama işleminden sonra bir adet tam bağlantı katmanı bulunmaktadır. Elde edilen çıktılar düzleştirilerek sınıflandırma işlemi için uygun bir vektör haline getirilir. En son katmanda ise elde edilen vektör, bir sigmoid fonksiyonuna verilerek giriş görüntüsünün hangi sınıfa ait olduğu en yüksek olasılık değerine göre belirlenir.

3. Bulgular

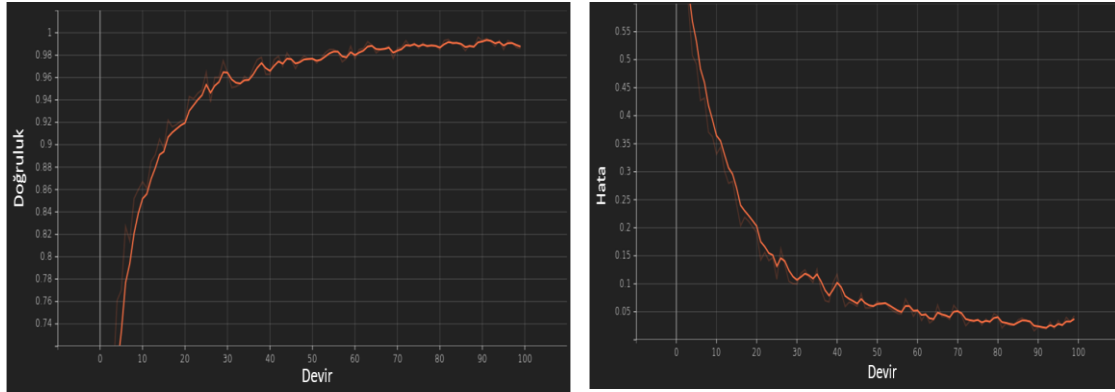
Bu çalışmada önerilen yöntem, görüntü işleme ile arka plan nesnelere çıkarılması ve ESA tabanlı modeller ile bir pantograf boynuzunun tespit edilip sağlıklı veya kusurlu olduğuna karar vermek için kullanılmaktadır. Derin öğrenme adımıdaki YOLOv3 modeli Darknet53 çerçevesiyle uygulanmıştır. Karar aşamasındaki tasarlanan ESA modeli ise Tensorflow çerçevesiyle uygulanmıştır. İki model de NVIDIA Tesla K80 ekran kartı kullanılarak eğitilmiştir.

Tespit aşamasında kullanılan YOLOv3 modelinde 620 devir yapılmıştır ve öğrenme oranı 0.001 olarak belirlenmiştir. Eğitim işlemi sonucunda oluşan devir-doğruluk ve devir-hata oranları Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Tespit aşamasındaki YOLOv3 modeline ait sonuçlar a) Devir – Doğruluk b) Devir – Kayıp

Karar aşamasındaki modelde optimizasyon yöntemi olarak Adam Optimizer[16] kullanılmıştır ve öğrenme oranı 0.001 olarak belirlenmiştir. İki sınıflı problemde öğrenme aşamasında 100 devir yapılmıştır. Eğitim işlemi sonucunda oluşan devir-doğruluk ve devir-kayıp oranları Şekil 12’de verilmiştir. Geliştirilen model diğer tipik ESA modelleri ile karşılaştırdığında daha iyi sonuç vermektedir. Tablo 1’deki sonuçlardan çıkarılabileceği gibi LeNet-5 mimarisi bu uygulama için çok basit, AlexNet mimarisi ise karmaşıktır.



Şekil 12. Karar aşamasındaki ESA modeline ait sonuçlar a) Devir – Doğruluk b) Devir – Kayıp

Tablo 1. Önerilen yöntemin diğer ESA algoritmalarına göre performans karşılaştırması

	Geliştirilen Model	LeNet-5	AlexNet
Doğruluk (%)	94,26	72	81
Kayıp(%)	0,02	0,40	0,13

Karar aşamasında oluşturulan model bir pantograf boynuzunun hatalı olup olmamasına karar verir. Burada ikili bir sınıflandırma olduğu için sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Modele verilen görüntü çıktısı eğer 0 değerine sahip ise hatalı, 1 değerine sahip ise sağlam pantograf boynuzu anlamına gelmektedir. Test görüntüleri üzerindeki eşleştirmelerden elde edilen karmaşıklık matrisi sonucu Şekil 13’te verilmiştir.

Gerçek	Sağlıklı	329	32
	Kusurlu	20	742
		Sağlıklı	Kusurlu
		Tahmin	

Şekil 13. Karmaşıklık matrisi

Karmaşıklık matrisi doğruluk, duyarlılık, özgünlük ve F1 değerlerinin çıkarılması için kullanılan bir araçtır. Bu değerleri hesaplamak için kullanılan denklemler aşağıdaki şekilde sırasıyla verilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + YN + YP + DN} \quad (4)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (5)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (6)$$

$$F1 = \frac{2DP}{2DP + YP + YN} \quad (7)$$

Tablo 2. Önerilen yöntemin performans sonuçları

Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	F1 (%)
95,36	94,26	91,13	92,67

Önerilen yöntemin performans ölçütlerine göre sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçları mukayese etmek amacıyla literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde literatürdeki çalışma sonuçlarının nicel olarak paylaşılmadığı görülmüştür. Bu çalışmalarda yalnızca pantograf boynuzlarında hata tespitinin yapılabildiğinden bahsedilmiştir. Kullanılan yöntemler ise çoğu çalışmada temel görüntü işleme tekniklerinin ötesine geçmemektedir. Bu çalışmada önerilen yöntem yapay zekâ tabanlı algoritmalar içermektedir. Bu sebeple farklı ortam şartlarında çalışabilen adaptif bir yöntem elde edilmiştir. Bu bakımdan literatürdeki diğer çalışmaların bir adım ötesine geçmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, hareket eden bir tren üzerindeki pantograf boynuzlarının görüntü işleme ve derin öğrenme modeli ile tespit edilip, ESA mimarisi ile hatalı veya sağlıklı şeklinde sınıflandırma işleminin yapılabilmesi için bir yöntem önerilmiştir. Çalışma, gerçek bir düzenek üzerinde oluşturulmadan önce örnek hataların simülasyon üzerinde modellenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu bakımdan simülasyon videolarında bulunan sağlıklı ve hasarlı pantograf boynuz örnekleri; eğitim, test ve doğrulama için ayrıştırılmış ve modellerin eğitimi ve testi için kullanılmıştır. Pantograf boynuzundaki hatanın tespitinden önce pantograf boynuz bölgelerinin bulunması oldukça zorlu bir işlemdir. Farklı hava şartlarında, farklı ışık ortamlarında ve farklı arka planlarla

oldukça zorlu görüntüler elde edilmektedir. Bu sebeple pantografin tespiti direkt olarak bir yapay zekâ algoritması ile bulunamamaktadır. Önerilen yöntemde bu problemi aşabilmek için temel görüntü işleme teknikleri uygulanmış ve arka plan ile pantografin bütünü ayrıştırılmıştır. Daha sonra, pantograf bölgesi YOLOv3 derin öğrenme modeli ile tespit edilmiş ve son olarak tasarlanan bir ESA modeli ile pantograf boynuzunun sağlıklı veya hatasız olarak sınıflandırılması sağlanmıştır.

Oluşturduğumuz test veri setindeki 361 sağlıklı pantograf boynuzunun 329 tanesinin sağlıklı, 762 hatalı pantograf boynuzunun 742 tanesinin hatalı olarak sınıflandırılabilirdiği kanıtlanmış ve nicel değerler olarak gösterilmiştir. Bu sonuçlara dayanarak önerilen yöntemin %95'in üzerinde doğruluk ile çalıştığı ispatlanmıştır. Geliştirilen bu yöntem sağladığı yüksek doğruluk derecesi ile literatüre yeni bir yöntem sunmaktadır. Pantograf denetleme sistemi gerçekleştirildiğinde de önerilen yöntemin sadece gerçek veriler üzerinde eğitilip çalıştırılması ile pantograf boynuz kusurlarının tespiti sağlanabilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma TCDD tarafından desteklenen Otomatik Tren Muayene İstasyonu Geliştirilmesi Projesi kapsamında TÜBİTAK RUTE Robotik ve Akıllı Sistemler Grubu tarafından yapılmıştır. TCDD ve TÜBİTAK RUTE çalışanlarına çalışmaya katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] S. Judek and L. Jarzebowicz, "Algorithm for automatic wear estimation of railway contact strips based on 3D scanning results," *2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 2014, pp. 724-729, doi: 10.1109/ICEPE.2014.6970004.
- [2] E. Di Stefano, C. A. Avizzano, M. Bergamasco, P. Masini, M. Menci and D. Russo, "Automatic inspection of railway carbon strips based on multi-modal visual information," *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2017, pp. 178-184, doi: 10.1109/AIM.2017.8014015.
- [3] L. Jarzebowicz and S. Judek, "3D machine vision system for inspection of contact strips in railway vehicle current collectors," *2014 International Conference on Applied Electronics*, 2014, pp. 139-144, doi: 10.1109/AE.2014.7011686.
- [4] P. Capece et al., "PANTOBOT-3D: An automatic vision-based inspection system for locomotive pantographs," *7th IET Conference on Railway Condition Monitoring 2016 (RCM 2016)*, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2016.1208.
- [5] E. Karaköse, M. T. Gencoglu, M. Karaköse, I. Aydın and E. Akin, "A New Experimental Approach Using Image Processing-Based Tracking for an Efficient Fault Diagnosis in Pantograph-Catenary Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 635-643, April 2017, doi: 10.1109/TII.2016.2628042.
- [6] D. Li, "A high-efficiency method of pantograph collector strip wearing inspection based on stereo vision," *2019 2nd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)*, 2019, pp. 389-392, doi: 10.1109/ICISCAE48440.2019.221659.
- [7] X. Yao, Z. Xing, A. Sheng and Y. Chen, "An Image-Based Online Monitoring System for Pantograph Wear and Attitude," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-12, 2022, Art no. 5013812, doi: 10.1109/TIM.2022.3178466.
- [8] O. Yaman, M. Karaköse, İ. Aydın and E. Akin, "Detection of pantograph geometric model based on fuzzy logic and image processing," *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2014, pp. 686-689, doi: 10.1109/SIU.2014.6830322.
- [9] Karaköse, M. , Yaman, O. , Aydın, İ. & Akin, E. (2017). Pantograf Katener Sistemlerde Görüntü Segmantasyon Tabanlı Adaptif Ark Tespiti . *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi* , 10 (2) , 53-63 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tbbmd/issue/33390/283899>.
- [10] D. Zhang, S. Gao, L. Yu, G. Kang, D. Zhan and X. Wei, "A Robust Pantograph-Catenary Interaction Condition Monitoring Method Based on Deep Convolutional Network," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 5, pp. 1920-1929, May 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2920721.

- [11] L. Chang, Z. Liu and Y. Shen, "On-line Detection of Pantograph Offset Based on Deep Learning," 2018 *IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC)*, 2018, pp. 159-164, doi: 10.1109/OGC.2018.8529918.
- [12] Shen, Yuan and Pan, Xiao and Chang, Luonan, "Online Intelligent Perception of Pantograph and Catenary System Status Based on Parameter Adaptation," *Applied Sciences*, 2021, no. 4, doi: 10.3390/app11041948.
- [13] Q. Chen, L. Liu, R. Han, J. Qian and D. Qi, "Image identification method on high-speed railway contact network based on YOLO v3 and SENet," 2019 *Chinese Control Conference (CCC)*, 2019, pp. 8772-8777, doi: 10.23919/ChiCC.2019.8865153.
- [14] Lowe, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* **60**, 91–110 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- [15] Ronneberger, O.; Fischer, P. & Brox, T. (2015), 'U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation', cite arxiv:1505.04597Comment: conditionally accepted at MICCAI 2015
- [16] D. P. Kingma and J. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization," arXiv [cs.LG], 2014.

Özgeçmiş



Mahmut Ömer BAŞTÜRK

1998'de İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2021 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik mühendisliği bölümünden mezun oldu. Yine 2021 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminin yanında TÜBİTAK RUTE Robotik ve Akıllı Sistemler grubunda görüntü işleme ve yapay zekâ alanlarında çalışmalarına devam etmektedir.

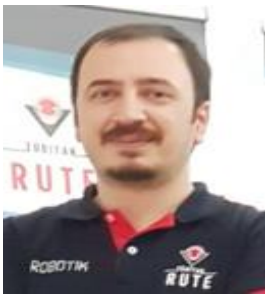
E-Posta: mahmut.basturk.d@tubitak.gov.tr.



Veysel YÜKSEL

1995'de İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2017 yılında İstanbul Arel Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliğinden birinci olarak mezun oldu. Ardından, 2018 yılında Budapeşte'de Stipendium Hungaricum burs programı ile Obuda Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği bölümünde tam burslu yüksek lisans hakkı kazandı. Yüksek lisans eğitimini 2020 yılı sonunda tamamlayıp mezun oldu. Şu an TÜBİTAK RUTE Robotik ve Akıllı Sistemler grubunda görüntü işleme, sinyal işleme ve yapay zekâ alanlarında çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: veysel.yuksel@tubitak.gov.tr.



Yusuf Engin TETİK

1983'te Adıyaman'da doğdu. 2005 yılında Ege Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2009 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde yüksek lisansını, 2014'te ise Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde doktorasını tamamladı. Yazılım geliştirme alanında 15 yılı aşkın iş tecrübesi olmakla birlikte son 6 yıldır TÜBİTAK RUTE Robotik ve Akıllı Sistemler grubunda başuzman araştırmacı olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: yusuf.tetik@tubitak.gov.tr

**Mehmet YILMAZ**

1991’de Bursa’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa’da tamamladı. 2013 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2015 yılında Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği ABD’den mezun oldu. TÜBİTAK RUTE Robotik ve Akıllı Sistemler grubunda sistem dinamiği, modelleme ve kontrol çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: mehmet.yilmaz@tubitak.gov.tr

**Mustafa GÜNER**

1990’ da İstanbul’ da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’ da tamamladı. 2012 yılında Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2019 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Elektronik ABD’den mezun oldu. TÜBİTAK RUTE Robotik ve Akıllı Sistemler grubunda elektronik donanım tasarım alanında yeni nesil sensör geliştirme ve yüksek hızlı karışık sinyal sistemlerin tasarım çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: mustafa.guner@tubitak.gov.tr

**Tolgahan KAYA**

1985’te Gümüşhane’de doğdu. 2008 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümden mezun oldu. 2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansını, 2019 yılında da doktorasını tamamladı. 13 yılı aşkın iş tecrübesi olmakla birlikte, 10 yıldır TÜBİTAK araştırmacı olarak çalışmaktadır ve 2 yıldır Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsünün Teknik Müdür Yardımcılığı görevini yürütmektedir.

E-posta: Tolgahan.kaya@tubitak.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.



Determination of Solar Energy Usage Rate, Reliability, and Efficiency for Different Trips of High-Speed Train

Mehmet FİDAN^{ID}, Mine SERTSÖZ*^{ID}

Eskişehir Technical University Voc. School of Transportation 26140, Eskişehir, Turkey

**msertsoz@eskisehir.edu.tr*

(Alınış/Received: 10.06.2022, Kabul/Accepted: 06.07.2022, Yayınlama/Published: 31.07.2022)

Abstract: In this study, a statistical feasibility analysis was performed using a universally valid equation model to determine how much of the power required by the YHT65000 series high-speed train sets can be supported by solar energy systems. Calculations were made with the necessary parameters obtained from the General Directorate of Meteorology, Turkey. To find the ratio to meet this power requirement, eight different Ankara-Eskişehir / Eskişehir-Ankara trips were used, and these trips were tested by 61 different distribution functions to find the optimum model for the probability density function for each trip. The selection of the best models among these different distribution functions is presented with their error rates. This study reveals the detailed statistical characteristics of the contribution of a solar energy system to be established to support the power requirement of the high-speed train line based on specific trips.

Keywords: Solar energy, Statistical distributions, Railway engineering, Energy efficiency, Probability density function, Power system reliability

Yüksek Hızlı Trenin Farklı Seferlerinde Güneş Enerjisi Kullanım Oranı, Güvenilirliği ve Verimliliğinin Belirlenmesi

Öz: Bu çalışmada, YHT65000 serisi yüksek hızlı tren setlerinin ihtiyaç duyduğu gücün ne kadarının güneş enerjisi sistemleri ile desteklenebileceğini belirlemek için evrensel olarak geçerli bir denklem modeli kullanılarak istatistiksel bir fizibilite analizi yapılmıştır. Hesaplamalar Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen gerekli parametreler ile yapılmıştır. Bu güç ihtiyacını karşılayacak oranı bulmak için sekiz farklı Ankara-Eskişehir / Eskişehir-Ankara seferi kullanılmış ve bu seferler 61 farklı dağılım fonksiyonu ile test edilerek her bir sefer için olasılık yoğunluk fonksiyonu için optimum model bulunmuştur. Bu farklı dağılım fonksiyonları arasından en iyi modellerin seçimi hata oranları ile birlikte sunulmuştur. Bu çalışma, yüksek hızlı tren hattının belirli seferlere dayalı güç ihtiyacını desteklemek için kurulacak bir güneş enerjisi sisteminin katkısının detaylı istatistiksel özelliklerini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Güneş enerjisi, İstatistiksel dağılımlar, Demiryolu mühendisliği, Enerji verimliliği, Olasılık yoğunluk fonksiyonu, Güç sistemi güvenilirliği

1. Introduction

Combining rail systems with solar energy has received much attention in recent years to contribute to energy efficiency by reducing fossil fuel use. In addition, the use of solar energy in rail systems helps prevent environmental pollution. There are many applications around the world where solar panels have been both placed on the rooves of trains and mounted elsewhere. These applications and benefits are mentioned below.

Although it is not a sunny region (900 hours/year), a 3.3 GWh / year solar power plant was established in a railway tunnel near Antwerp, Belgium, and the return on the investment is expected to be realized within 9 years [1]. Vili, the 760mm-gauge vehicle in Hungary, is operated with 9.9 m² solar panels [2].

Cite as: M. Fidan, M. Sertsöz, "Determination of solar energy usage rate, reliability, and efficiency for different trips of high-speed train," *Railway Engineering*, no. 16, pp. 116-127, July. 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1128853

Solar cells are also present at airports in many countries and many projects have been initiated to integrate them into the road surface. If an entire strip of land is covered with PV modules, the railway becomes an addition to such power plants, the return on investment is considered to be less than 10 years for public land PV plants, and several decades for railways [3]. In another study, an optimal design of solar cells is improved by using a social spider algorithm [4].

In the literature, there are important studies on the use of solar power solutions for rail systems, especially on Indian Railways. Indian Railways is one of the world's largest diesel consumers and has an annual consumption of 2.7 billion liters and an annual CO₂ emission of 239.12 tons [5]. Therefore, efforts have been made by Indian Railways to reduce fossil fuel consumption and adopt environmentally friendly technologies [6]. Indian Railways operate a total of 63511 railway cars, including both traditional rail cars and Linke Hofmann Busch rail cars [7]. Most railway cars belonging to Indian Railways are exposed to sunlight throughout the year which provides an opportunity to explore the possibility of using solar energy [8]. A statistical model was developed to estimate the power output per unit roof area of the railway car to evaluate the technical feasibility and economy of Indian Railways before SPV modules on solar-powered cars running on different routes in India were installed [9].

In Italy, amorphous silicon modules were installed on five passenger cars, two locomotives, and three freight cars [10]. In 2010, France's state-owned railway tested a Diesel Multi-Unit (DMU) equipped with thin-film Copper Indium Gallium Selenite SPV modules and the 990 Wp ceiling-mounted SPV system to partially power the electrical lighting system inside the DMU [11].

According to a study conducted in Iran in 2013, an SPV system can meet 74% of a passenger car's power requirement in hot months and 25% in cold months, 63.7 kWh of energy can be saved, and annual CO₂ emissions can be reduced by 37 tons [12].

In a study proposing to utilize solar energy for the development of a solar-powered railway transportation system in Pakistan, Pakistan's solar energy potential was evaluated and a case study for solar-powered vehicles was presented [13].

In another study, the effectiveness of the circuit configuration change, taking into account partial shadows in the rooftop PV system at Tokyo Station, was verified. It was concluded that it could improve the power output to the level that would be expected in a solar radiation field, and unlike complex switching techniques on a large scale, the real effects of a circuit configuration change can be implemented with minimal cost [14].

In a recent study, a photovoltaic power generation system was designed using the roof of Gwangmyeong Station, the largest railway station building in Korea, and the estimated power generation volume was calculated using the PV system. The contribution of the photovoltaic power generation system to carbon emission reduction in electric railway systems was also analyzed [15]. A more recent study provides a detailed analysis of roadside PV power integration into the direct current (DC) traction power supply system of the urban rail transit (URT) based on the data of Shanghai URT Line 11 [16]. In addition, Jia et al. have examined the perspective of solar-powered road and rail transport in China in their current work [17].

The problem of providing the power demand of any system with solar energy should be analyzed statistically in terms of instant energy need and instantaneous solar energy production. In one of the current studies on this subject, solar energy system integration into smart cities has been discussed statistically [18]. In another study, Blaga et al. analyzed the effectiveness of solar forecasting models statistically in detail [19]. In addition, in another study, the energy production performance of all renewable energy sources for Romania was statistically demonstrated based on years [20]. In a more recent study, a detailed statistical analysis of renewable energy sources

in terms of sustainability and forecasting has been made comparatively for Europe and Romania [21]. Another recent study presents the statistical indicators of renewable energy resources in the railway transportation structure of European countries [22].

When the studies examining solar radiation in terms of the probability distribution function are searched in the literature, one of the outstanding studies is the study of solar energy production by Afzaal et al. using Weibull distribution on a power grid [23]. In addition, Ayodele used different probability distribution functions to model the global solar radiation of the city of Ibadan, the capital of Nigeria, and compared their performances over model errors in his article published in 2015 [24]. In one of the most recent studies, Wahbah et al. propose a hybrid Beta-Kernel density estimation (KDE) model for solar radiation probability intensity estimation [25].

The structure of this article is as follows: Section 2 presents the technical information about the route used for this study and the details of the high-speed train for which the power requirement is to be determined. The case study and the power calculations required for this case study are discussed in Section 3. The distributions of the solar energy system's contribution to eight different train trips, which are modeled with the best distribution model using the Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit test, are discussed. In Section 5, the contribution of the solar energy system for each trip is analyzed comparatively with each other in terms of efficiency and reliability based on basic statistics and those obtained from the distribution models. Finally, the conclusion for the obtained results is presented in Section 6. The motivation of this study is demonstration of possibility to use the sun, which is a type of renewable energy, in rail systems. In addition aim of this study can be indicated the rate of utilization of solar energy and which trips were both the most reliable and the most efficient.

2. Technical Information

Studies are performed according to a specific route and train in Turkey. The main reason for the energy consumption of trains is train resistance, which is the sum of the forces that negatively affect the train movement [26]. The reason for choosing the route selected for this study is that the ramp level is close to 0% and the curve is almost 0 m. diameter. As can be expected, solar energy will be insufficient to meet the full power needs of a high-speed train. For this reason, as ramp and curve values increase power consumption, a route with low consumption has been chosen so that the percentage of solar energy usage is high. Thus, the investment in this solar-based train-designed facility will be logical. The technical information on the high-speed train used in this study is given in Table 1.

Table 1. Technical information of YHT 65000 high-speed train (obtained from Turkish State Railways)

Main Characteristics of YHT6500	
Catenary Type	AC 25 kV, 50 Hz
Traction Motor Power	AC 4800 kW
Power	38400 kW
Maximum Speed	275 km/h
Line Gap	1435 mm

The route information of the Ankara-Eskişehir YHT line is given in Figure 1.a and general structure of the PV system is summarized in Figure 1.b.

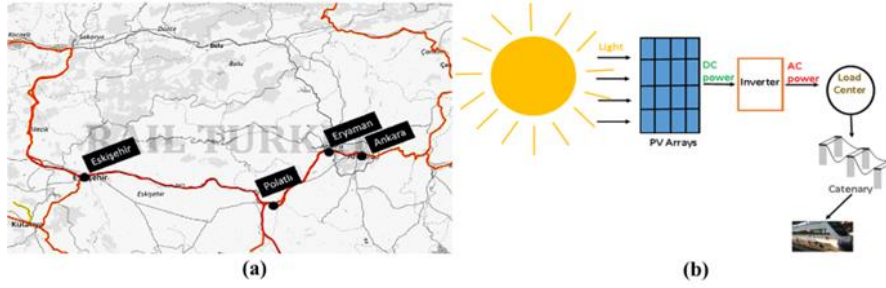


Figure 1. Grid-connected PV system and departures

- (a) Route information of Ankara-Eskişehir YHT line (obtained from Turkish State Railways)
 (b) General structure of the PV system

The route given in Figure 1 presents the 245 km route traveled by the YHT 65000 trains, which perform five departures and five return trips per day. A trip takes about 1 hour 30 minutes. The departure times are: 06:20, 08:15, 13:10, 18:00 and 20:25. However, on the last trip, there is no sunlight. The arrival times are: 06:40, 10:30, 15:00, 17:30 and 20:20. In this study 8 trips are considered for distribution functions.

3. Case Study

It was found that the amount of power required for the eight daily trips can be supported by a grid connected to the PV system. The maximum that can be obtained from solar panels is as in (1), and the total energy during a trip can be calculated by (2) [15, 27, 28].

$$P(t) = \eta \cdot A \cdot G(t) \cdot [1 - 0.005 \cdot (T(t) - 25)] \quad (1)$$

$$W_{PV} = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (2)$$

η is system efficiency. A is total panel area (m^2). H is the photoelectric conversion efficiency of the PV array (%). $G(t)$ is the global solar radiation value changing with time t ($Watt / m^2$); $T(t)$, ambient temperature value at time t ($^{\circ}C$).

In this study, the power supplied from solar energy was directly given to the grid and it is possible to find out how much of the power requirement of the different departures can be met in this way. While making these calculations, some assumptions were made. These are:

Cable efficiencies are 100%. There is no efficiency decrease in panels caused by temperature. The panel efficiency is 19% (polycrystalline panel). The inverter efficiency is 98%. The temperature and global solar radiation values used were obtained from the Turkish Meteorological General Directorate.

Since the system is for connection to the network (network or load dependent), it is assumed that a central inverter was used instead of a battery. The area on which the solar panels are to be placed is $1000 m^2$, which is part of the roof size of Polatlı YHT Station (TCDD).

The train makes ten trips between Eskişehir-Ankara and Ankara-Eskişehir. Its actual demanded energy per single trip is 6 MWh [29]. Eight of these trips take place during the hours of sunlight (radiation information from meteorology is available for these eight trips). The total energy demand is 48 MWh (for the 8 trips) in a day, which is 17.52 GWh a year. The calculation was made using equation (1).

4. Methods

The contribution of the solar energy system to a single departure or arrival trip is defined in terms of percentage and a time series of 365 contribution percentiles was constructed for each trip to observe the change in the solar energy system's contribution to the respective trip over a year. These time series were modeled with 61 different distribution functions for the eight different trip times. The Kolmogorov-Smirnov-based Goodness-of-Fit test was applied by using Easy-Fit software to choose the best distribution function for each trip. The Kolmogorov-Smirnov test is a nonparametric test based on the empirical cumulative distribution function (ECDF) [30].

Examining the coefficient of variation (CV), skewness (SK), and excess kurtosis (κ) statistics of each trip's data before choosing the best fitting distribution model for the data of each trip also provides important information about the shape of the distribution. These statistics are presented in Table 2 for departure and arrival trips.

The smaller variation coefficients mean more stable data. Based on this relationship, it can be inferred that the most stable and reliable data belongs to the 10:30 return trip and the most unstable and unreliable data belongs to the 18:00 departure trip. The daylight hours between 08:05-15:00 show more stable behavior compared to the early and late hours of the day.

Skewness measures the asymmetry of the probability distribution. The tail is on the left side of the distribution when negative skewness is seen and on the right side when positive skewness is observed. According to Table 2, the 08:05, 10:30, and 13:10 trips have tails on the left side of their distributions, whereas the others have tails on the right side. The tail appearing on the right side indicates that smaller ratios are more probable.

Table 2. Statistical characteristics of daily data for solar energy system's contribution to the power supply of each YHT departure and arrival trip over a year.

Trip	Mean	SD	CV	SK	κ
06:20	32.033%	26.499%	0.8595	0.4148	-1.3234
08:05	53.284%	27.950%	0.5246	-0.2714	-1.1582
13:10	76.087%	37.700%	0.4955	-0.1647	-1.1164
18:00	6.2885%	6.8277%	1.0858	1.5153	1.6794
06:40	35.148%	30.903%	0.8792	0.4831	-1.2574
10:30	164.63%	73.369%	0.4457	-0.548	-0.8081
15:00	87.302%	56.035%	0.6418	0.1512	-1.3468
17:30	16.087%	16.681%	1.0369	0.9658	-0.2847

The distribution of the data can be classified as platykurtic, mesokurtic, and leptokurtic in terms of excess kurtosis. The negative excess kurtosis means platykurtic distribution, which has a thinner tail than a normal distribution. The positive excess kurtosis denotes leptokurtic distribution, which has a thicker tail than the normal distribution. Mesokurtic distributions have excess kurtosis close to zero, which means that they have normal-like tails. According to Table 2, only the data of the 18:00 trip has leptokurtic distribution, and all the other trips have platykurtic distribution.

The data belonging to the departure and arrival trips are modeled as presented below.

As can be seen in Figure 2.a, the data for the 06:20 departure trip and similarly 06:40 arrival trip are modeled with the best Beta distribution.

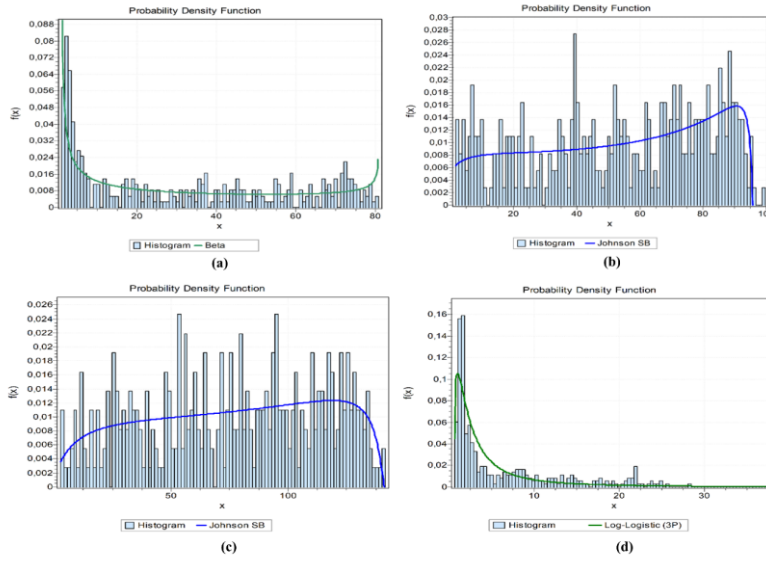


Figure 2. Best probability density functions for departure trips

(a)Beta for 06:20 (b)Johnson SB for 08:05 (c)Johnson SB for 13:10 (d) 3P log-log for 18:00.

The general expression of the Beta probability density function is given in (3) [31].

$$f_{Beta}(x) = \frac{(x-a)^{\alpha_1-1}(b-x)^{\alpha_2-1}}{B(\alpha_1, \alpha_2)(b-a)^{\alpha_1+\alpha_2-1}} \quad (3)$$

In Equations (3), the function $B(\alpha_1, \alpha_2)$ is expressed in terms of Gamma (Γ) function as in Equation (4).

$$B(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\alpha_2)}{\Gamma(\alpha_1+\alpha_2)} \quad (4)$$

Table 3. Beta pdf coefficients for 06:20 and 06:40 trips

Trip	a	b	α_1	α_2
06:20	1.1442	80.794	0.44405	0.700096
06:40	1.4196	94.672	0.44387	0.729880

Because α_1 is less than 1, a long right-side tail occurred. In addition, because α_2 is also less than 1, this tail rose again, while the random variable continued to its upper limit.

The contribution of the solar energy system for the 06:20 and 06:40 trips is mostly under 10% of the overall energy requirement with approximately 38% probability. However, the long, narrow, and uniform-like tail structure resulting from the obtained Beta distribution coefficients creates an unpredictable region with a 62% probability in total for contribution rates greater than 10%.

When the contribution rate data for the 08:05, 13:10, 10:30, and 15:00 trips were investigated with the K-S test, it was observed that the most suitable distribution model for these trips is the Johnson SB distribution. The Johnson SB distribution is also defined on a limited interval with finite upper and lower boundaries [32]. In the definition of the Johnson SB distribution, there are four parameters to express the probability distribution function. These are listed as follows:

γ : Continuous shape parameter δ : Continuous positive shape parameter

λ : Continuous positive scale parameter ξ : Continuous location parameter

The domain of the continuous random variable x is defined in terms of λ and ξ as in (5).

$$\xi \leq x \leq \xi + \lambda \quad (5)$$

z is the normalized version of the random variable x as expressed in (6).

$$z = \frac{x - \xi}{\lambda} \quad (6)$$

By using these parameters, the Johnson SB probability density function is defined as in (7).

$$f_{Johnson\ SB}(x) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi z(1-z)}} \cdot e^{-0.5\left(\gamma + \delta \ln\left(\frac{z}{1-z}\right)\right)^2} \quad (7)$$

Table 4. Johnson SB pdf coefficients for 08:05, 13:10, 10:30 and 15:00 trips.

Trip	γ	δ	λ	ξ
08:05	-0.25260	0.60136	98.868	-3.0845
13:10	-0.16815	0.69024	142.86	-1.5768
10:30	-0.52931	0.65057	282.58	-15.924
15:00	0.1276	0.49851	178.92	4.7546

Because δ is less than 1 for all these four trips, the skewness of the distribution is negative as shown in Table 2. Moreover, the negative γ causes the left-side tail for 08:05, 13:10 and 10:30 trips. ξ defines the lower bound of the domain and λ defines its width.

The distribution of the contribution rate data for the 18:00 trip is most appropriately modeled by the Three-Parameter Log-Logistic distribution as shown in Figure 2.d. The probability density function for the Three-Parameter Log-Logistic distribution is defined as in (8) [33].

$$f_{log-logistic(3P)}(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{-2} \quad (8)$$

where $\gamma \leq x \leq +\infty$

In this equation, α , β and γ are the scale, shape, and location parameters, respectively. The third parameter, which is the location parameter, defines the minimum value that the random variable can take.

Table 5. Three-Parameter Log-Logistic pdf coefficients for 18:00 trip.

Trip	α	β	γ
18:00	1.2053	2.41	0.66512

The scale parameter is greater than 1, which causes the pdf to be equal to 0 at the minimum value (location parameter) of the random variable. Because the shape parameter is greater than scale parameter, but less than 8 times the size, a long right-side tail is obtained after the value where the pdf is maximum.

The best-fitting distribution model for the 17:30 return trip is reciprocal distribution. Assuming that the domain of a random variable is given as $a \leq x \leq b$, then the Reciprocal Probability Density Function is expressed as in (9) [34].

$$f_{reciprocal}(x) = \frac{1}{x(\ln(b) - \ln(a))} \quad (9)$$

Table 6. Reciprocal pdf coefficients for 17:30 trip.

Trip	a	b
17:30	0.78194	62.087

The errors of the pdf models expressed in (4), (9), (12) and (16) for the real contribution data of the 06:20,08:05,13:10 and 18:00 trips are shown in Figure 3.a, 3.b, 3.c and 3.d respectively and the minimum and maximum errors of each pdf is given in Table 7.

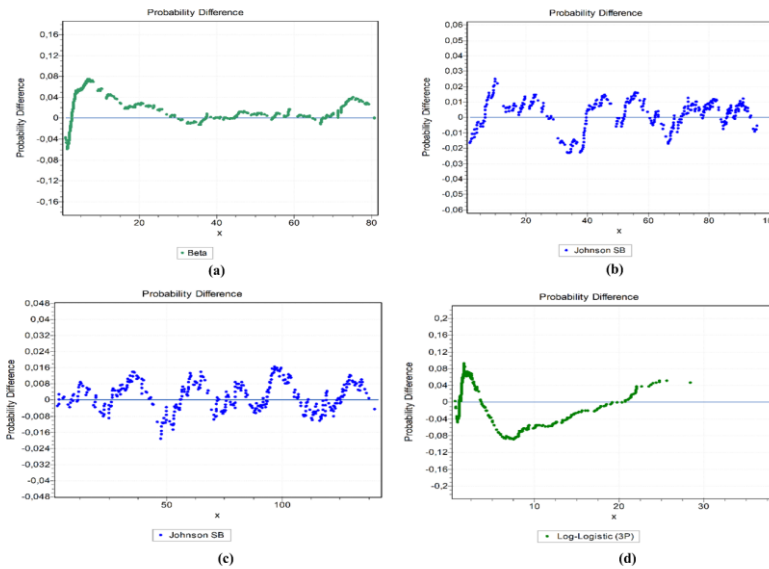


Figure 3. The errors of best probability density functions for departure trips (a)06:20 (b)08:05 (c)13:10 (d)18:00.

Table 7. Minimum and maximum errors of best probability density function for each trip.

Trip	06:20	08:05	13:10	18:00	06:40	10:30	15:00	17:30
min ε	-0.06	-0.025	-0.016	-0.08	-0.06	-0.02	-0.03	-0.08
max ε	0.08	0.025	0.016	0.08	0.08	0.02	0.03	0.04

5. Comparative Results and Discussion

Ratios showing the amount of power that can be supplied by a solar energy system are found for all the days in a year using Equation 1. However, only the minimum, Q1 percentile, median, Q3 percentile and maximum values are presented in Table 8 for departure and arrival trips.

According to Table 8, the solar energy system has the least contribution to the 18:00 departure trip and the largest contribution in departure trips is seen in the 13:10 departure. The Q1 statistic gives an idea of possible scenarios where the conditions are unfavorable, and the Q3 statistic gives an idea of the possible scenarios where the conditions are favorable. According to the Q1 statistics, the worse scenarios for the 08:05 and 13:10 trips are acceptable. On the other hand, the worse scenarios for the 06:20 and 18:00 trips create an inefficient environment for the use of the

solar energy system for these two departure trips. According to the Q3 statistics, the better scenarios for the 06:20, 08:05, and 13:10 trips are acceptable. On the other hand, the contribution of the solar energy system is not at a satisfactory level for the 18:00 trip. The solar energy system can generate power more than the train needs at 13:10 trip in the best-case scenario.

Table 8. The Statistics of the Solar Energy System's Contribution to the Power Supply of Each YHT Departure and Arrival Trip.

Trip	Min	Q1	Median	Q3	Max
06:20	1.1442%	4.3754%	23.877%	55.314%	80.794%
08:05	1.5305%	31.537%	55.325%	78.264%	99.787%
13:10	2.9422%	47.016%	79.045%	109.87%	141.61%
18:00	0.6673%	1.4742%	2.6004%	8.9889%	38.291%
06:40	1.4196%	4.9410%	25.302%	62.801%	94.672%
10:30	5.3354%	116.84%	180.67%	228.95%	282.58%
15:00	2.9919%	30.223%	85.399%	137.79%	187.19%
17:30	0.7819%	2.1796%	8.2679%	27.83%	62.087%

According to Table 8, the solar energy system has the least contribution to the 17:30 return trip and the largest contribution is seen in the 10:30 trip. For the 10:30, return trip, the solar energy system supplies more than a train set needs in both worse and better scenarios. Moreover, two train sets can be supplied by the solar energy system for the duration of this trip in the better case scenario. According to Q1 statistics, the contribution ratios are not acceptable for the 06:40 and 17:30 trips in the worse scenarios. However, according to Q3 statistics, both contribution ratios are acceptable to support the decision to use a solar energy system as support for both return trips in the better scenarios.

In Table 9, Goodness-of-fit statistics are presented for the best fitting distribution models for departure and arrival trips. The lower KS statistics and The P-Values which are close to 1 imply a better fitting distribution model. Moreover, the Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) of the distribution models should be close to 0.

When Table 9 is examined, it is seen that the Johnson SB model, selected for the 08:05 and 13:10 trips, is more reliable than the Beta model selected for the 06:20 trip and the Three Parameters Log-Logistic model selected for the 18:00 trip. The main reason for this result is the high variation coefficients for the 06:20 and 18:00 trips, as presented in Table 2, which means that the data for these trips are unstable. It is a far more challenging problem to fully fit unstable data with a single distribution model. Data belonging to the 10:30 and 15:00 trips are better fitted with the best fitting distribution because of their fewer variation coefficients, as presented in Table 9.

Table 9. Best Probability Density Function and Its Goodness of Fit Statistics for Each Departure and Arrival Trip.

Trip	Distrib.	KS Stat.	P Val.	MAE	RMSE
06:20	Beta	0.0742	0.0341	0.0246	0.0322
08:05	Johnson SB	0.0261	0.9590	0.0079	0.0096
13:10	Johnson SB	0.0220	0.9929	0.0059	0.0071
18:00	Log-Logistic(3P)	0.0922	0.0038	0.0442	0.0509
06:40	Beta	0.0762	0.0274	0.0272	0.0349
10:30	Johnson SB	0.0368	0.6921	0.0102	0.0130
15:00	Johnson SB	0.0325	0.8288	0.0098	0.0124
17:30	Reciprocal	0.0894	0.0055	0.0357	0.0439

6. Conclusion

In this study, it can be concluded that substantial power support can be provided for the trips between 08:05 and 15:00, to the point where the energy consumption of more than one train set can be met for most of the year for the duration of the 10:30 trip. Conversely, the solar energy system becomes inefficient at hours approaching the evening, such as 17:30 and 18:00.

In the continuation of the study, the most suitable probability models of solar energy contribution rates for each trip and the probability density functions of these probabilistic models were derived. Thanks to these extracted pdfs, the probability that the annual contribution for the relevant trip is lower or higher than a certain value can be calculated. In these extracted models, there is a significant relationship between the tail structure, seen on the right or left, and the average efficiency. The average contribution is higher in daytime trips with distributions where the tail is generally seen on the left, and the average contribution is lower for early morning and late evening trips with distributions where the tail appears on the right.

It should be emphasized that, this study indicated the rate of utilization of solar energy and which trips were both the most reliable and the most efficient. For instance, it has been shown that the most efficient trip for the system is at 10:30, while the most reliable trip is at 13:10. Similarly, it has been revealed that the system is most efficient for the trip 06:40 return trip and most reliable for the 06:20 departure trip. The 18:00 departure trip was found to be the most incompatible with the solar energy system in terms of both efficiency and reliability. The low efficiency in the 18:00 trip is due to the sunset, and the low reliability shows that the annual change of sunset causes serious deviations in this trip.

In future studies, a study is planned to determine which probabilistic methods are best used in which regions. With this study, it will be possible to determine the solar energy utilization rates of the rail systems according to the different trip hours in the most accurate way. This solution will determine whether such an investment is made in this region or not.

Acknowledgement

The authors acknowledge the General Directorate of Meteorology, Forestry and Water Affairs Ministry of the Republic of Turkey for the supply of Solar Irradiation Hourly data.

References

- [1] A. Jäger-Waldau, "Snapshot of Photovoltaics—February 2020," *Energies* 13, no. 4: 930. 2020. doi: /10.3390/en13040930
- [2] M. K.I Hussien Rabaia, M. A. Abdelkareem, E. T. Sayed, K. Elsaid, K-J. Chae, T. Wilberforce, A.G. Olabi, "Environmental impacts of solar energy systems: A review," *Science of The Total Environment*, Volume 754, 2021, 141989, ISSN 0048-9697. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141989.
- [3] I. M. Asanov, E. Y. Loktionov, "Possible benefits from PV modules integration in railroad linear structures," *Renewable Energy Focus*, vol. 25, pp. 1-3, 2018. doi: 10.1016/j.ref.2018.02.003
- [4] H. Kashfi, A. Sadegheih, A. Mostafaeipour, M. M. Omran, "Parameter identification of solar cells and fuel cell using improved social spider algorithm," *COMPEL*, vol. 40, pp. 142-172, 2020. doi: 10.1108/COMPEL-12-2019-0495
- [5] M. S. Vasisht, C. Vishal, J. Srinivasan, S. K. Ramasesha, "Solar photovoltaic assistance for LHB rail coaches," *Current Science*, vol. 107, pp. 255-259, 2014. doi: 10.18520/cs/v107/i2/255-259
- [6] M. Gangwar, S. M. Sharma, "Evaluating choice of traction option for a sustainable Indian Railways," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 33, pp. 135-145, 2014. doi: 10.1016/j.trd.2014.08.025
- [7] A. Ajay Mate, V.P. Katekar, C.H.S. Bhatkulkar, "Performance Investigation of Solar Still for Batteries of Railway Engine, Indian Railways, at Ajni Loco Shed, Nagpur," *International Conference on*

- Advances in Thermal Systems, Materials and Design Engineering (ATSMDE2017)* doi: 10.2139/ssrn.3101405
- [8] M. K. Darshana, K. Karnataki, G. Shankar, K. R. Sheela, “A practical implementation of energy harvesting, monitoring and analysis system for solar photo voltaic terrestrial vehicles in Indian scenarios: A case of pilot implementation in the Indian Railways,” *2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, IEEE, 2015, pp. 842-845. doi: 10.1109/WIECON-ECE.2015.7443989
- [9] M. S. Vasisht, G. A. Vashista, J. Srinivasan, S. K. Ramasesha, “Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study,” *Energy*, vol. 118, pp. 684-691, 2017. doi: 10.1016/j.energy.2016.10.103
- [10] M. Trentini, “Photovoltaic systems for railways in Italy,” *Tenth EC Photovoltaic solar energy conference*, Springer, 1991, pp. 826-829. doi: 10.1007/978-94-011-3622-8_211
- [11] Z. Chen, M. Jiang, L. Qi, W. Wei, Z. Yu, W. Wei, X. Yu, J. Yan, “Using existing infrastructures of high-speed railways for photovoltaic electricity generation,” *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 178, 2022, 106091, ISSN 0921-3449. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.106091
- [12] E. Rohollahi, M. Abdolzadeh, M. A. Mehrabian, “Prediction of the power generated by photovoltaic cells fixed on the roof of a moving passenger coach: a case study,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 229, pp. 830-837, 2015. doi: 10.1177/0954409714524749
- [13] S. H. I. Jaffery, M. Khan, L. Ali, H. A. Khan, R. A. Mufti, A. Khan, N. Khan, S. M. Jaffery, “The potential of solar powered transportation and the case for solar powered railway in Pakistan,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 270-276, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.025
- [14] T. Igarashi, T. Kumano, H. Hayashiya, T. Takino, “Efficiency improvement of rooftop photovoltaic system at railway station,” *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 7, pp. 41-50, 2017. doi: 10.1080/22348972.2016.1229917
- [15] C. Tao, D. Shanxu, C. Changsong, “Forecasting power output for grid-connected photovoltaic power system without using solar radiation measurement,” *2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, IEEE, 2010, pp. 773-777. doi: 10.1109/PEDG.2010.5545754
- [16] X. Shen, H. Wei, L. Wei, “Study of trackside photovoltaic power integration into the traction power system of suburban elevated urban rail transit line,” *Applied Energy*, vol. 260, pp. 114177, 2020. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114177
- [17] L. Jia, J. Ma, P. Cheng, Y. Liu, “A perspective on solar energy-powered road and rail transportation in China,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, pp. 760-771, Oct. 2020. doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.02040
- [18] N. Ghadami, M. Gheibi, Z. Kian, M. G. Faramarz, R. Naghedi, M. Eftekhari, A. M. Fathollahi-Fard, M. A. Dulebenets, G. Tian, “Implementation of solar energy in smart cities using an integration of artificial neural network, photovoltaic system and classical Delphi methods,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 74, pp:103149, Nov. 2021. doi: 10.1016/j.scs.2021.103149
- [19] R. Blaga, A. Sabadus, N. Stefu, C. Dughir, M. Paulescu, V. Badescu, “A current perspective on the accuracy of incoming solar energy forecasting,” *Progress in energy and combustion science*, vol. 70, pp.119-144, Jan. 2019. doi: 10.1016/j.pecs.2018.10.003
- [20] Ş. D. Cîrstea, C. S. Martiş, A. Cîrstea, A. Constantinescu-Dobra, M. T. Fülöp, “Current situation and future perspectives of the Romanian renewable energy,” *Energies*, vol.11, pp.3289, Dec. 2018. doi: 10.3390/en11123289
- [21] A. Mehedintu, G. Soava, M. Sterpu, E. Grecu “Evolution and Forecasting of the Renewable Energy Consumption in the Frame of Sustainable Development: EU vs. Romania,” *Sustainability*, vol. 13, pp. 10327, Jan. 2021. doi: 10.3390/su131810327
- [22] O. Ostapchuk, M. Kuznetsov, V. Kuznetsov, V. Kuznetsov, “Problems of the use of renewable energy sources in the structure of railway power supply,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 985, Nov. 2020, pp. 012011. doi: 10.1088/1757-899X/985/1/012011
- [23] M. U. Afzaal, I. A. Sajjad, A. B. Awan, K. N. Paracha, M. F. Khan, A. R. Bhatti, M. Zubair M, W. U. Rehman, S. Amin, S. S. Haroon, R. Liaqat, “Probabilistic generation model of solar irradiance for grid connected photovoltaic systems using weibull distribution,” *Sustainability*, vol.12, pp. 2241, Mar. 2020. doi: 10.3390/su12062241

- [24] T.R. Ayodele, "Determination of probability distribution function for modelling global solar radiation: case study of Ibadan, Nigeria," *International Journal of Applied Science and Engineering*, vol.13, pp. 233-245, Sep. 2015. doi: 10.6703/IJASE.2015.13(3).233
- [25] M. Wahbah, T. H. El-Fouly, B. Zahawi, S. Feng, "Hybrid beta-KDE model for solar irradiance probability density estimation," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, pp. 1110-1113, Apr. 2019. doi: 10.1109/TSTE.2019.2912706
- [26] Ö. Akbayır, B. Başeğmez, "Türkiye şartlarına uygun vagon seyir direnci formülünün enerji verimliliği açısından deneysel olarak belirlenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 65-75, Jan. 20221. doi: 10.47072/demiryolu.796392
- [27] S. X. Chen, H. B. Gooi, M. Q. Wang, "Sizing of Energy Storage for Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 142-151, 2012. doi: 10.1109/TSG.2011.2160745
- [28] Ü. Başaran Filik, T. Filik, Ö. N. Gerek, "A hysteresis model for fixed and sun tracking solar PV power generation systems," *Energies*, vol. 11, pp. 603, 2018. doi: 10.3390/en11030603
- [29] Enerji Atlası, "Yüksek Hızlı Tren Elektrik Tüketimi Yirmibin Konuta Eşdeğer," [Online]. Available: <https://www.enerjiatlası.com/haber/yuksek-hizli-tren-elektrik-tuketimi-yirmibin-konuta-esdeger> [Accessed: 06-Jul-2022].
- [30] F. J. Massey Jr, "The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit," *Journal of the American statistical Association*, vol. 46, pp. 68-78, 1951. doi: 10.1080/01621459.1951.10500769
- [31] A. K. Gupta, S. Nadarajah, "Handbook of beta distribution and its applications," CRC press, 2004. doi: 10.1201/9781482276596
- [32] T. Soukissian, "Use of multi-parameter distributions for offshore wind speed modeling: The Johnson SB distribution," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 982-1000, 2013. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.06.050
- [33] V. P. Singh, "Three-Parameter Log-Logistic Distribution," *Entropy-Based Parameter Estimation in Hydrology*, Springer, pp. 297-311, 1998. doi: 10.1007/978-94-017-1431-0_18
- [34] R. W. Hamming, "On the distribution of numbers," *The Bell System Technical Journal*, vol. 49, pp. 1609-1625, 1970. doi: 10.1002/j.1538-7305.1970.tb04281.x

Resume



Mehmet FİDAN

He was born on December 1, 1982 in Eskişehir. He graduated from Eskişehir Osmangazi University, Department of Electrical and Electronics Engineering. He completed his master's and doctorate studies at Anadolu University, Department of Electrical and Electronics Engineering. He works as an assistant professor in Eskişehir Technical University, Vocational School of Transportation, Rail Systems Electric-Electronics Program and continues his academic studies in the same field.

E-mail: mfidan@eskisehir.edu.tr



Mine SERTSÖZ

She was born on 17 November 1984 in the Pazaryeri district of Bilecik. She graduated from Yıldız Technical University Electrical Engineering. She completed his master's degree in Kocaeli University Electrical Engineering and his doctorate in Bilecik Şeyh Edebali University Energy Systems Engineering. She works as an assistant professor in Eskişehir Technical University, Vocational School of Transportation, Rail Systems Electric-Electronics Program and continues her academic studies in the same field. She is married and has two children.

E-mail: msertsoz@eskisehir.edu.tr

Ethics Statement:

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

Contribution of authors: Mehmet FİDAN: Conceptualization, Methodology, Software. Mine SERTSÖZ: Resources, Validation, Writing-Original draft preparation, Writing- Reviewing and Editing.



Telgraf Denklemleri ile Ray Devresi Denklemleri İlişkisi

Yasin KOÇAK

TCDD Genel Müdürlüğü, 1. Bölge Bakım Servis Müdürlüğü, İstanbul, Türkiye

yasinkocak@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 31.05.2022, Kabul/Accepted: 12.07.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: 1830 senesinde ticari olarak telgrafın kullanılması ile uzak mesafelere bilgi taşınmasında büyük zorluklar yaşanmıştır. İlk başlarda İngiltere ile Fransa arasında çekilen hat zamanla İngiltere-Amerika Birleşik Devletlerine kadar uzamıştır. Telgraf hattında kullanılan kabloların hammadde ve kesitleri ilk başlarda deneme yanılma yöntemleri ile oluşturulmaya çalışılmıştır. Maxwell denklemlerinin bulunmasına istinaden 1800' lü yılların sonlarına doğru Telgraf Denklemleri ortaya çıkmış olup haberleşme, bilgi iletimi ve benzeri transmisyon hatlarına ait denklemler Telgraf denklemlerinden türetilmiştir. Teknolojinin gelişmesine istinaden, seyrüsefer emniyeti dikkate alınarak tasarlanan Demiryolu taşımacılığı için, sinyalizasyon sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Demiryolu sinyalizasyon sisteminin faal bir parçası olan ray devreleri, aynı zamanda birer bilgi iletim hattı görevi görmektedir. Modülasyon ve sayısal anahtarlama yöntemlerinin gelişmesi ile ses frekanslı eksiz ray devreleri geliştirilmiş olup ray devresinin alıcı-verici frekansı yükselerek çevresel koşullardan daha az etkilenir hale gelmiştir. Bu makalede gerilim ve akım sızıntıları yönünden benzer olan Telgraf iletimi denklemleri ile demiryollarında kullanılan Ray devresinin bilgi iletimi incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Telgraf denklemleri, Sinyalizasyon, Ray devresi, Balast direnci

Relationship Between Telegraph Equations and Track Circuit Equations

Abstract: With the use of the telegraph in 1830, great difficulties were experienced in conveying information over long distances. At first, the line drawn between England and France extended over time to England-United States. The raw materials and sections of the cables used in the telegraph line were initially tried to be created by trial and error methods. Based on the discovery of Maxwell's equations, Telegraph Equations emerged towards the end of the 1800s, and equations for communication, information transmission and similar transmission lines were derived from Telegraph equations. Based on the development of technology, signaling systems were needed for railway transportation, which was designed considering the safety of navigation. Track circuits, which are an active part of the railway signaling system, also serve as information transmission lines. With the development of modulation and digital switching methods, seamless track circuits with audio frequency have been developed and the tranceiver frequency of the track circuit has increased and it has become less affected by environmental conditions. In this article, the telegraph transmission equations, which are similar in terms of voltage and current leakage, and the information transmission of the track circuit used in railways are examined.

Keywords: Telegraph equations, Signaling, Track circuit, Ballast resistance

1. Giriş

Telgraf denklemi ilk kez Oliver Heaviside tarafından türetilmiştir [1]. En önemli uygulama alanları sinyallerin ve enerjinin iletilmesidir. Söz konusu denklemler, ortam yoluyla elektromanyetik dalgaların yayılmasını içeren geniş bir spektrumun tanımlamamızı ve anlamamızı sağlar. Oliver Heaviside, tüm iletim hattını her biri sonsuz uzunlukta bir dizi segmente bölerek genel haliyle denklemi elde etmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ray devresinin yüksek hızlı trenlerde kullanılması için Wang vd. [2] Yüksek hızlı demiryolunda ray devresi için uyarlanabilir dinamik kodlama

Atıf için/Cite as: Y. Koçak, "Telgraf denklemleri ile ray devresi denklemleri ilişkisi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 128-138, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1123901

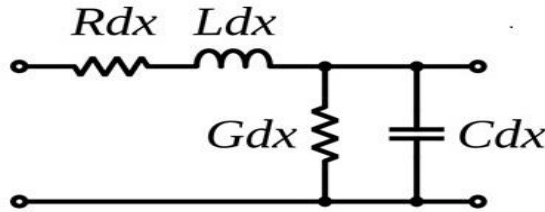
yöntemini incelemiştir, Hattın kapasitif etkilerinin sebep olduğu arızalar için Shang vd. [3] Eksiz hat devresinde kompanzasyon kondansatörünün uzun kısa süreli hafıza ağı üzerinden arıza teşhisi yöntemi çalışılmıştır, katener geri dönüş akımının ray devresine etkisini araştıran Havryliuk [4] Trenlerden Bir Ray Devresi Alıcısına Çekiş Akımı Harmoniklerinin Yayılım Modelini oluşturmuştur ve Feng vd. [5] Yüksek hızlı demiryolu çekiş akım harmoniklerinin ray devresine elektromanyetik uyumluluğu üzerine analiz ve araştırmasını incelemiştir.

Bunların haricinde ray devresinin yapısal özelliklerinin araştırmasını içeren He vd.[6] Kazı Verilerine Dayalı Hat Devre İzleme Veri İşleme Yöntemi Araştırması incelenmiştir.

Yapılan çalışmada, literatürden farklı olarak, ses frekanslı ray devresi bloğunda birim başına düşen propagasyon hesabının ve söz konusu ray devresinin taşıyıcı frekansına ait propagasyonun nasıl sönümlendiği detaylıca anlatılmıştır. Ayrıca, elde edilen matematiksel modelin doğrulanması için, TCDD 1. Bölge Müdürlüğü mntıkasında faal olarak kullanılmakta olan ses frekanslı ray devresinin alıcı verici frekanslarındaki değişimlerden yola çıkılarak, ray devresi blok bazında incelenmiş olup ana taşıyıcı frekans ve ray devresi gerilimi üzerindeki simülasyon sonuçları incelenmiştir.

1.1. Telgraf devresi tanımı

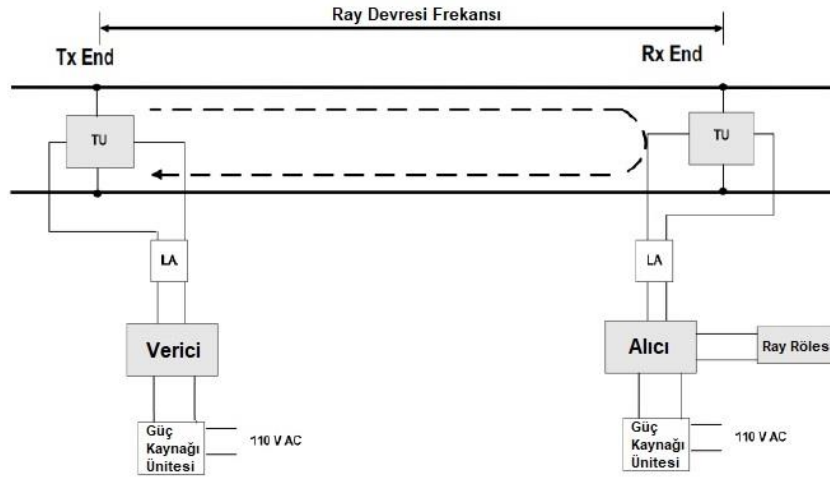
Ray devresi bloğundaki birim başına düşen enerji kayıpları sırasıyla seri dirençli ve paralel iletken eleman R_{dx} ve G_{dx} araçlarıyla modellenir. Manyetik etkiler seri endüktif elemanı L_{dx} ile modellenirken, kapasitif olgularda paralel kapasitif elemanı C_{dx} ile dikkate alınır burada R, L, G ve C sırasıyla ray devresi bloğunun uzunluk hattı seri direnci, endüktansı, paralel iletkenliği ve kapasitansdır [2]. Şekil 1’ de gösterilen temel devre telgraf devresinin şematik gösterimidir. Şekil 1’ deki model aynı zamanda ses frekanslı ray devresinin çalışma modeli de olup, ray devresi veri iletiminde olduğu gibi, iletim sırasında hem gerilim düşüşü hem de akım sızıntısı olduğu gerçeğini göz önünde bulundurur [7].



Şekil 1. Bir iletim hattının temel bileşenlerinin şematik gösterimi [7]

1.2. Ses frekanslı eksiz ray devresi tanımı

Şekil 2’ de gösterilen eksiz ray devresi, uluslararası standartlar göz önünde bulundurulduğunda, günümüzde en çok kullanılan ray devresi olmuştur. Eksiz ray devresinin avantajı, katener şebeke frekansından etkilenmemesi, mevcut hat boyunda kullanılan rayların kesilmemesi ve bu sayede daha yüksek hızlarda seyahate olanak sağlamasıdır. Ulusal demiryolu sistemlerinde kullanılan eksiz ray devreleri ile saatte 350 km’ ye kadar tren işletmeciliği yapılabilmektedir [8].



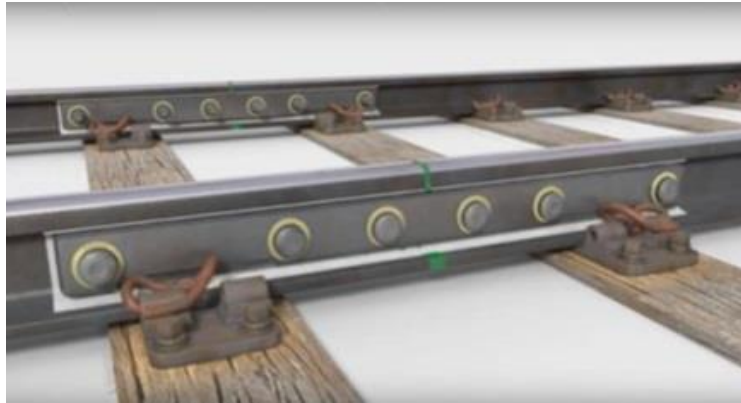
Şekil 2. Ses frekanslı eksiz ray devresinin genel gösterimi [9]

Sinyalizasyon Teknik Binalarından açık hatta bulunan alçak frekanslı ray devreleri hat dengeleme cihazı ile 7 kilometreye kadar sürülebilmektedir.

Ses Frekanslı Ray devrelerinin Şekil 1' deki gibi bir yapı ile bilgi iletimine sahip olduğu bilinmektedir fakat çevresel koşulların değişiminin, ray devrelerinin üzerinde yüksek derecede etkisi bulunmaktadır. Frekansın yüksek olması bilgi taşıma kapasitesi için avantajlı görünse de karakteristik empedansın artmasına sebep olmaktadır.

TCDD sisteminde kullanılmakta olan 3750-7250 Hz bandındaki Alçak Frekans ray devreleri ray dengeleme cihazı ile 1800 metre, ayar kutusuna takılan ray dengeleme devresi olmadan 700 metrelik bölgede blok oluşturmaktadır. Ray dengeleme devresi kullanılmayan 9500-16500 Hz bandındaki Yüksek Frekans ray devreleri ise 300 metrelik bölgede blok oluşturabilmektedir.

Şekil 3' de gösterilen, kesilen rayların arasına yerleştirilen izole cebireli 80-83.3 Hz' lik AC ray devrelerinde ise blok mesafeleri 3700 metreye kadar ulaşabilmektedir.



Şekil 3. İzole cebire [10]

2. Metot

Ray devresi bloğuna ait metre başına düşen $\partial V(x)$ birim voltajının frekansa göre değişimi Denklem 1' de ve metre başına düşen birim akımın $\partial I(x)$ frekansın göre değişimi Denklem 2' de gösterilmiştir [11].

$$\frac{\partial V(x)}{\partial(x)} = -(R + j\omega L)I(x) \quad (1)$$

$$\frac{\partial I(x)}{\partial(x)} = -(G + j\omega C)V(x) \quad (2)$$

R ve G elemanları ihmal edilebilecek kadar küçük ise, iletim hattı kayıpsız bir yapı olarak düşünülür. Bu varsayımla model sadece L ile C' ye bağlı hale gelir. Kayıpsız bir iletim hattı için elde edilmesi gerekli denklem köklerinin negatif yarı düzlemde kararlı durumda olması için ikinci derece sürekli hal Telgraf denklemlerinin gerilim eşitliği Denklem 3' de ve akım eşitliği Denklem 4' te gösterildiği gibi yazılır:

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} + \omega^2 LC.V(x) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} + \omega^2 LC.I(x) = 0 \quad (4)$$

Eğer R ve G ihmal edilmezse Telgraf denklemleri, ray devresi bloğundaki gerilim sönümlemesi Denklem 5' de akım sönümlemesi Denklem 6' daki gibi gösterilir.

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = \gamma^2 V(x) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} = \gamma^2 I(x) \quad (6)$$

Ray devresindeki Propagasyon (Yayımla) sabiti Denklem 7' de, karakteristik empedansı ise Denklem 8' deki denklem ile bulunmaktadır.

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (7)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (8)$$

Sınır koşullarından belirlenen $V_{(\pm)}$ sabiti olmak üzere, logaritmik eşitliklerden yola çıkılarak ray devresi bloğundaki $V(x)$ ve $I(x)$ eşitliklerinin çözümü Denklem 9 ve Denklem 10' da gösterilmiştir.

$$V(x) = V_{(+)}e^{-\gamma x} + V_{(-)}e^{+\gamma x} \quad (9)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_0} (V_{(+)}e^{-\gamma x} - V_{(-)}e^{+\gamma x}) \quad (10)$$

$x=0'$ da başlayan ve pozitif x yönünde ilerleyen bir $V_{in}(t)$ gerilimi için, belirli bir z noktasında iletilen gerilim $V_{out}(z, t)$, $V_{in}(t)$ ' nin Fourier Dönüşümünün, $\tilde{V}(w)$, hesaplanması ardından frekans bileşenlerinin $e^{-Re(\gamma)z}$ ile sönümlenmesi, fazın $-\text{Im}(\gamma)z$ kadar ötelenmesi ve son olarak ters Fourier Dönüşümü uygulanması ile hesaplanabilir. γ' 'nin reel ve imajiner bileşenleri, atan2 iki değişkenli tanjant tersi olmak üzere reel bileşen Denklem 11, imajiner bileşen Denklem 12' de açıklanmış olup Propagasyon (Yayımla) sabitinin reel ve imajiner kısımları Denklem 13 ve Denklem 14' deki halini almıştır.

$$a \equiv w^2 LC \left[\left(\frac{R}{wL} \right) \left(\frac{G}{wC} \right) - 1 \right] \quad (11)$$

$$b \equiv w^2 LC \left(\frac{R}{wL} + \frac{G}{wC} \right) \quad (12)$$

$$Re(\mathbb{Z}) = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \cos\left(\frac{\text{atan2}(b, a)}{2}\right) \quad (13)$$

$$Im(\mathbb{Z}) = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \sin\left(\frac{\text{atan2}(b, a)}{2}\right) \quad (14)$$

Küçük kayıp ve yüksek frekanslarda ray devresi bloğundaki indüktif reaktans artıp kapasitif reaktans azalır ve propagasyonun reel kısmı için Denklem 15 imajiner kısmı için Denklem 16 elde edilir.

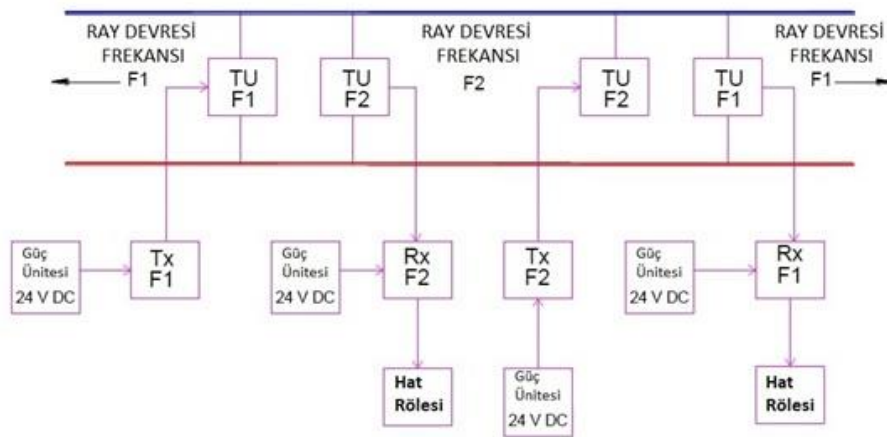
$$Re(\mathbb{Z}) \approx \frac{\sqrt{LC}}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right) \quad (15)$$

$$Im(\mathbb{Z}) \approx w\sqrt{LC} \quad (16)$$

Fazdaki $-w\delta$ kadar değişimin zamanda δ kadar öteleme anlamına geldiği dikkate alındığında $V_{out}(t)$ Denklem 17' deki gibi ifade edilir.

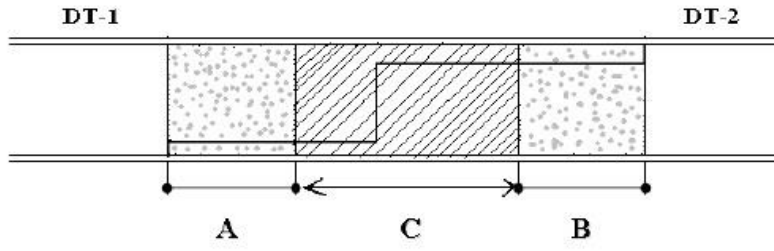
$$V_{out}(x, t) \approx V_{in}(t - \sqrt{LC}x) e^{-\frac{\sqrt{LC}}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right) x} \quad (17)$$

Şekil 4' de gösterilen ses frekanslı eksiz ray devresinde blok oluşturmak için kullanılan frekansların karışmaması için iki ray arasında I Bond ve S Bond dediğimiz kısa devreler yapılmaktadır. Kullanılan S ve I Bondların sağında ve solunda yer alan blokların, frekansları bond çevresinde oluşturulan ölü bölge ile karışması engellenir.



Şekil 3. Ses frekanslı ray devresinin blok diyagramı [9]

Örtüşme bölgesi, 0,15 Ohm dirençle şönt edildiğinde her iki Ses frekanslı ray devresi rölesinin düştüğü ayarlı bölgenin kısmıdır Şekil 5' de iki ray devresinin ölü bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 5. Ölü bölge gösterimi [12]

Burada A= DT-2 Ray devresinin şöntsüz bölgesi, B= DT-1 Ray devresinin şöntsüz bölgesi ve C=DT-1 ve DT-2 Ray devresinin şöntlenme (örtüşme) bölgesidir.

Sonuç olarak, 1970'lerden beri hem DC hem de AC demiryolu uygulamalarında modern ekipman için bu etkilerin ayrıntılı olarak anlaşılması konusunda kapsamlı bir gelişme olmuştur. Eşdeğer devreler olarak, karmaşık iletken girişim problemini ayrı ayrı analiz edilmek üzere birkaç parçaya ayıran bir iletken girişim kuplaj modeli geliştirilmiştir. Alt istasyonlar, cer sürücüler, hat sinyalizasyon ekipmanı, hat ve cer hattı içeren bir demiryolu cer sisteminin düşük ve ses frekanslı elektromanyetik parazit açısından birlikte değerlendirilmesini sağlayan hem elektromanyetik alan hem de devre simülasyon modelleri mevcuttur [13].

Ayrıca, geri dönüş iletkeninin etkileri hesaba katılarak, DC, AC ve Ses Frekanslı Ray devrelerinin parametreleri genişletilebilir [14,15].

2.1. Balast direnci

Balast direnci rayın bir tarafından diğer tarafına sızan sızıntı akımına karşı raylar altındaki balast taşlarının ve traverslerin göstermiş olduğu elektriksel direnç olarak tanımlanır. Raylar boyunca tahmin edileceği gibi sayısız kaçak ve sızıntı akım yolları vardır. Balast direnci 1000 metrelik bir uzunluktaki ray devresinde 1.2 Ohm' dan az olmamalıdır. 80-100 ohm' a kadar olan değerler balast direncinin yüksek olduğu değerler olmakla birlikte temin edilmesi zor olan değerlerdir [12].

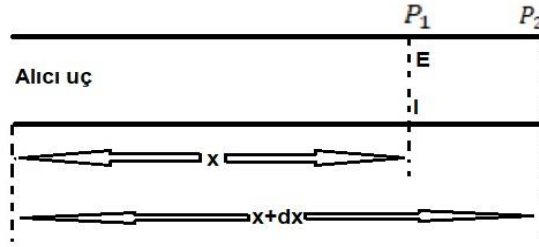
Ray voltajı, rölenin toplama voltajından önemli ölçüde daha yüksek değilse, en iyi koruma elde edilir. Ray devresinin balast direnci ve dolayısıyla hat voltajı da oldukça yüksekse (sınırlayıcı bir durumda raylar arasında tam izolasyon), eşlik eden ray rölesinin bir tren raya girer girmez düşmesi şartını karşılamak için ekstradan düşük değerli dirençler sisteme eklenebilir [16].

AC Balast Direnci: Denklem 7 ve Denklem 8' deki Telgraf denklemlerinden yola çıkılarak Denklem 18' de Ray Empedansı ve Denklem 19' da Ray Admittansı denklemleri hesaplanır [11].

$$Z = R + j\omega L \text{ } [\Omega/m] \quad (18)$$

$$Y = G + j\omega C \text{ } [1/\Omega m] \quad (19)$$

Ray devresinin kısmi bir bloğunun incelemek gerekirse, Şekil 6' dan yola çıkılarak birim miktarda akım ve gerilim eşitlikleri hesabı yapılır.



Şekil 6. Ray Devresinde Gerilim ve Akımın Şematik Gösterimi [11]

Ray devresi bloğundaki gerilim ve akım ölçümü için seçilen herhangi bir nokta olan P_1 ' de: gerilim ve akım E, I olarak verilir.

AC balast direnci hesabı için seçilen herhangi bir P_2 noktası için $E+dE, I+dI$ veya $E + \frac{dE}{dx} dx$, $I + \frac{dI}{dx} dx$ değerleri geçerlidir. Bu dx parçasındaki gerilim düşümü ile kaçak akımı Denklem 20 ve Denklem 21'de gösterilmiştir.

$$dE = IZdx \rightarrow \frac{dE}{dx} = IZ \rightarrow \frac{d^2E}{dx^2} = Z \frac{dI}{dx} = EYZ \quad (20)$$

$$dI = EYdx \rightarrow \frac{dI}{dx} = EY \rightarrow \frac{d^2I}{dx^2} = Y \frac{dE}{dx} = IYZ \quad (21)$$

Empedans ve Admintans dönüşümlerinden;

$\Upsilon \frac{d^2E}{dx^2} = \alpha^2 Ae^{\alpha x}$ ve $E = Ae^{\alpha x}$ dersek; $\frac{d^2E}{dx^2} = E\alpha^2$ $\frac{d^2E}{dx^2} = YZAe^{\alpha x}$ ve dolayısıyla Denklem 22 elde edilir.

AC balast direnci için α propagasyon sabiti seçilmek üzere;

$$\alpha^2 = YZ \quad \alpha = \pm\sqrt{YZ} \quad (22)$$

AC balast direnci için bulunan değerler akım ve gerilim cinsinden matris formuna dönüşümünde denklem 23 ve 24' de gösterilen A, B, C ve D katsayıları kullanılır.

$$E = Ae^{\pm\sqrt{YZ}x} = Ae^{-\sqrt{YZ}x} + Be^{\sqrt{YZ}x} \quad (23)$$

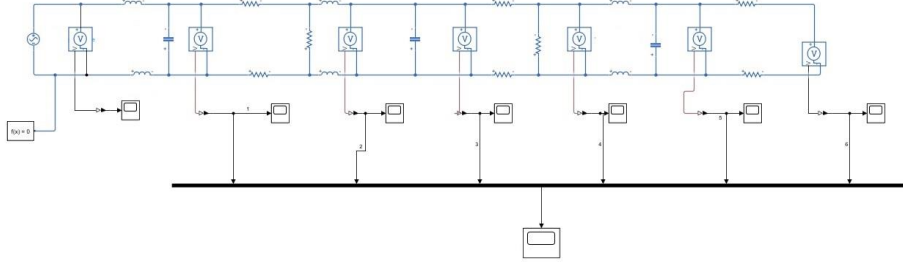
$$I = Ce^{\pm\sqrt{YZ}x} + De^{\sqrt{YZ}x} \quad (24)$$

Şebeke frekansında AC ray devreleri kullanıldığı takdirde, raylar arasındaki C kapasitesi ihmal edilebilir. Fakat yüksek frekanslı ray devrelerinde bu kapasitenin dikkate alınması gerekir. Kapasitif değer hatta etkisinden dolayı ters yansıma hesabı [17] yapılmamıştır ve mevcut ray devresi hattımız her ne kadar transmisyon hattı olsa da çevresel koşullar [18] dikkate alınmamıştır.

DC Balast Direnci: DC ray devresinde balast direnci, izole cebireler arasında paralel ve seri bağlanmış dirençlerden oluşan bir elektrik devresi özelliğindedir. Bu uzun devre üzerine düşen gerilim her iki uçtaki gerilimlerin yarısı olarak alınır. Besleme ve role tarafında ölçülen akımların farkı ise ray devresinden geçen akım olarak kabul edilebilir [12]. Ayrıca, balast direnci hava durumuna göre değiştiğinde faz açısı da değişir. Bu etkiler, DC ray devresinin verimli ve güvenli bakımı için problemler yaratır [9].

3. Bulgular

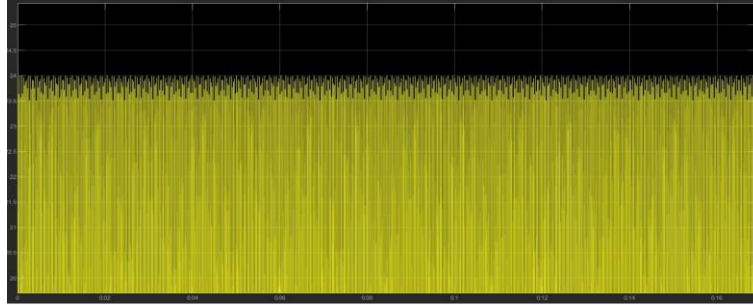
R, L ve C hat boyu parametrelerine rastgele değer verilerek Şekil 7’ de 24 volt 4500 Hz frekanslı gerilim kaynaklı (Tx) ray devresinin 3 bloklu (1,3,5) şeması çizilmiştir.



Şekil 4. 4500 Hz frekanslı ray devresinin şematik gösterimi [17]

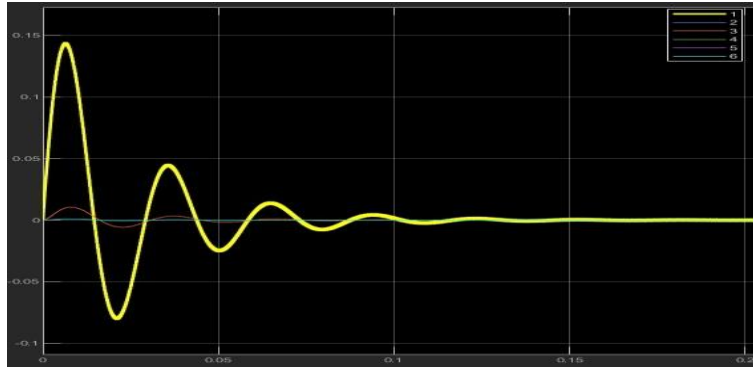
Yapılan çalışmada geri dönüş iletkeni ve hatta bulunan aktif elemanların ters yansımaları ve rayların birleşim yerlerindeki geçişlerde (conta, kaynak geçişlerinde) meydana gelebilecek rezonanslar [19] hesaba katılmamıştır. Söz konusu şema ile TCDD 1. Bölge Müdürlüğü Gebze-Köseköy mntkasında kullanılan 4500 ve 9500 Hz ses frekanslı ray devresi simülasyon ortamında incelenmiştir [20].

Dikey eksen gerilim yatay eksen zaman olan Şekil 8’ de uygulanan 24 voltluk transmitterin taşıyıcı frekansı 4500 Hz gösterilmiştir.



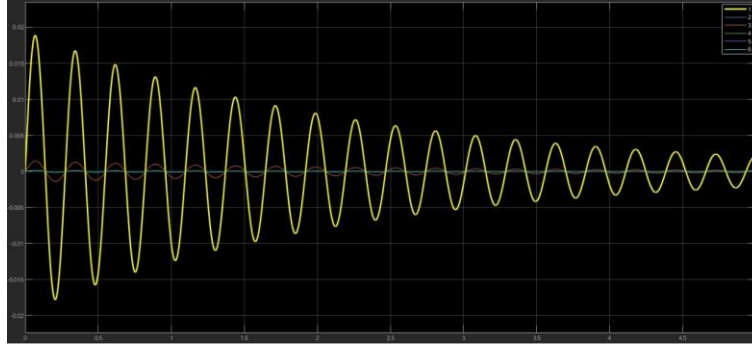
Şekil 5. Transmitter kısmında uygulanan modüleri sinyal

Dikey eksen gerilim (Volt) yatay eksen zaman (saniye) olan Şekil 9’ da 1, 3 ve 5 numaralı oluşturulan bloklardaki simülasyona ait osiloskop görüntüsü görülmektedir. Osiloskop görüntülerinden de anlaşılacağı üzere taşıyıcı sinyalin propagasyonu hattın uzunluğuna göre kademeli olarak azalmaktadır.



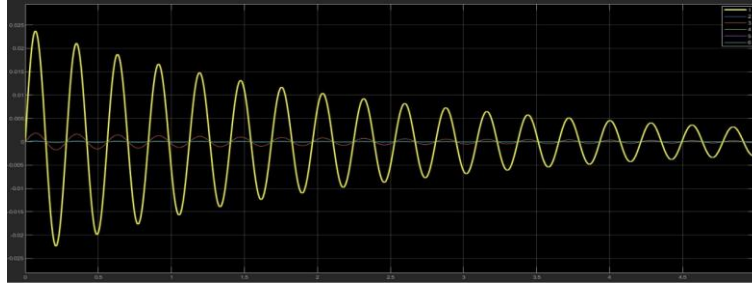
Şekil 9. Bloklara göre ses frekansının sönümlenmesi

Dikey eksen gerilim (Volt) yatay eksen zaman (saniye) olan Şekil 10' da, Transmitterden uygulanan sinyal taşıyıcı frekansı 4500 Hz olan ray devresinin daha uzun bloklar oluşturabilmesi için iki ray arasına ray devresini dengeleyen kapasitörlerin takılması veya mevcut kapasite değerinin artırılması ile sönümlenmesinin azaldığı ve propagasyonunun arttığı görülmüştür.



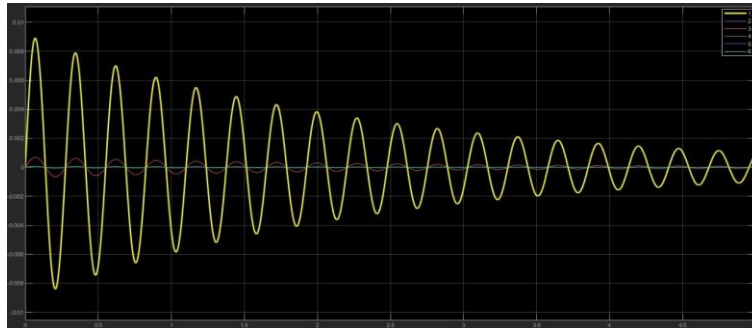
Şekil 10. 4500 Hz ray devresinin giriş kapasitesinin yükseltilmesi

Dikey eksen gerilim (Volt) yatay eksen zaman (saniye) olan Şekil 11' de kullanılan 4500 Hz, 3500 Hz' e indirilmiştir. Frekansın indirilmesine istinaden hat değerleri aynı kalmasına rağmen taşıyıcı sinyalin genliğinde 0,02 Volt' dan 0,025 Volt' a artış meydana gelmiştir ve buna istinaden propagasyon değeri yükselmiştir.



Şekil 6. 3500 Hz kısa ray devresi

Dikey eksen gerilim (Volt) yatay eksen zaman (saniye) olan Şekil 12' de ise ray devresi frekansı 9500 Hz' e yani kısa ray devresi bloğu frekansına çıkarılmıştır. Ray devresinin transmitterden genliği değişmemesine rağmen 1 numaralı bloktaki genliğin 0.01 Voltun altına düşmesi gözlemlenmiştir.



Şekil 7. 9500 Hz kısa ray devresi

4. Sonuç

Bu çalışmada, Telgraf denklemleri temelinde dayandırılarak Ray Devresi blokları matematiksel olarak gösterilmiştir. Ses frekanslı ray devrelerinin frekansının artması ile blok mesafesi arasındaki ilişki yapılan simülasyon ile doğrulanmıştır. Hat boyunda kullanılan ray devrelerine ait parametreler çevresel koşullardan, katener indüksiyonundan ve geri dönüş iletkeni gibi sistem parçalarından etkilendiği bilinmektedir.

Yapılan simülasyonlarda, çevresel koşullara göre değişen ray devresi parametrelerini ayarlama üniteleri (TU-Tuning Unit) üzerinden yapılması öngörülmüştür. Ray devresi ayarlarının, sadece teknik binalarda bulunan transmitter ve receiver üniteleri üzerinden yapılması ile simülasyonun doğru sonuçlar vermediği gözlemlenmiştir. Bu sorunun sebebi olarak kullanılan teknik binadan hat boyu ayar ünitesi kutularına giden ray devresi kablolarının yapısı gösterilebilir. Söz konusu hatta bu sorunun yaşanmaması için tüm kablolar her bir sisteme ayrı ayrı çekilmiştir. Simülasyon sonuçları ile Gebze-Köseköy Hattında neden çoklu pere sahip kablo kullanılmadığı anlaşılmış ve doğrulanmıştır. Ray devresinin doğru çalışabilmesi için transmitter kısmında yüksek kapasite ve düşük direnç değerleri istendiği ortaya çıkmıştır. Bu değerlerin sağlanabilmesi için özellikle transmitter ünitesinin bulunduğu ray bölgesinde geri dönüş ve katener topraklamasının iyi yapılması gerekmektedir.

Gelecek çalışmalarda üzerinde çalışılacak hattın kablolar üzerindeki redüksiyon faktörü göz önüne alınarak ve güç analizörü kullanarak hatta oluşan harmonik bozunumlara karşı ray devresinin tepkisinin ölçülmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Bölgemiz mühendislerinden, mesleki bilgisini bizlerden esirgemeyen TCDD 1. Bölge Modernizasyon Servis Müdürlüğü Baş Mühendisi Gürsel H.ÇELEBİ ve Bakım Servis Müdürlüğü Kontrolörü Ahmet COŞAR' a teşekkürü bir borç bilirim.

Kaynakça

- [1] J. Bell, Lecture of Pde_Notes, Chapter 7, University of Maryland, 2022.
- [2] J. Wang, H. Zhang, R. Kang and P. Xu, "An adaptive dynamic coding method for track circuit in a high-speed railway" in *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 188-199, May-June 2022, doi: 10.1109/MITS.2021.3049376.
- [3] Y. Shang, F. Yan, S. Feng and Z. Wang, "Fault diagnosis of compensation capacitor in joint-less track circuit via long short-term memory network" *2021 China Automation Congress (CAC)*, 2021, pp. 3644-3649, doi: 10.1109/CAC53003.2021.9727388.
- [4] V. Havryliuk, "Model of propagation of traction current harmonics from trains to a track circuit receiver" *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/APEMC49932.2021.9597152.
- [5] J. Feng, J. G. Cao and Z. H. Wu, "Analysis and research on electromagnetic compatibility of high speed railway traction current harmonics to track circuit" in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1-4, Nov. 2021, Art no. 0600904, doi: 10.1109/TASC.2021.3090347.
- [6] H. He, W. Deng and D. Meng, "Research on track circuit monitoring data processing method based on dig data" *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2020, pp. 7510-7515, doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327086.
- [7] Wikipedia, "Telegrapher's equations", 2022.[Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Telegrapher%27s_equations#:~:text=The%20telegrapher%2

- 7s%20equations%20(or%20just,line%20with%20distance%20and%20time. [Accessed: 17-April-2022].
- [8] Siemens, Clearguard TCM 100 track vacancy detection system, Datasheet, 2022.
- [9] Indian Railway Institute of Signal Engineering and Telecommunications, Secunderabad-500-017, March 2013.
- [10] K. H Rahouma, S. Ahmed, “A mathematical model for detection of railway track cracks based on the track signalling system” in *Egyptian Computer Science Journal* Vol. 44 No.2 May 2020 ISSN-1110-2586.
- [11] V.K. Babacan, “Raylı sistemlerde sinyalizasyon tekniği”. TCDD:1. Bölge Tesisler Müdürlüğü, 2010
- [12] Government Of India, Ministry Of Railways, Maintenance Handbook On Audio Frequency Track Circuit, Camtech/S/Proj/2013-14/Hb-Aftc.2.0, May 2013.
- [13] J. Zhang, W. Oghanna, F. Flinders, W. Craig, “Simulator of track circuit for urban/suburban transit system”, in *Transactions on the Built Environment* vol 30, © 1997 WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3509
- [14] Z. Mazloom; N. Theethayi; R. Thottappillil, “Modeling indirect lightning strikes for railway systems with lumped components and nonlinear effects” in *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, Vol. 53, No. 1, February 2011.
- [15] Z. Mazloom. “Multi-conductor transmission line model for electrified railways: A method for including responses of lumped devices” Ph.D. . Elect. Eng., Kungliga Tekniska högskolan (KTH), 2010.
- [16] B. Lejdström, S. “Calculation of geomagnetic interference voltages in track circuits”, Svensson Infrastructure Resilience Research Group, Vol 1, Issue 10, June 2020.
- [17] M. İ. Pençe, “1-boyutlu iletim hatlarında empedans kestirimi”, Yüksek Lisans Tezi, Bilişim Enst. İletişim Sistemleri Bölümü, İTÜ, 2019.
- [18] E. Krausmann, E. Andersson, T. Russell, W. Murtagh “Space Weather and Rail: Findings and Outlook” European Commission Joint Research Centre Institute for the Protection and Security of the Citizen, JRC science and policy reports, 16-17 September, 2015, London, UK.
- [19] Sümbül, H., Böğrek A., Tunçer, A., (2021) “Demiryolu Ulaşım Güvenliği için Makinist Uyarım Sistemi Kavramsal Tasarımı ve Simülasyonu” *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*. 14: 1-13. <https://doi.org/10.47072/demiryolu.832113>
- [20] Mathworks, MA, USA. *MATLAB documentation*, 2019a version, MSÜ-HUTEN lab. 2022.

Özgeçmiş



Yasin KOÇAK

Yasin KOÇAK 1986 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliğinde, Yüksek Lisans Eğitimini İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde tamamlamıştır. TCDD Genel Müdürlüğü 1. Bölge Bakım Servis Müdürlüğünde çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları Demiryolu Sinyalizasyonu ve Haberleşmesidir.
E-Posta: yasinkocak@tcdd.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Raylı Sistem Araçlarının Koşum Takımı Üzengisi için Topoloji Optimizasyonu Uygulaması

Emre ULUSOY¹, Mert İSTEK¹, Mustafa GÜNAY^{*2}

¹ Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, Türkiye

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

*mgunay@karabuk.edu.tr

(Alınış/Received: 31.05.2022, Kabul/Accepted: 30.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Yük ve yolcu taşımacılığında kullanılan raylı sistem araçlarının (vagon, lokomotif, tren vb.) birlikte hareket edebilmesini sağlayan bağlantı ekipmanlarının genel adı koşum takımıdır. Koşum takımları, araçlara gelen statik yüklerin iletimini sağlamanın yanı sıra elektriksel ve hava bağlantılarının aktarılmasında görevli olup, sistemi oluşturan elemanların tasarımı ve imalatı çeşitli standartlara göre yapılmaktadır. Diğer yandan, lojistik sektöründe daha hızlı ve aynı zamanda güvenli taşımacılık açısından araçları oluşturan tüm parçaların hafifletilmesi önemlidir. Bu çalışmada, minimum ağırlıkta ve yüksek performanslı parçaların tasarımında etkili bir araç olan topoloji optimizasyonu ile koşum takımı elemanlarından üzenginin tasarımı iyileştirilerek ağırlığının azaltılması hedeflenmiştir. Topoloji optimizasyonunda yoğunluk yöntemi olarak da bilinen cezalandırılmalı katı izotropik malzeme (SIMP) yönteminden faydalanılmıştır. Öncelikle, standarda uygun olarak modellenen koşum takımı üzengisine 120 kN ve 150 kN yükleme durumları için sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Daha sonra, topoloji optimizasyonu ile geliştirilen model için aynı şartlarda FEA uygulanarak gerilme dağılımları ve yer değiştirme miktarları karşılaştırılmıştır. Her iki yükleme durumu için en yüksek Von Mises gerilmesi sırasıyla 176,30 MPa ve 220,40 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca, yeni tasarım üzengiler için en yüksek yer değiştirme miktarları 0,23 mm ve 0,28 mm olarak hesaplanmış olup, bu değerler ilgili standartta belirtilen sınırlar içindedir. Sonuç olarak, topoloji optimizasyonu başarıyla uygulanarak üzenginin kütlesi %9,04 azaltılmıştır. Ayrıca, topoloji optimizasyonu ile geliştirilen model geometrisindeki karmaşıklıklardan dolayı üzenginin eklemeli imalat teknolojisiyle üretiminin daha elverişli olduğu kanaatine varılmıştır. Tüm sonuçlar, topoloji optimizasyon metodolojisinin raylı sistem araçlarının ağırlığının azaltılmasında güvenle uygulanabileceğini ve böylece sürdürülebilirliğe önemli katkılar verilebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Koşum takımı, Topoloji optimizasyonu, SIMP yöntemi, FEA, Eklemeli imalat

Topology Optimization Application for Coupling Link of Rail System Vehicles

Abstract: Coupling link is the general name of the connection equipment that enables the rail system vehicles (wagon, locomotive, train, etc.) used in freight and passenger transportation to move together. Coupling links are responsible for the transmission of static loads coming to the vehicles, as well as the transfer of electrical and air connections, and the design and manufacture of the elements that make up the system are made according to various standards. On the other hand, it is important to lighten all the parts that make up the vehicles in terms of faster and at the same time safe transportation in the logistics sector. In this study, it is aimed to reduce the weight by improving the design of the coupling link, which is one of the hook coupling elements, with topology optimization. Penalized solid isotropic material (SIMP) method, also known as density method, was used in topology optimization. Firstly, finite element analysis was applied to the coupling link modeled in accordance with the standard for 120 kN and 150 kN loading conditions. Then, stress distributions and displacements were compared by applying FEA under the same conditions for the model developed with topology optimization. The highest Von Mises stresses for both loading conditions were obtained as 176,30 MPa and 220,40 MPa, respectively. In addition, the highest displacement amounts for the new design coupling links are calculated as 0,23 mm and 0,28 mm, and these values are within the limits specified in the relevant standard. As a result, the mass of coupling link was reduced by 9,04% by successfully applying the topology optimization. In addition, it has been concluded that the coupling link is more convenient to manufacture with additive manufacturing technology due to

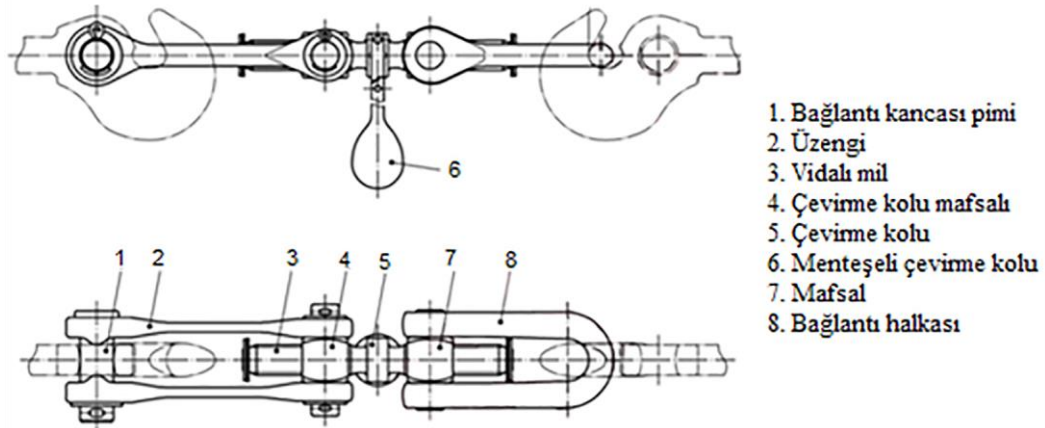
Atıf için/Cite as: E. Ulusoy, M. İstek, M. Günay, "Raylı sistem araçlarının koşum takımı üzengisi için topoloji optimizasyonu uygulaması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 139-152, July. 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1123977

the complexity in the geometry of the model developed with topology optimization. All results show that the topology optimization methodology can be safely applied in reducing the weight of rail system vehicles, thus making significant contributions to sustainability.

Keywords: Coupling link, Topology optimization, SIMP method, FEA, Additive manufacturing

1. Giriş

Raylı sistemlerde yolcu ve yük taşımacılığı her geçen gün gelişen bir lojistik sektörü olup, teknolojik gelişmeler ile birlikte taşımacılığın daha hızlı ve güvenli yapılması hedeflenmektedir. Bu sektörde araçlar (vagon, lokomotif, tren vb.), çeken-çekilen ve birleşik setler halinde hizmet vermektedir. Bu araçların birbirine bağlanması ve araçlar arasında hareket-fren kuvvetlerinin aktarılması için çeşitli bağlantı ekipmanları veya koşum takımları kullanılır [1]. Bu ekipmanlar, özellikle çeken-çekilen araçlar arasında hareketin doğrudan aktarılmasını sağlamakta olup, genellikle statik yüklere maruz kalmaktadır [2]. Koşum takımları, diğer adıyla cer tertibatları bu görevlerine ek olarak araçlarda çarpışmayı önleyebilmek amacıyla tampon görevi, elektriksel ve hava bağlantılarının aktarılması gibi işlemlerde görev almaktadır. Bu tertibatlar genel olarak kanca kavramalı, yarı otomatik ve tam otomatik olmak üzere üç farklı sistematığe sahiptir. Kanca kavramalı koşum takımı manuel olarak çalıştırılan mekanik bir yapıda olup, araçlar arası bağlantı ve ayrılma işlemlerinin bir görevli tarafından gerçekleştirildiği tertibatlardır. Yarı otomatik sistemde, iki araç birbirine yaklaştığında otomatik olarak bağlantı işlemi gerçekleşirken, ayrılma işlemi ise bir görevli tarafından yapılır. Tam otomatik sistemlerde, bağlantı işlemi iki araç belirli bir mesafede birbirine yaklaştığında, ayrılma işlemi ise araç içindeki butonlar yardımıyla otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Yani, vagon, lokomotif, tren vb. demiryolu araçları/birimleri tamamen durdurulmadan birbirlerine bağlanabildiği için bu sistemler dinamik koşum takımları olarak da isimlendirilmektedir [3]-[5]. Raylı sistem araçlarının birleştirilmesini sağlayan kanca kavramalı koşum takımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların bağlantı ve/veya ayrıştırılması için ilave demiryolu personeline ihtiyaç vardır [6]. Kanca kavramalı koşum takımı, temel olarak; kanca, bağlantı üzengisi, vidalı mil, çevirme kolu ve bağlantı halkası elemanlarından oluşmaktadır. Şekil 1’de kanca kavramalı koşum takımının ana kısımları gösterilmiştir.



Şekil 1. Kanca kavramalı koşum takımı [7]

Demiryolu araçlarını birbirine bağlayan sistem çekme dişlisi, çekme kancası ve koşum takımından oluşur. Demiryolu aracının çekme kancasıyla bağlanmasında kullanılan mekanik sistem ise koşum takımınıdır. Raylı sistem araçlarının işletimleri sırasında oluşan frenleme, hızlanma, çarpışma vb. durumlarda, koşum takımı elemanları çeşitli statik ve/veya dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bu yükler, aynı zamanda tampon görevi üstlenen koşum takımı elemanları üzerinde sönümlenmeye maruz kalır [7]. Bu bağlamda, koşum takımı elemanları en

kritik yapı parçaları olarak düşünülmekte olup, elemanların güvenilirliği ön plana çıkmaktadır [8]. Bununla birlikte, demiryolu taşımacılığının artmasıyla trenler daha hızlı seyahat etmekte ve daha fazla insan ve/veya eşya taşımakta ve bu nedenle güvenilirlik daha da önemli hale gelmiştir. Trende meydana gelen herhangi bir arıza, önemli maddi kayıplara ve en kötü durumda can kaybına bile neden olabilir [9]-[11]. Koşum takımı elemanları EN15566 standardında belirtilen mukavemet ve ölçü toleranslarında çeşitli çelik malzemelerden dövme ve talaşlı imalat yöntemleri uygulanarak üretilmektedir. Ancak, endüstriyel ürünlerin hammaddeden kullanılabilir duruma gelmesinde uygulanan tüm süreçler sürdürülebilirlik açısından gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu noktada, malzeme, tasarım ve imalat yöntemi gibi parça maliyetine doğrudan etki eden faktörlerin iyileştirilmesi günümüz araştırma-geliştirme faaliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Sürdürülebilirlik ve maliyetlerin düşürülmesi açısından, parça tasarımı sırasında öncelikle kullanılan hammaddenin azaltılması hedeflenmektedir. Aynı zamanda, genellikle tasarlanan parçaların ve/veya sistemlerin en düşük hacimle en iyi mukavemeti göstermesi beklenmektedir [12]. Bu performans kriterleri kapsamında parçaya uygulanacak olan optimizasyonlar ile oluşturulan yeni parçanın en az malzeme kullanılarak sürdürülebilirliğe katkıda bulunması amaçlanır. Bu hedeflere ulaşmak için yapılabilecek uygulamalardan birisi topoloji optimizasyonudur [13]. Topoloji optimizasyonu (TO), aynı zamanda boyut ve şekil optimizasyonunu da içerdiğinden, yapısal tasarımda kullanılacak en kapsamlı yöntemdir [14]. TO, çeşitli tasarım parametrelerinin ele alınmasıyla optimize edilmiş bileşenler üretme sürecidir. Tasarım sırasında, optimal geometriler oluşturmak, maliyeti düşürmek ve tasarım hatalarının ortadan kaldırılması hedeflenir. Diğer yandan, geleneksel işleme süreçlerine kıyasla daha karmaşık CAD modelleri kullanılarak ürünün katman-katman oluşturulduğu eklemeli imalat (AM) teknolojisi TO sürecinin tamamlayıcı bir parçası haline gelmiştir. TO'nun eklemeli imalat teknolojileri ile entegrasyonu, montajdaki parça sayısını azaltarak hafif parçalar geliştirilmesi, bunun karşılığında maliyetin düşürülmesi ve malzemeden tasarruf edilmesini sağlamaktadır [15]. Öte yandan eklemeli imalat, yedek parça üretimi için gelecek vaat eden bir teknolojidir. Bunun nedeni, AM'nin takımlama gerektirmeden kısa sürede doğrudan üç boyutlu dijital modellerden parçaların üretilmesine izin vermesidir [16]. Bu teknoloji, geleneksel yöntemler kullanılarak parçaların üretilmesi için takımlama maliyetlerini ve süresini veya parçanın dış kaynak kullanımıyla ilişkili lojistik maliyetleri ve aksama süresini ortadan kaldırır. Yedek parçaları AM ile üretime uygun hale getiren farklı özellikler arasında değişken talep, teslimat süresinin kısaltılması ihtiyacı ve düşük hacimli üretim yer almaktadır [17].

Demiryolu araçları ve demiryolu altyapısı, yedek parçalar, hafif yapılar, bağlantı elemanları, fiktürler ve parça montajlarının yeni tasarımlarını oluşturmada ileri teknolojiden yararlanabilecek çok sayıda sistem ve bileşeni içerir. Bu bağlamda, eklemeli imalat teknolojileri malzeme değişimi, topoloji optimizasyonu ve montaj-parça konsolidasyonu yoluyla hafif yapıların yanı sıra eski tasarım sistemlerde yedek parça üretimi veya hasarlı parçaların tamirati için imalat maliyetlerini ve teslim süresini azaltmaya yardımcı olmak için demiryolu endüstrisinde kullanılabilir. Özellikle, hafiflik oluşturmak için montaj parçası konsolidasyon yöntemleri ve topoloji optimizasyon teknikleri hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır [18], [19]. Bu kapsamda, raylı sistemlerde topoloji optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Bahadır [20], hafif raylı sistem aracı olan tramvayın çarpışma sönümleyici elemanın EN 12663 standardı kapsamında yapısal analizlerini gerçekleştirmiştir. Hyperworks programı ile konstrüksiyon yapının statik analiz, topoloji ve şekil optimizasyonları neticesinde gerilme ve yer değiştirme miktarları değişmeden %24,1 daha hafif bir tasarımı ortaya çıkarmıştır. Emre [21], formula yarışlarında kullanılan araçların ağırlıklarını azaltmak için fren pedallarında topoloji optimizasyonu uygulamıştır. 7075-T6 alüminyum alaşımından tasarlanan fren pedalı ilk tasarıma göre %11,65 oranında hafifletilmiştir. Wahid vd. [22], statik yüklem koşullarında dar hatlı bir demiryolu için optimum malzeme kullanımına sahip yenilikçi bir kompozit travers tasarım çalışması yapmış ve burada topoloji optimizasyonunu kullanmışlardır.

Hyun-Ah vd. [23], haddelenmiş alüminyum panellerden yapılacak bir demiryolu araç gövdesinin tasarımını ele almış ve alüminyum esaslı gövdenin kalınlık dağılımını ve kaburga şeklini tasarlamak için yapısal optimizasyona dayalı bir tasarım süreci önermiştir. Kuczek [24], gerilme ve üretim gereksinimlerini karşılayan standartlaştırılmış, ince duvarlı, kapalı çelik profillerden yapılmış modern raylı araç yapıları için yeni bir tasarım kavramı sunmuştur. Bu amaçla, Altair-Optistruct yazılımı ile bir yük vagonunun topoloji optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Metodolojinin, varsayılan imalat kısıtlamalarını karşılayan optimal yapı tasarımını elde etmek için yararlı bir araç olduğu ve diğer ince duvarlı araç yapısı türlerine kolayca genişletilebileceği belirtilmiştir. Muvunzi vd. [25], kuvvet aktarımı, akustik ve titreşim yalıtımının sağlanmasına yardımcı olan bir boji sistemi bileşeninin (çekme parçası) tel ark eklemeli imalat (WAAM) ile farklı malzemeler (AA7075, paslanmaz çelik, Ti6Al4V) için üretilebilirliğini araştırmıştır. WAAM süreci öncesinde, parçanın ağırlığını azaltmak, fonksiyonel performansı ve hizmet ömrünü iyileştirmek için FEM tabanlı tasarım ve analiz metodolojisi uygulanmıştır. WAAM ile parça üretimine AA7075 ve Ti6Al4V alaşımlarının daha elverişli olduğu ve demiryolu endüstrisi için sürdürülebilir yedek parça üretimini sağlamak için bu teknolojinin uygulanabileceği vurgulanmıştır.

Literatür değerlendirildiğinde, topoloji optimizasyon metodolojisi kullanılarak raylı sistem araçları veya sistem elemanları üzerine sınırlı sayıda araştırmanın yapıldığı görülmekte olup, eklemeli imalat teknolojilerinin demiryolu endüstrisinde kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Bu bağlamda, hem ilgili sektör firmaları ve akademik çalışmalara katkı vermek hem de sürdürülebilirliğe katkı sağlamak amacıyla topoloji optimizasyonu ile koşum takımı üzengisi modellenmiş ve eklemeli imalat için uygunluğu araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Birçok endüstriyel alanda mühendislik tasarımları için üç boyutlu (3B) parça modelinin oluşturulması ve sonlu elemanlar analizine (FEA) dayalı ürün tasarımı ve optimizasyon süreci yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, raylı sistem araçlarının birlikte hareketini sağlayan cer tertibatlarından, kanca kavramalı koşum takımının bir parçası olan üzenginin (coupling link), SolidWorks ortamında 3B tasarımı oluşturulmuş, yoğunluk tabanlı yöntemden türetilen SIMP yöntemi ile topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, tasarlanan parçanın sonlu elemanlar yöntemi esaslı mukavemet analizleri için SolidWorks programı statik analiz modülü kullanılmış ve eklemeli imalatla teknolojisıyla üretilebilecek yeni bir tasarım elde edilmiştir. Koşum takımı üzengisinin boyutları UIC 520 standardı esaslı olup, bu standartta tasarım için gerekli tüm ölçüler mevcut değildir. Bu nedenle, tasarım için eksik olan ölçüler Şekil 2’de gösterilen gerçek parça üzerinden alınarak üzengi modeli tamamlanmıştır.



Şekil 2. Koşum takımı üzengisi

2.1. Topoloji optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, yapısal tasarım problemlerine en iyi kavramsal çözümleri üretmek için kullanılan bir yöntemdir. Ana fikir, verilen sınır koşulları, yük durumları ve gereksinimler için tanımlanmış bir tasarım alanında malzeme yerleşimini optimize etmektir [26]. Yapıların mukavemetini ve doğal frekansını en az etkileyen kısımlar belirlenerek modelden çıkarılması gereken kısımlar tanımlanır. TO metodolojisinde, modelin düzenlenmesi sürecinde, parça üzerinde delik, çıkıntı, kanal vb. oluşturulması, yeni unsurların eklenmesi veya silinmesi gerçekleştirilir. Başka bir ifadeyle, matematiksel hesaplamalar kullanarak bir nesnenin geometrisini optimize eden bir tekniktir. Tasarımcılar, topoloji optimizasyon yazılımlarını kullanarak şekil üzerindeki baskıları analiz eder ve tasarımdaki gereksiz malzemeleri ortadan kaldırarak belirli yerlerde malzeme dağılımını optimize edebilir. Parçanın hangi alanlarının optimize edileceği, yük, deformasyon, rijitlik kısıtlamaları ve sınır koşulları gibi çeşitli gereksinimler ile belirlenir. Bu metodoloji ile parçanın işlevi değiştirilmeden kütlesi azaltılarak ideal geometride bir yapı sağlanır [15]. Bu nedenle, TO minimum ağırlıkta ve yüksek performanslı parçaların modellenmesi için uzay, havacılık, otomotiv, tıp gibi birçok sektörde etkili bir tasarım teknolojisi olarak kullanılmaktadır [27]. Böylece, topoloji optimizasyonu çeşitli mühendislik alanlarında güçlü bir kavramsal tasarım yöntemi olarak yerini almıştır. Diğer yandan, optimizasyon sürecinde elde edilen ideal geometrideki yapının bilgisayar destekli tasarım verisine dönüştürülmesi ve üretim yöntemi işlem parametrelerinin karmaşıklığı sebebiyle uygulamada zorluklarla karşılaşmaktadır [28]. TO sonucunda elde edilen modelin kullanıma hazır forma dönüştürülmesinin en kolay yolu, karmaşık geometriye sahip parçaların bile genellikle tek işlemde üretimini sağlayan eklemeli imalat teknolojilerinin uygulanmasıdır [12]. Ayrıca, topoloji optimizasyon tekniğinin eklemeli imalat sürecinde kullanılmasıyla optimize edilen parçanın prototip üretimleri yapılarak yapısal performansının analizi kolaylaşır [29] ve böylece mühendislik tasarımı süreci daha verimli olarak gerçekleştirilir [30].

Çeşitli yapıların topoloji optimizasyonunda önerilen yaklaşımlar bulgusal ve matematik esaslı yöntemler olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Genellikle daha sezgisel olan ve daha az matematiksel işlem içeren evrimsel yapı optimizasyonu (Evolutionary Structural Optimization (ESO)) ve çift yönlü evrimsel yapı optimizasyonu (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)) bulgusal yöntemlere, homojenizasyon yöntemi, seviye seti yöntemi ve cezalandırılmalı katı izotropik malzeme (Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)) yöntemi ise matematik temelli yöntemlere örnek olarak verilebilir [31]. Topoloji optimizasyonunda en yaygın kullanılan SIMP yönteminin temel hedefi, bir sonlu eleman ağı ile ayrıklaştırılmış, önceden belirlenmiş bir tasarım alanı içindeki malzemenin yoğunluğunu belirlemektir [29]. SIMP yönteminde ara yoğunluklar için cezalandırılmalı katı izotropik mikro elemanlar kullanılır. Bu yöntemde, eleman başına yalnızca bir serbest değişken kullanıldığında, depolama kapasitesi ve gereken bilgisayar işlemcisinin çalışma süresi açısından hesaplama verimliliği sağlanır. Ek olarak cezalandırma serbestçe ayarlanabilir. Bunun neticesinde hesaplama açısından en uygun cezalandırma kullanılabilir. Son olarak SIMP yöntemi, model üzerindeki mikro yapının homojenizasyonunu gerektirmez [32]. Burada, her sonlu eleman daha sonra değerleri 0 ile 1 arasında olan bir yoğunluk fonksiyonu $\rho(x)$ ile ilişkilendirilir. "0" bir boşluğu ve "1" bir katıyı belirtir. 0 ile 1 arasındaki değerler, delikli bir malzeme ara yapısı olarak yorumlanabilen ara yoğunluklar olarak adlandırılır. Belirli bir elemanın malzeme özellikleri yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak ele alındığında, eleman yoğunluğu tasarım değişkeni olarak yorumlanabilir. Böylece belirli bir tasarımın performansını ayarlamak için kullanılır ve bir katı ($\rho(x)=1$) malzeme özelliği ile elde ettiğimizi varsayalım. Young modülü E_s ile gösterilir ve ara yoğunluklara sahip elementlerin Young modülü $E_i=E_s \rho_i(x)$ ile verilir, burada 'i' alt indisi belirli bir elementi gösterir. Ara yoğunluklar pratikte gerçekleştirilemeyecek "yapay malzeme" olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, ara yoğunlukları her element için 0 veya 1 olarak temsil edilecek şekilde cezalandırarak bir tekniğin tanıtılması gerekmektedir. Bu, nihai tasarım alanının yalnızca

katıları ve boşlukları içereceği anlamına gelir. Bu nedenle, ceza faktörü ilave edilmiş bir SIMP yöntemini karakterize eden temel formül Denklem 1 ve Denklem 2’de verilmiştir [33]:

$$E_i = \rho_i(x)^p E_s \quad (1)$$

$$Vol = \int_{R^3} \rho(x)^x dx \quad (2)$$

Burada;

- E_i : Young modülünün tasarım alanındaki i 'inci ögesi,
- ρ_i : i 'inci ögesi için tasarım parametresi,
- p : Ara yoğunluklar için cezalandırma parametresi (genellikle, $p \geq 3$),
- E_s : Katı cismin Young modülü,
- Vol : Tasarım alanındaki dağıtılmış malzemenin toplam hacmi,
- R^3 : Üç boyutlu tasarım bölgesi,
- x : Bir malzeme elemanının merkezi için uzayda koordinat noktaları.

2.2. Tasarım ve analiz detayları

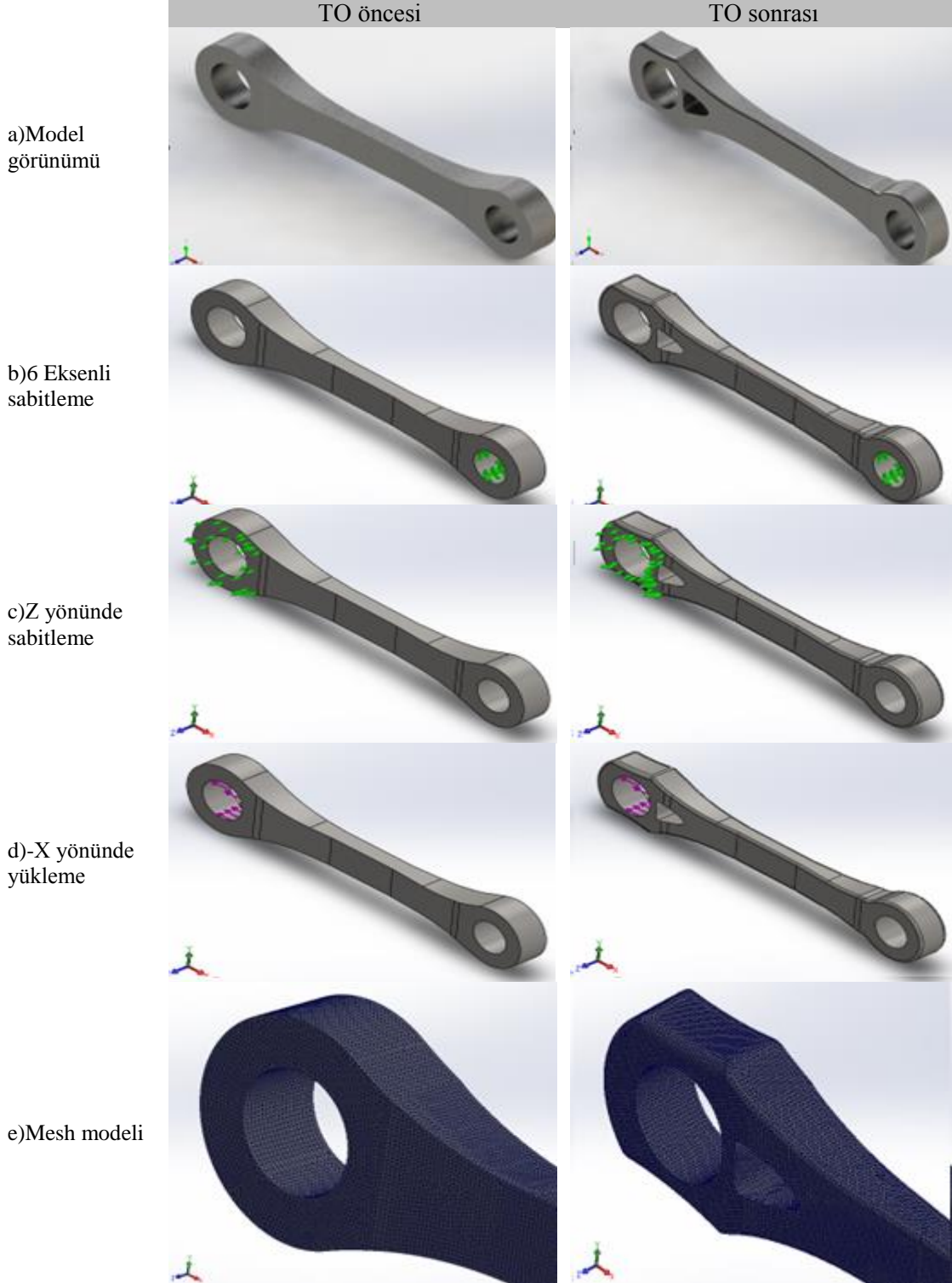
Bu çalışmada, raylı sistem araçlarının birlikte hareketini sağlayan bağlantı sistemlerinden birisi olan kanca kavramalı koşum takımı elemanı üzenginin (coupling link) ağırlığının azaltılması ve eklemeli imalat teknolojisiyle üretimine uygun tasarımına odaklanılmıştır. Bu bağlamda, parça tasarımı, kullanım şartları ve kriterlerine göre sonlu eleman analizleri (FEA) uygulaması, SIMP yöntemi esaslı topoloji optimizasyonu, yeni tasarımın FEA analizi ve kontrolü şeklinde bir çalışma planı uygulanmıştır. İlk olarak, Şekil 1’de gösterilen üzenginin 3B tasarımı SolidWorks programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, mevcut modelin EN 15566 standardında [7] belirtilen yükleme şartlarına göre sonlu elemanlar yöntemi esaslı statik mukavemet analizi yapılmıştır. Bu süreçte, sonlu elemanlar analizinde gerekli malzeme verisi EN 10083 standardında belirtildiği gibi dökme karbon çeliğinin mekanik özellikleri kullanılmış ve Tablo 1’de verilmiştir [34]. Ayrıca, aynı standartta malzemenin kimyasal bileşimi verilmektedir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

Mekanik özellik	Değer
Akma mukavemeti	248,17 MPa
Çekme mukavemeti	482,5 MPa
Elastikiyet modülü	2×10^5 MPa
Poisson oranı	0,32
Kütle yoğunluğu	7800 kg/m ³
Kayma modülü	$7,6 \times 10^4$ MPa
Termal genleşme katsayısı	$1,2 \times 10^{-5}$ /K

Topoloji optimizasyonu sürecinde FEA çalışmalarında, topoloji optimizasyon (TO) öncesi ve sonrası analiz sonuçlarının doğru karşılaştırılması için parçanın yükleme şartları aynı girilmiştir. Üzenginin yükleme şartları EN 15566 standardına göre belirlenmiş olup, statik analizlerde parçanın akmaya karşı dayanım değerini gösteren emniyet katsayısı 2 olarak kabul edilmiştir. İlgili standartta kanca kavramalı koşum takımının yük taşıma kapasitesi 120 kN - 150 kN olarak gösterilmiştir. Yani, demiryolu aracının türüne veya yük taşıma kapasitesine göre koşum takımı elemanlarının boyutları da değiştirilebilir. Bu bağlamda, 120 kN ve 150 kN yük taşıma kapasitesine sahip minimum ağırlıkta koşum takımı üzengisinin üretilmesi sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Diğer taraftan, TO metodolojisinde esas amaçlardan birisi malzeme kütlelerinin azaltılması olup, ortaya çıkarılan yeni tasarımda parçanın geleneksel imalat

yöntemleriyle üretimi zor veya mümkün olmayabilir. Bu durumda, genellikle eklemeli imalat teknolojileri uygulanarak parçalar üretilmektedir. Bu bağlamda, iki farklı yükleme şartı için koşum takımı üzengisinin TO metodolojisine göre tasarımı yapılmış ve üretilebilirliği incelenmiştir.



Şekil 3. FEA aşamaları

Tasarlanan üzenginin 3B modeli (Şekil 3a), koşum takımı kancasına bağlanan taraftan 6 eksende (Şekil 3b) ve Z ekseninde sabit (Şekil 3c) kabul edilmiş olup, -X ekseninde belirlenen yük değerinde çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır (Şekil 3d). FEA metodolojisinin son aşamasında model sonlu elemanlara ayrılarak çözümlene yapılmıştır. TO öncesi ve TO sonrası tasarımlar için statik analizde uygulanan mesh modeli Şekil 3e’de gösterilmiş olup, FEA için kullanılan sonlu eleman mesh detayları Tablo 2’de verilmiştir. Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası uygulanan FEA çalışmalarında daha güvenilir bir karşılaştırma ortamı sağlamak amacıyla mesh boyutları, TO öncesi ve sonrasında eşit büyüklükte uygulanmıştır.

Tablo 2. Sonlu eleman detayları

	TO öncesi	TO sonrası
Mesh tipi*	Katı mesh	Katı mesh
Mesh kalitesi	Yüksek	Yüksek
Mesh boyutu	2 mm	2 mm
Tolerans	0,1 mm	0,1 mm
Toplam düğüm sayısı	724159	681912
Toplam eleman sayısı	510038	479454

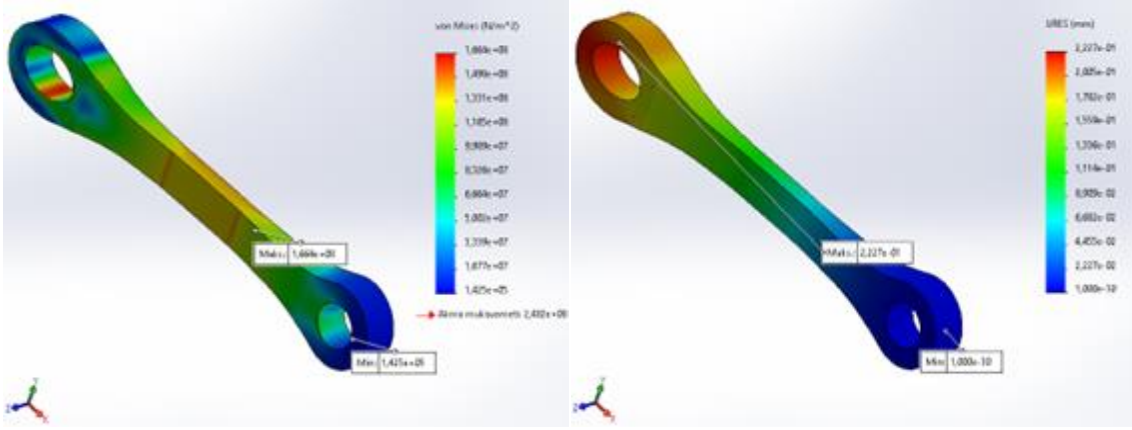
* Parabolik dört yüzlü katı eleman [35]

3. Bulgular ve Değerlendirme

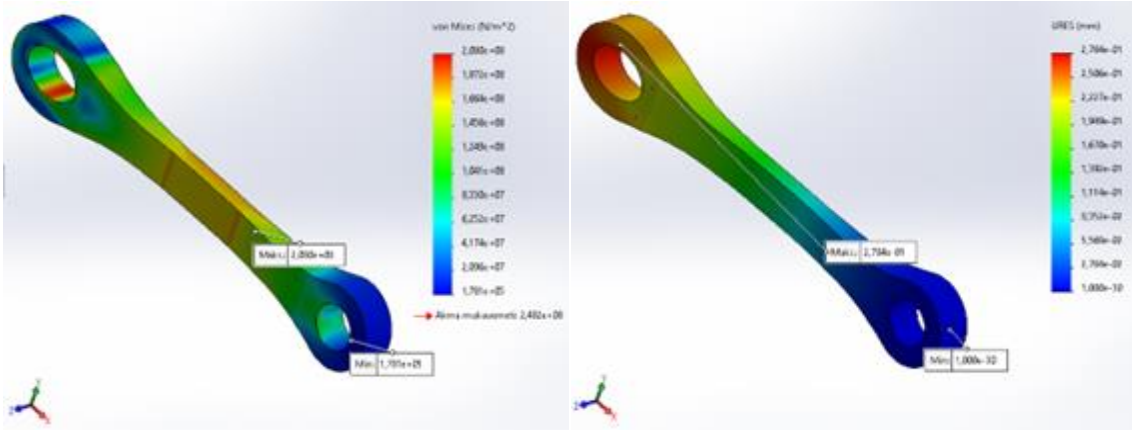
SolidWorks ortamında yapılan sonlu eleman analizlerinin ardından, koşum takımı üzengisinin belirlenen şartlar altında davranışı Von Mises gerilmeleri ve yer değiştirme miktarına göre incelenmiştir. Bu süreçte, topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası FEA sonuçları değerlendirilerek ağırlığı azaltılmış yeni bir üzengi tasarımı elde edilmiş olup, eklemeli imalat için uygunluğu tartışılmıştır.

3.1. TO öncesi FEA sonuçları

Koşum takımı üzengisi üzerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4a’da, yer değiştirme sonuçları ise Şekil 4b’de verilmiştir. 120 kN yükleme durumu için yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda en yüksek Von Mises gerilmesi 166,40 MPa, en yüksek yer değiştirme miktarı ise 0,22 mm olarak bulunmuştur. 150 kN için yapılan FEA analizleri sonucunda en yüksek Von Mises gerilmesi 208,00 MPa bulunurken (Şekil 5a), en büyük yer değiştirme miktarı ise 0,28 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 5b). Maksimum gerilmenin olduğu bölgeler üzengi modeli üzerinde gösterilmiş olup, yükleme durumu 150 kN olduğunda üzengide oluşan gerilmede %25 artış olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, yer değiştirme miktarında %27’lik bir artış meydana gelmiştir.



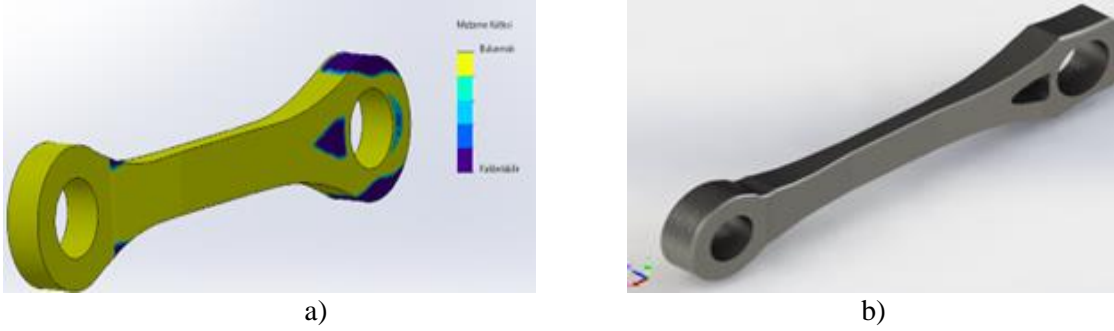
Şekil 4. 120 kN için sonuçlar: a) Von Mises gerilmesi b) Yer değiştirme miktarı



Şekil 5. 150 kN için sonuçlar: a) Von Mises gerilmesi b) Yer değiştirme miktarı

3.2. Topoloji optimizasyon sonuçları

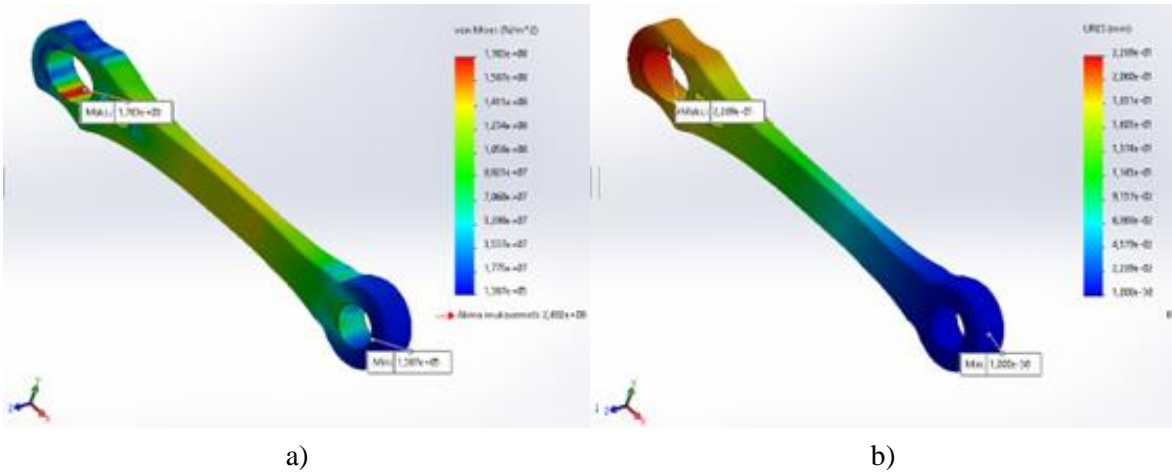
Sonlu elemanlar analizi yapılan 3B katı model için SolidWorks programının topoloji optimizasyon modülü kullanılarak tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, .stl formatında oluşan üzengi modeli üzerinde çıkarılacak/kesilecek kısımlar belirli bir renk skalasına dönüşür. Burada, sarı renkli kısımlar değiştirilemeyecek olan yerleri gösterirken (Şekil 6a), mavi renkli bölgeler ise üzengi modeli üzerinde değişiklik yapılabileceğine işaret eder. Aynı zamanda, katı model üzerinden tersine mühendislik işlemi olarak nitelendirilen bu işlem sonucunda modelin yeni görüntüsü Şekil 6b’de gösterilmiştir. Sonuçta, başlangıçta 5,31 kg olan katı modelin kütlesi 4,83 kg’ a azaltılmıştır. Yeni model üzerindeki unsurlar (üçgensel boşluk vb.) hassas ölçü ve yüzey kalitesinde geleneksel imalat yöntemleri ile oluşturulamayacağından, parçanın imalatında geleneksel olmayan imalat yöntemleri (elektro-erozyon ile işleme, elektrokimyasal işleme vb.) kullanılabilir. Ancak, bu yöntemler özellikle işleme zamanı açısından dezavantajlıdır. Bu durumda, yeni modellenen parçanın üretiminde eklemeli imalat teknolojisinin kullanılması ön plana çıkmaktadır. Bu imalat teknolojisi sayesinde parça hem hızlı hem de boyut ve yüzey kalitesi açısından istenilen kalitede elde edilebildiği gibi, parçanın işletme şartlarında kullanım ömründe artışlar sağlanabilmektedir [19], [36].



Şekil 6. TO'da modelleme: a) TO için değiştirilebilecek bölgeler, b) TO sonucu elde edilen model

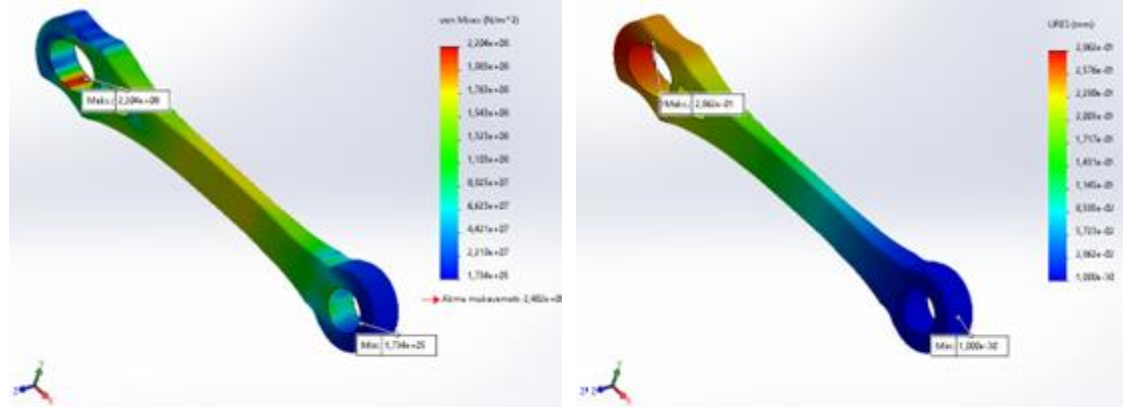
3.3. TO sonrası FEA sonuçları

Topoloji optimizasyon işlemi sonrasında oluşturulan yeni üzengi modeli üzerinde 120 kN yükleme durumu için uygulanan FEA analizi sonucunda en yüksek Von Mises gerilmesi 176,30 MPa (Şekil 7a), en yüksek yer değiştirme miktarı ise 0,23 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 7b). Üzengi modelinde oluşan gerilmelerin 2 kat emniyetle malzeme akma dayanımı olan 248,17 MPa değerine ulaşmadığı görülmektedir. Ayrıca, yer değiştirme miktarının EN15566 standardında belirtilen değeri (<0,5 mm) aşmadığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, hem gerilme dağılımı hem de yer değiştirme miktarı açısından tasarlanan üzengi modelinin uygulanabileceğini göstermektedir.



Şekil 7. 120 kN için sonuçlar: a) Von Mises gerilmesi b) Yer değiştirme miktarı

Topoloji optimizasyon modeli üzerinde 150 kN yükleme durumu için uygulanan FEA sonucunda, en yüksek Von Mises gerilmesi 220,40 MPa olarak bulunurken (Şekil 8a), en yüksek yer değiştirme miktarı ise 0,28 mm'dir (Şekil 8b). Bu sonuçlar, TO sonucu tasarlanan yeni üzengi modelinin maksimum yükleme şartında 2 emniyette güvenle kullanılabilirliğini gösterir. Maksimum ve minimum gerilmelerin olduğu bölgeler üzengi modeli üzerinde gösterilmiş olup, 120 kN'luk yükleme durumuna göre model üzerinde oluşan gerilmelerde %25'lik bir artış olmuştur. Bu sonuç, TO öncesi mevcut koşum takımı üzengisine benzer olup, gerilmeler açısından önemli bir değişimin olmadığını bir göstergesidir.



Şekil 8. 150 kN için sonuçlar: a) Von Mises gerilmesi b) Yer değiştirme miktarı

Yükleme durumu maksimum olduğunda yer değiştirme miktarında %21'lik bir artış meydana gelmiştir. Yüklemeye durumundaki artışa rağmen, TO öncesi modele göre üzengi üzerindeki yer değiştirme miktarında belirgin bir azalma olmuştur. Bu sonuç, TO sonrasında koşum takımı üzengisinin geometrisindeki değişime atfedilebilir. Diğer yandan, koşum takımı üzengisi üzerinde oluşan gerilme dağılımları değerlendirildiğinde; topoloji optimizasyonu öncesine göre TO uygulanarak tasarlanan yeni modelde 120 kN ve 150 kN yüklemeye şartlarında maksimum gerilmelerde sırasıyla %6 ve %5,96'lık artışlar belirlenmiştir. Bu sonucun TO sonrası üzengi model geometrisindeki değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. Başka bir ifadeyle, TO sonrası hem parça kütlesi hem de model yüzey alanı azaldığından birim alana düşen yük artmış ve sonuç olarak üzengide oluşan gerilmeler artış göstermiştir. Tüm sonuçlar, TO uygulanarak tasarlanan yeni koşum takımı üzengisinin güvenle kullanılabilmesine işaret etmektedir. Ayrıca, üzengi modelindeki geometrik unsurların basit olmamasından dolayı, gerçek parça üretimi için eklemeli imalat teknolojilerinin daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, raylı sistem araçlarının birlikte çalışmasını sağlayan bağlantı sistemlerinden kanca kavramalı koşum takımı elemanı üzenginin iki farklı yüklemeye durumu için kütlesinin azaltılması amacıyla topoloji optimizasyon metodolojisi uygulanmıştır. Koşum takımı üzengisi üzerinde yapılan topoloji optimizasyonunda tasarım ve sonlu elemanlar analizlerinde SolidWorks yazılımı kullanılmıştır. Bu süreçte, malzemenin teknik özellikleri ve yüklemeye şartları ilgili standartlar esas alınarak belirlenmiştir.

Topoloji optimizasyonu öncesi 120 kN ve 150 kN yüklemeye durumunda yapılan FEA analizleri sonucunda, üzengi modelinde oluşan gerilme dağılımı ve yer değiştirme miktarları incelenmiş ve elde edilen sonuçların referans değerleri aştığı belirlenmiştir. TO sürecinin ikinci aşamasında model üzerinde yapılan değişimler neticesinde, üzengi parçasının kütlesi 5,31 kg'dan 4,83 kg'a azaltılmıştır. Koşum takımına ait 1 adet üzengide 480 g, toplamda her koşum takımında 960 g ağırlıkta azalma sağlanmıştır. Topoloji optimizasyonunun son aşamasında, FEA analizlerine göre en yüksek Von Mises gerilmesi 120 kN ve 150 kN için sırasıyla 176,30 MPa ve 220,40 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca, koşum takımı üzengisi için en yüksek yer değiştirme miktarları sırasıyla 0,23 mm ve 0,28 mm olarak elde edilmiştir. Bu değerler, EN15566 standardında belirtilen değerin (<0,5 mm) altında olup yeni tasarım üzenginin raylı sistem araçları arasında yük iletiminde güvenli olduğuna işaret etmektedir. Topoloji optimizasyon uygulaması sonucunda, koşum takımı üzengisinin kütlesi %9,04 azaltılmış ve böylece kayda değer bir malzeme tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca, TO ile geliştirilen üzengi model geometrisinin zorluğundan dolayı eklemeli imalat teknolojisiyle üretiminin daha uygun olduğu kanısına varılmıştır. Bununla birlikte, TO metodolojisinin raylı sistem araçlarının tüm parçaları için uygulanarak sürdürülebilirliğe önemli

katkılar sağlanacağı açıkça görülmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda, raylı sistem araçlarının herhangi bir parçası için halihazırda uygulanan geleneksel imalat yöntemi ile eklemeli imalat teknolojisi kullanılması durumunda oluşan maliyetler kıyaslanabilir.

Kaynakça

- [1] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, *Raylı sistemler teknolojisi: Mekanik sistemler*, Ankara, 2013.
- [2] C. Özarpa, H. Botsalı ve B.F. Kınacı, "Raylı sistemlerde kullanılan cer kancasının topoloji optimizasyonuna uygunluğunun değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, c. 15, ss. 1- 12, 2022.
- [3] S. M. Noughabi, K. Dehghani and M. Pournavari, "Failure analysis of automatic coupler SA-3 in railway carriages," *Eng. Fail. Anal.*, c. 14, sy. 5, ss. 903-912, 2007.
- [4] M. Günay, M.E. Korkmaz and R. Özmen, "An investigation on braking systems used in railway vehicles," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, pp. 421-430, 2020.
- [5] E. V. Rosa, L. Rios ve V. Queral, "Progress on the interface between UPP and CPRHS (Cask and Plug Remote Handling System) tractor/gripping tool for ITER," *Fusion Eng. Des.*, vol. 88, no. 9-10, pp. 2168-2172, 2013.
- [6] M. Nold, F. Corman, "Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: Systematic classification, operational potentials, and research agenda," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol.18 no. 1-26, pp. 100-241, 2021.
- [7] "EN 15566:2017 Railway applications - Railway rolling stock - Draw gear and screw coupling," Accessed: April 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.en-standard.eu/une-en-15566-2017-railway-applications-railway-rolling-stock-draw-gear-and-screw-coupling/>
- [8] R. Ulewicz, F. Nový, P. Novák and P. Palček, "The investigation of the fatigue failure of passenger carriage draw-hook," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 104, pp. 609-616, 2019.
- [9] D. Pojani and D. Stead, "Sustainable urban transport in the developing world: beyond megacities," *Sustainability* no. 7 pp. 7784–7805, 2015, doi:10.3390/ su7067784.
- [10] M. Bayraktar, N. Tahrali and R. Guclu, "Reliability and fatigue life evaluation of railway axles," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 24, pp. 671–679, 2010, doi: 10.1007/ s12206-009-1219-1.
- [11] U. Zerbst, C. Klinger, D. Klingbeil, "Structural assesment of railway axles – a critical review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 35, pp. 54–65, 2013.
- [12] N. Top, H. Gökçe ve İ. Şahin, "Eklemeli imalat için topoloji optimizasyonu: el freni mekanizması uygulaması," *Selçuk-Teknik Dergisi*, c. 18, s. 1, ss. 1-13, 2019.
- [13] M. Donofrio, "Topology optimization and advanced manufacturing as a means for the design of sustainable building components," *Procedia Eng.*, vol. 145, pp. 638-645, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.054
- [14] J. Liu and Y. Ma, "A survey of manufacturing oriented topology optimization methods," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 100, pp. 161-175, 2016.
- [15] A.L.R. Prathyusha and G. Raghu Babu, "A review on additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in various industrial applications," *Mater. Today: Proc.*, pp. 1-9, 2022.
- [16] Y. Li, Y. Cheng, Q. Hu, S. Zhou, L. Ma, M.K. Lim, "The influence of additive manufacturing on the configuration of make-to-order spare parts supply chain under heterogeneous demand," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57(2), pp. 1-20, 2018.
- [17] A. Killen, L. Fu, S. Coxon, R. Napper, "Exploring the use of additive manufacturing in providing an alternative approach to the design, manufacture and maintenance of interior rail components," *Australasian Transport Research Forum*, pp.1–16, 2018.
- [18] A.D. Toth *et al.*, "Report on case studies of additive manufacturing in the South African railway industry," *Sci. Afr.*, vol. 16, 2022, doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01219.
- [19] H. Fu and S. Kaewunruen, "State-of-the-art review on additive manufacturing technology in railway infrastructure systems," *Compos. Sci.*, vol. 6, pp. 1-21, 2022.
- [20] B. Dener, "Çarpışma sönümleyici konstrüksiyonun yapasal optimizasyon yöntemleri kullanılarak hafifletilmesi," Y. Lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2021.
- [21] E.İ. Albak, "Formula SAE aracında ağırlık azaltılmasına yönelik fren pedalının topoloji optimizasyonu yöntemiyle optimum tasarımı," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, c. 11(1), ss. 328-334, 2019.
- [22] W. Ferdous *et al.*, "Evaluation of an innovative composite railway sleeper for a narrow-gauge track under static load," *J. Compos. Constr.*, vol. 22, no. 2, pp. 1-18, 2018.

- [23] H. Lee, S. Jung, H. Jang, “Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. F J. Rail and Rapid Transit*, vol. 230, no. 4, pp. 1283-1296, 2016.
- [24] T. Kuczek, “Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures,” *Eng. Optim.*, vol. 48, no. 2, pp. 351-360, 2015.
- [25] R Muvunzi *et al.*, “Analysis of potential materials for local production of a rail car component using additive manufacturing,” *Heliyon*, vol. 8, 2022, doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09405.
- [26] V. Vázquez, F. Velázquez-Villegas, G. Ascanio and F.C. Jiménez, “Design of an automotive subframe by topological optimization,” *Generia Mecánicatecnología Y Desarrollo*, vol. 7 no. 2, pp. 017- 024, 2013.
- [27] J. H. Zhu, W.H. Zhang and L. Xia, “Topology optimization in aircraft and aerospace structures design,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 23, pp. 595–622, 2016.
- [28] C. H. Chuang, S. Chen, R. J. Yang and P. Vogiatzis, “Topology optimization with additive manufacturing consideration for vehicle load path development,” *Internat. J. Numer. Methods Eng.* vol. 113, no.8, pp. 1434-1445, 2017.
- [29] Q. Li, W. Chen, S. Liu and L. Tong, “Structural topology optimization considering connectivity constraint,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 54, no. 4, pp. 971–984, 2016.
- [30] M. Abdi, R. Wildman and I. Ashcroft, “Evolutionary topology optimization using the extended finite element method and isolines,” *Eng. Opt.*, vol. 46, no. 5, pp. 628-647, 2014
- [31] M.P. Bendsoe and O. Sigmund, *Topology optimization: Theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media, Denmark, 2003.
- [32] G.I.N. Rozvany, “A critical review of established methods of structural topology optimization,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 37, pp. 217-237, 2009.
- [33] V.G. Sundararajan, “Topology optimization for additive manufacturing of customized meso-structures using homogenization and parametric smoothing functions,” M.Sc. dissertation, Mechanical Engineering, University of Texas, Austin, 2010.
- [34] “EN 10083-2:2006 - Steels for quenching and tempering - Part 2: Technical delivery conditions for non alloy steels,” [Online]. Accessed: April 13, 2022. Available: <https://regbar.com/wp-content/uploads/2019/09/EN-10083-2-2006.pdf>.
- [35] SolidWorks, “Dassault Systemes documentation”, [Online]. Accessed: June. 14, 2022. Available: https://help.solidworks.com/2021/English/SolidWorks/cworks/c_Solid_Mesh.htm
- [36] X. Wang *et al.*, “Overhang structure and accuracy in laser engineered net shaping of Fe-Cr steel,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 106, pp. 357-365, 2018.

Özgeçmiş



Emre ULUSOY

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Raylı Sistemler Mühendisliği programından 2021 yılında mezun olmuştur. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliğinde yüksek lisans yapmaktadır.

E-Posta: emreulusoyum@hotmail.com



Mert İSTEK

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Raylı Sistemler Mühendisliği programından 2021 yılında mezun olmuştur. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliğinde yüksek lisans yapmaktadır.

E-Posta: mertistek33@gmail.com

**Mustafa GÜNAY**

Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora derecelerini sırasıyla Gazi Üniversitesi Makine Bölümü'nde tamamlamıştır. Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde 2009-2013 yılları arasında Yrd. Doçent, 2013-2018 yılları arasında Doçent olarak görev yaptı. Halen Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Profesör olarak görev yapmaktadır. Geleneksel ve geleneksel olmayan imalat yöntemleri, kompozit malzemeler, bilgisayar destekli tasarım ve imalat, FEM analizi, eklemeli imalat, işlenebilirlik ve optimizasyon teknikleri üzerine çalışmaktadır.

E-posta: mgunay@karabuk.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Emre ULUSOY: Sonlu elemanlar analizi, Yazma ve düzenleme. Mert İSTEK: Tasarım, İnceleme, Gözden geçirme. Mustafa GÜNAY: Metodoloji, Doğrulama, Kontrol.



Ölçüm Sahasının Değişen Koşullarında Yüksek Hızlı Tren Kaynaklı Titreşimlerin Bornitz Analitik Yaklaşımına Göre Değerlendirilmesi

Murat ŞAHİN¹, Fatih GÖKTEPE^{*2}, Erkan ÇELEBİ³, Abdullah Can ZÜLFİKAR⁴, Osman KIRTEL⁵

¹ Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, Türkiye

² Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

³ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

⁴ Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

⁵ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

*fgoktepe@bartin.edu.tr

(Alınış/Received: 02.06.2022, Kabul/Accepted: 22.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Ülkemizde yüksek hızlı tren yolcu taşımacılığının trafik akış hızı maksimum 255 km/h değerine ulaşacak şekilde faaliyete geçmiştir. Söz konusu gelişmeye bağlı olarak demiryolu trafiği kaynaklı titreşim sorunlarının güzergâh boyunca öngörülememesi, mevcut araştırmaların sadece ray titreşimleri ve gürültü kirliliğinin azaltılmasına odaklanmış olması, yapılan bu çalışmayı çevresel titreşim etkilerinin sahada yerinde ölçülerek tespit edilmesine yönlendirmiştir. Yapılan bu çalışmayla, yolcu taşımacılığında kullanılan yüksek hızlı tren (YHT) geçişlerinin ölçüm sahasının değişen zemin koşullarında oluşturduğu yüzey titreşim dalgalarının yayılma biçimleri araştırılmıştır. Elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlara bağlı olarak, YHT trenlerinin alüvyon zeminlerde oluşturduğu en büyük titreşim değerlerinin uzaklığa bağlı değişimi incelendiğinde Bornitz analitik çözümünün orantılı değişim gösterdiği ancak bu durumun deneysel ölçümler için geçerli olmadığı anlaşılmıştır. Hendekli ve hendezsiz test sahasında yapılan titreşim ölçümleri ve bu ölçümlere ait elde edilen bulguların ortaya koyduğu sonuçlar doğrultusunda hendek varlığının hızlı tren kaynaklı titreşimleri önemli oranda azalttığı söylenebilir. Ayrıca çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı özellikle demiryolu hattına yakın ölçüm noktalarındaki hızlı tren kaynaklı titreşimler üzerinde hendeğin dışında önemli oranda yalıtım etkisi göstermiştir. Çalışma kapsamında kaydedilen ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini test etmek amacıyla mesafeye bağlı olarak regresyon analizi yapılmış ve analitik yöntemle ait azalım eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Demiryolu kaynaklı titreşimlere ait regresyon analiz sonuçlarının yüksek korelasyonlu olması kullanılan analiz yönteminin geçerliliğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek hızlı trenler, Yer titreşimleri ölçümleri, Yüzey dalgaları, Enerji soğurma performansı, Alüvyon zemin ortamı, Regresyon analizi

Evaluation of High-Speed Train Induced Vibrations in Different Conditions of the Measurement Site According to the Bornitz Analytical Approach

Abstract: In our country, high-speed train transportation started to serve by reaching the maximum traffic flow rate of 255 km/h. Regarding the mentioned development, because of the unpredictability of vibration problems caused by railway traffic along the route, and the existing research focusing only on reducing rail vibrations and noise pollution, this study is directed towards investigating the determination of the measurement of environmental vibration effects in the field. With this study, the propagation patterns of surface waves created by the measurement area of high-speed train (HST) crossings used in passenger transportation under changing soil conditions were investigated. Based on the experimental and numerical results obtained, when the variation of the maximum vibration values created by HST trains on alluvial soils with distance is examined, it is understood that the Bornitz analytical solution shows a proportional change, but this is not valid for experimental measurements. According to the results of the vibration

Atıf için/Cite as: M. Şahin, F. Göktepe, E. Çelebi, A. C. Zülfikar, O. Kırtel, "Ölçüm sahasının değişen koşullarında yüksek hızlı tren kaynaklı titreşimlerin bornitz analitik yaklaşımına göre değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16., pp. 153-169, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1125269

measurements made with and without trench in the test area and the findings of these measurements, it can be said that the presence of the trench significantly reduces the vibrations caused by high-speed trains. In addition, the concrete block pavement, which was subsequently floored in the study area, showed a significant reduction effect on the vibrations affiliated with the high-speed train, especially at the measurement points close to the railway line, outside the trench. In order to test the reliability of the measurement results recorded within the scope of the study, regression analysis was performed depending on the distance and compared with the attenuation curves of the analytical method. The high correlation of regression analysis results of railway-induced vibrations showed the validity of the used analysis method.

Keywords: High speed trains, In-situ measurement, Surface waves, Energy dissipation performance, Alluvial soil deposit, Regression analysis

1. Giriş

Demiryolu hatlarına bağlı hızlı ulaşım sistemleri konforlu ve güvenli olmakla beraber, yerleşim alanlarındaki trafik yoğunluğundan ve iklim koşullarından karayoluna göre de daha az etkilenmektedir. Türkiye'de yolcu trenlerinin maksimum 255 km/h işletme hızında seyahat etmesi ve 22,5 ton dingil yüküne sahip yüksek hızlı trenlerin demiryolu hatlarından geçebilmesi amacıyla önemli yatırımlar yapılmıştır. Yumuşak zemin birikintileri üzerine kurulmuş yoğun yerleşim ve sanayi bölgelerinde YHT geçişlerinin oluşturduğu yüksek düzeyde çevresel zemin titreşimleri, günlük insan yaşamında konfor bozucu rahatsızlıklara neden olabilmekte, yapısal elemanların işletme ömrünü kısaltabilmekte ve endüstriyel üretimde kullanılan hassas elektronik ekipmanların arızalanmasına neden olabilmektedir.

Demiryolu kaynaklı titreşim problemleriyle ilgili olarak, özellikle YHT geçişlerine bağlı serbest zemin yüzeyinde oluşan titreşimlerin dalga yayılımı açısından anlaşılabilmesiyle alakalı birçok saha deneyleri gerçekleştirilerek elde edilen önemli sonuçlar yayınlanmıştır [1-3]. Yapılan çalışmalarda farklı hızlara sahip trenlerin sebep olduğu titreşimler saha koşullarında ölçülerek sonrasında geliştirilen numerik modellerle kıyas edilmiştir [4-6]. Yüksek hız trenleri gibi insan kaynaklı yüzeysel dinamik yüklerin demiryolu üstyapısında, çevre zeminde ve binalarda oluşturduğu titreşim etkilerinin dalga yayılma hareketine bağlı parametrik araştırıldığı çalışmalarda, sonlu eleman, sınır eleman ya da sınır integral yöntemleri [7-9], bu yöntemlerin ortak kullanımına dayalı melez çözüm teknikleri [10, 11] ve ampirik tabanlı analitik çözüm yaklaşımları [12, 13] kullanılmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda demiryolu kaynaklı titreşimlerin azaltılmasına yönelik dalga bariyer modellerinin enerji soğurma performansı hem deneysel [14] hemde nümerik araştırmalarla [15-18] analiz edilmiştir. Ayrıca gerçek tren yükü yerine yapay yük kaynağından harmonik titreşim dalgaları üretilerek sahada küçük ölçekli modeller üzerinden deneysel çalışmalar yapılmıştır [19, 20]. Bununla birlikte farklı frekans içeriklerine sahip dinamik yük kaynaklarının ölçüm noktalarında sebep olduğu deneysel titreşim sonuçlarıyla dalgaların soğurulmasını ifade eden analitik çözüm yaklaşımlarının karşılaştırıldığı birçok çalışma yapılmıştır [21-23]. Kim ve Lee [24] tren geçişleri, patlatma yükü, kazık çakma işlemi gibi titreşim kaynaklarının oluşturduğu etkileri üç eksenli ivmeölçerle deneysel olarak kayıt altına alarak mesafeye bağlı azalımı parçacık hızlarını kullanarak analiz etmişlerdir. Ren vd. [25] çalışmalarında, YHT geçişlerinin alüvyon zemin koşullarında sebep olduğu titreşim etkilerinin mesafeye bağlı olarak yayılım ve azalım özelliklerini araştırmak için Bornitz formülasyonunu kullanmışlardır. Ju ve Ni [26] en küçük kareler yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmalarında, makine ve demiryolu gibi insan kaynaklı oluşan titreşimlerin zemin ortamında sönümlenmesiyle alakalı elde ettikleri parametrelerin üstyapıların dinamik davranışlarında önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Yapılan bu arazi çalışmasında, yumuşak zemin ortamında belirlenen ölçüm noktasındaki YHT trenlerinin geçişleri esnasında deneysel saha çalışmalarında elde edilen maksimum ivme genliklerinin mesafeye bağlı azalım ilişkileri Bornitz analitik çözüm yöntemi sonuçlarıyla hem serbest zemin hemde hendekli serbest zemin için karşılaştırılmıştır. Buna ilaveten hendekli

durumdaki ölçüm sahasına sonradan döşenen parke kilit taşı döşemesinin demiryolu kaynaklı titreşimler üzerindeki yalıtım performansı deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Demiryolu kaynaklı titreşim problemlerinin yumuşak zemin saha koşullarında tam ölçekli biçimde teorik ve deneysel verilerle analiz edilmesi bu çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Ölçüm yapılan sahanın genel zemin yapısı

Çalışma kapsamında, İstanbul-Ankara arasında bulunan alüvyon tabanlı zemin ortamlarından da geçen 533 km uzunluğundaki demiryolu hattındaki tekrarlı hızlı tren geçişleri dikkate alınmıştır. YHT geçişleri esnasında demiryolu üstyapısının yakın çevresinde meydana gelen titreşim etkilerinin yerinde incelenebilmesi için ölçüm sahası olarak İzmit-Arifiye arasında bulunan Sapanca/Kırkpınar bölgesi seçilmiştir. Ölçüm sahasındaki ortalama hızları 255 km/h olan YHT geçişlerinin oluşturduğu titreşimler farklı zamanlarda hatta dik ve hatta paralel doğrultularda kayıt altına alınarak, titreşim enerjisinin soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönmeye bağlı tanımlayan Bornitz analitik çözüm yöntemiyle [27], ardışık gözlem noktaları için karşılaştırılmıştır. Çalışma sahasının genel zemin yapısını anlamak için farklı zamanlarda ve değişik noktalarda yapılan jeolojik etütlere göre ölçüm noktasının genç ve kalın alüvyonal zemin tabakaları ile kaplı olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte yapılan derin sondajlarda ana kayaya ulaşamadığı ve alüvyon kalınlığının yer yer 1000 m'nin üzerinde olduğu; bilim insanları tarafından yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir [28]. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen Sismik Kırılma (Refraksiyon) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) jeofizik etütleriyle inceleme sahasının dinamik zemin parametreleri hesaplanarak Tablo 1'de özetlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Jeofizik saha deneylerinde yapılan ölçümler

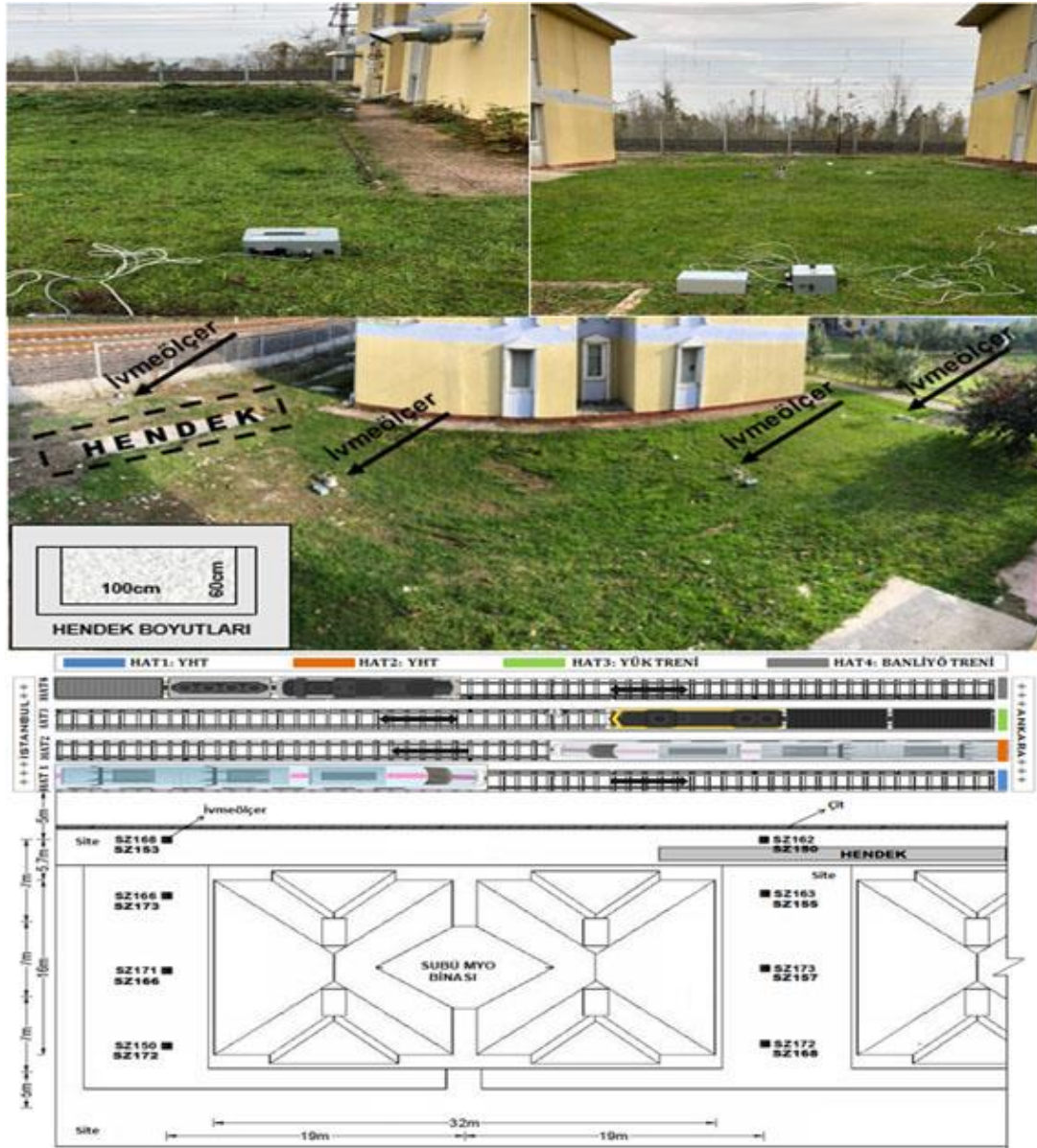
Elde edilen dinamik deneysel saha verileri dikkate alındığında, Sapanca/Kırkpınar bölgesindeki pilot çalışma sahası için hesaplanan jeofizik test ölçümleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ndeki [29] zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan eşik değerlerle karşılaştırıldığında zemin grubu ZD'ye ($180 \text{ m/s} < V_{s30} < 360 \text{ m/s}$) yani taşıma gücü açısından oldukça olumsuz özelliklere karşı gelmektedir. Hatta yönetmelikte belirtilen $V_{s30} < 180 \text{ m/s}$ sınır durumu göz önünde bulundurulduğunda ZE yerel zemin sınıfı kapsamında bile değerlendirilebilir.

Tablo 1. Sismik Hızlar ve Zemin Elastik Parametreleri

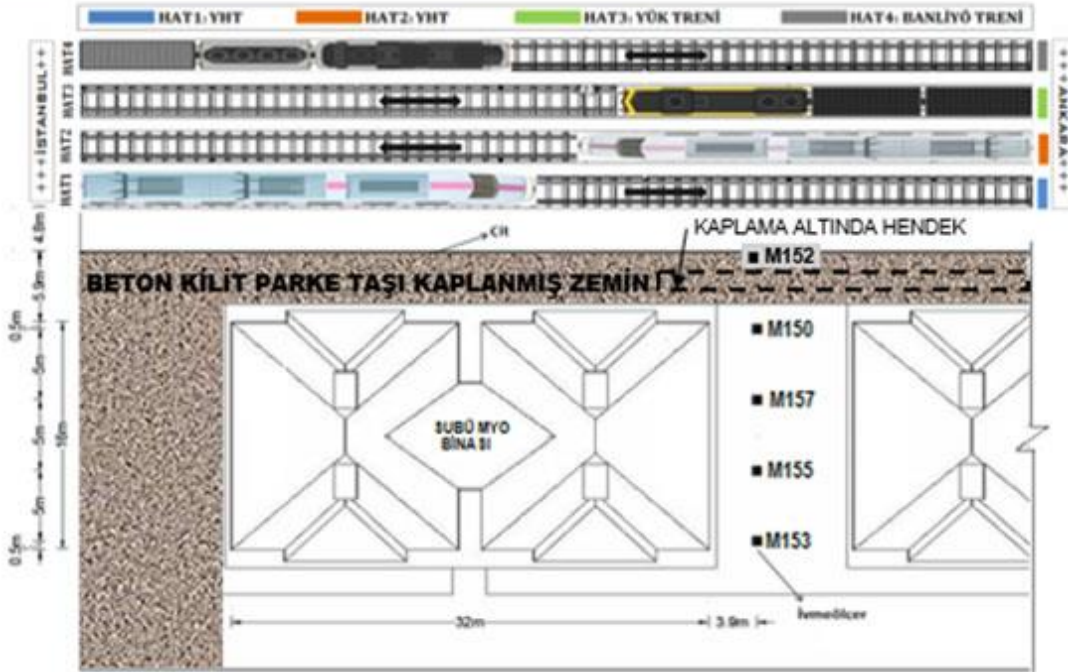
Dalga Hızları				
	Sembol	Birimi	1. Tabaka	2. Tabaka
P Dalgası Hızları - Düz Atış	(V_p)	m/s	795	1213
P Dalgası Hızları -Ters Atış	(V_p)	m/s	795	1213
S Dalgası Hızları	(V_s)	m/s	170	240
P Dalgası Hızları (Ortalama)	(V_p)	m/s	795	1213
Tabaka Derinlikleri				
	Sembol	Birimi	P Düz	P Ters
Derinlikler	(h)	M	9,00	9,00
Elastik Parametreler				
	Sembol	Birimi	1. Tabaka	2. Tabaka
Yoğunluk	(d)	gr/cm ³	1,65	1,83
Poisson Oranı	(P)	-	0,48	0,48
Kayma Modülü	(G)	kg/cm ²	476	1054
Elastisite Modülü	(E)	kg/cm ²	1404	3118
Sökülebilirlik			KOLAY	KOLAY

2.2. Zemin titreşimlerinin ivmeölçerlerle kayıt altına alınması

Çalışma sahasında, genel olarak hızlı tren geçişlerinin oluşturduğu titreşimlerin demiryoluna hattına dik ve paralel olarak yayılmasını değerlendirmek amacıyla farklı noktalarda ölçüm noktaları belirlenerek farklı zamanlarda üç adet ölçüm yapılmıştır. Ölçüm yapılan demiryolu hattı platformunun güzergâh kesitinde kullanılan alt temel, balast altı malzeme, balast tabakası ve beton traverslere elastik bağlantı malzemesiyle montajı yapılan raylara ait detaylar Şekil 2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. ve 2. saha titreşim ölçümleri için kullanılan ivmeölçerlerin dizilimi.



Şekil 4. 3. saha titreşim ölçümleri için kullanılan ivmeölçerlerin dizilimi.

2.3. Titreşim dalgalarının uzaklığa bağlı yayılışının analitik yaklaşımlarla incelenmesi

Amick ve Gendreau [27] tarafından geliştirilen Bornitz'in iki nokta arasındaki enerji azalımı ile ilgili olarak sunmuş olduğu teorik formülasyon Denklem 1'de verilmiştir.

$$u_b = u_a \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma e^{\alpha(r_a - r_b)} \quad (1)$$

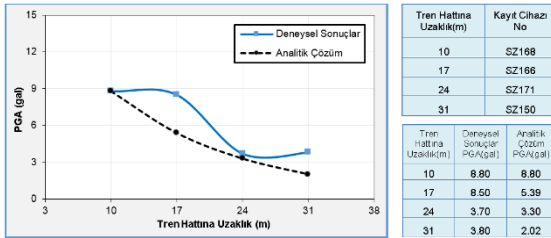
Analitik çözümler için kullanılan teoriye göre, geometrik ve malzeme sönümünün yer değiştirme genliklerinde neden olduğu azalım yukarıdaki formülasyonla ifade edilmiştir. Buna göre, yük kaynağından r_b mesafesindeki yer değiştirme genliği u_b ile, r_a mesafesindeki yer değiştirme genliği ise u_a ile ifade edilmektedir. Formülasyondaki, γ geometrik azalım katsayısı olup, dış yükün neden olduğu sismik dalga yayılım mekanizmasına ve dış yükün pozisyonuna bağlı olarak seçilmektedir. Yukarıdaki formülde α ile gösterilen malzeme azalım katsayısı ise,

zeminin tipine ve dış yükün frekans içeriğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Titreşim enerjisinin soğurulmasını tanımlayan analitik çözümlerle alakalı kapsamlı açıklamalar yazarların daha önceki çalışmalarında [31, 32] verildiğinden çalışmanın bu kısmında sadece özet biçimde sunulmuştur.

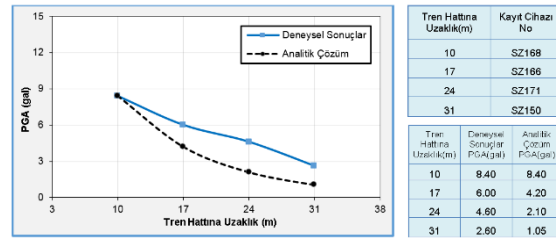
3. Bulgular

3.1. Dalga yayılımının uzaklığa bağlı değişiminin analitik çözümlerle karşılaştırmalı analizi

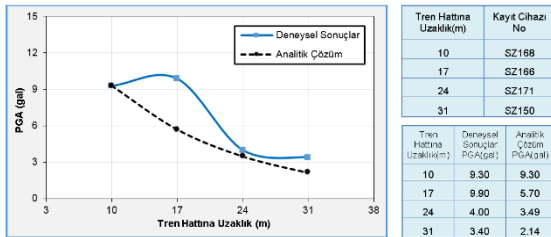
Yapılan bu çalışmada tekrarlı tren geçişlerine ait ölçüm verilerini Bornitz analitik çözüm yaklaşımına göre kıyaslamak amacıyla demiryolu hattına yakın ilk iki hatta gerçekleşen YHT seferleri dikkate alınmıştır. Üçüncü ve dördüncü hattan geçen yük ve banliyö trenleriyle YHT trenlerinin geçişleri esnasında farklı frekans içeriklerine bağlı demiryolu üstyapısının yakın çevresinde meydana gelen titreşim etkileri yazarların daha önceki çalışmasında [31, 32] değerlendirildiğinden dolayı, Ankara yönlü birinci hattan geçen YHT geçişleri bu çalışmada sadece hendekli serbest zemin ortamı için verilmiştir (Şekil 3 ve 4). Ölçüm sahasındaki ikinci hattan İstanbul yönünde geçen YHT trenlerinin alüvyon tabanlı serbest zemin ortamında oluşturduğu ivme zaman kayıtlarındaki tepe ivme değerleri mesafeye bağlı olarak hem deneysel hemde analitik olarak Şekil 5-12’de verilmiştir. Analizler hareketin 2 doğrultusu için “hatta paralel (E-W)” ve “hatta dik (N-S)” olarak yapılmıştır.



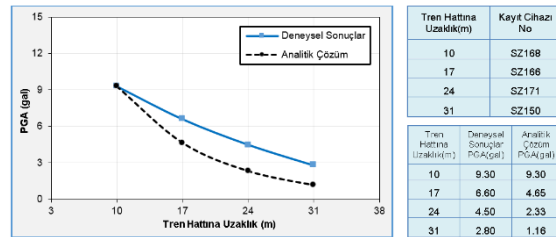
Şekil 5. 1.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1.Ölçüm-İstanbul yönü).



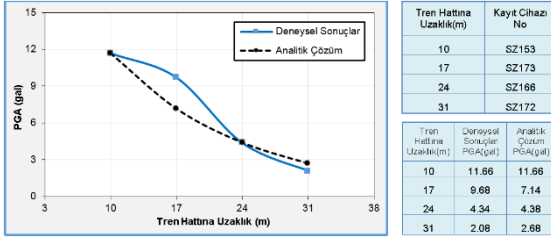
Şekil 6. 1.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1.Ölçüm-İstanbul yönü).



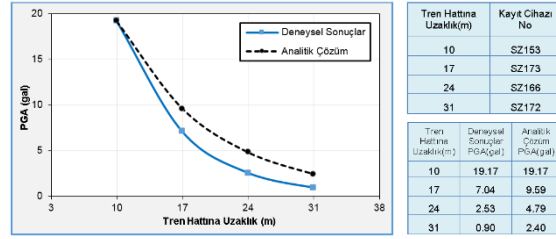
Şekil 7. 1.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (2.Ölçüm-İstanbul yönü).



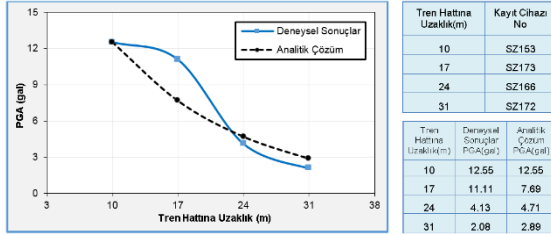
Şekil 8. 1.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (2.Ölçüm-İstanbul yönü).



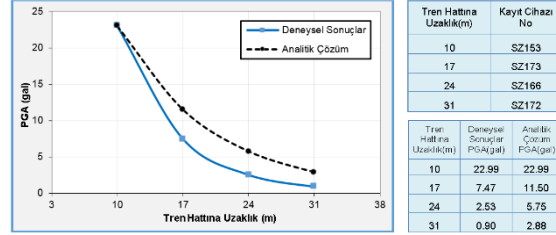
Şekil 9. 2.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1.Ölçüm-İstanbul yönü).



Şekil 10. 2.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1.Ölçüm-İstanbul yönü).



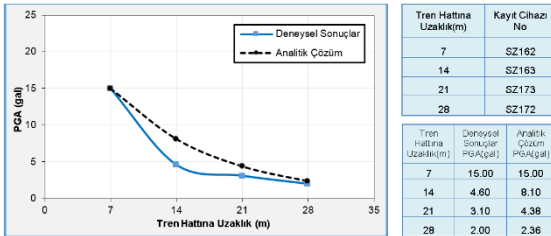
Şekil 11. 2.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (2.Ölçüm-İstanbul yönü).



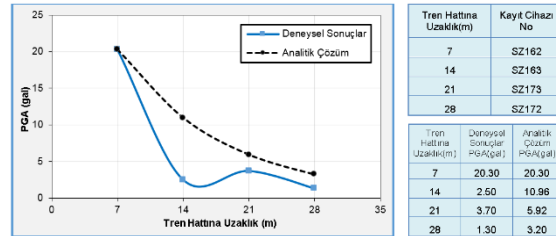
Şekil 12. 2.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (2.Ölçüm-İstanbul yönü).

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça serbest zemin yüzeyinde meydana gelen tepe ivme genlikleri Bornitz çözüm yöntemine göre her iki doğrultu için orantılı biçimde azalma gösterirken, bu durumun deneysel sonuçlar için geçerli olmadığı anlaşılmıştır. Özellikle hatta dik doğrultu için deneysel ölçümlerde kaydedilen maksimum ivmeler analitik sonuçlara kıyasla genel anlamda daha büyük değerlerde çıkmıştır. Buna ilaveten, hızlı tren hattına 17 m uzaklıktaki mesafede ölçülen en büyük ivme genlik değerlerinin özellikle hatta dik doğrultuda azalım davranışı sergilemediği hatta bazı ölçümlerde artış eğilimi gösterdiği anlaşılmıştır. Bu durum hatta yakın ikinci ölçüm noktasında yerel olarak büyütme etkilerinin olduğu zemin yapısı varlığını düşündürmüştür (Şekil 5-12).

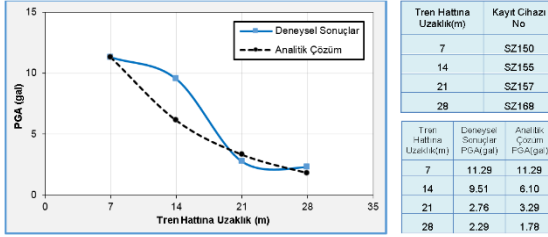
Çalışmanın bu kısmında öncelikle birinci ve ikinci saha çalışmalarındaki hendekli durumda ölçülen demiryolu kaynaklı titreşimler değerlendirilmiş, üçüncü saha çalışmasıyla da hendekli durumda ölçüm sahasına sonradan döşenen parke kilit taşının hızlı tren kaynaklı yer titreşimine etkisi test sahasında yapılan titreşim ölçüm kayıtları kullanılarak analiz edilmiş ve Şekil 13-24' de gösterilmiştir. Analizler yine "hatta paralel (E-W)" ve "hatta dik (N-S)" olmak üzere hareketin iki doğrultusu için yapılmıştır.



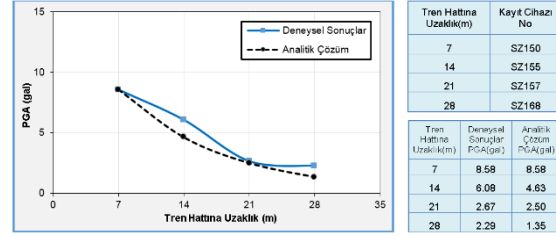
Şekil 13. 1.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



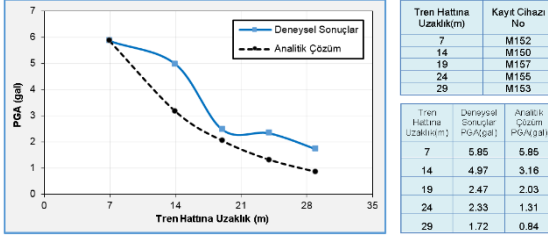
Şekil 14. 1.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



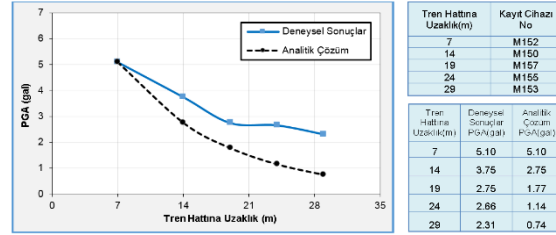
Şekil 15. 2.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



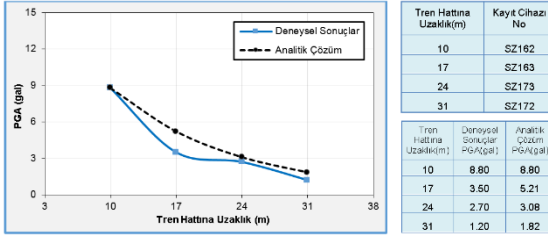
Şekil 16. 2.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



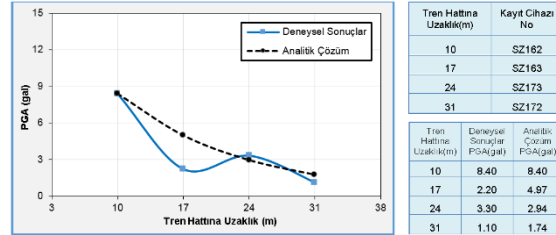
Şekil 17. 3.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



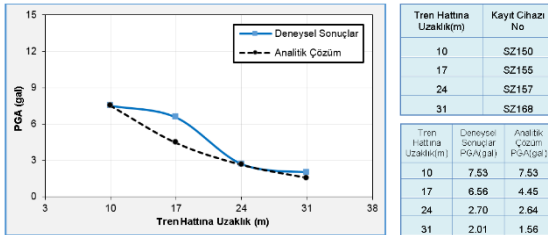
Şekil 18. 3.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



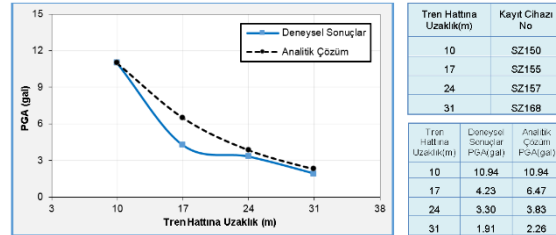
Şekil 19. 1.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



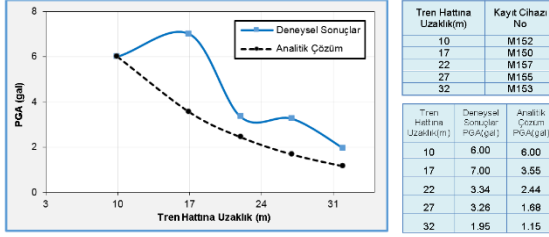
Şekil 20. 1.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



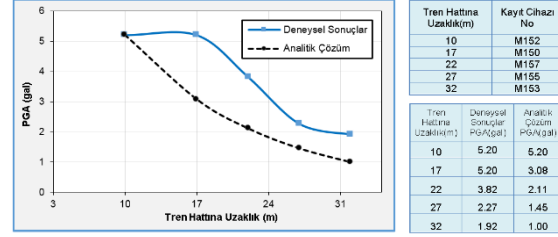
Şekil 21. 2.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



Şekil 22. 2.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



Şekil 23. 3.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendecli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



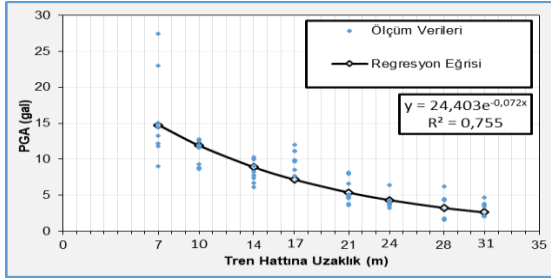
Şekil 24. 3.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendecli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)

Test sahasındaki ikinci demiryolu hattından geçen İstanbul yönlü YHT trenlerinin serbest zemin hareketlerine benzer olarak, ivmeölçürlere daha yakın olan ve birinci hattan geçen Ankara yönündeki hızlı tren geçişlerinin oluşturduğu tepe ivme genlikleri analitik sonuçlarda mesafeye bağlı azalırken deneysel olarak yine orantısız azalım göstermemiştir. Hızlı tren hattına yakın 14m'de ölçülen Ankara yönlü YHT titreşim dalgalarının maksimum genlikleri birinci saha çalışmasında daha fazla azalma eğilimi gösterirken, sonrasında tüm koşulların sabit olduğu ikinci saha çalışmasında aynı noktada artışlar gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak, ikinci saha çalışması sırasında trenlerin sebep olduğu titreşim etkileri dışında, ölçüm yapılan alanda yürütülmekte olan inşaat faaliyetlerinden dolayı (konkasör çalışması) meydana gelen gürültülerin kayıtların değerlendirilmesini zorlaştırdığı şeklinde değerlendirilmiştir. Buna ilaveten, üçüncü ölçümde test sahasına sonradan döşenen parke kilit taşı Ankara yönlü birinci hattan geçen YHT trenlerinin sebep olduğu demiryolu kaynaklı titreşimler üzerinde önemli oranda yalıtım etkisi göstermiştir. Hendecli serbest zemin ortamında İstanbul yönünde geçen hızlı tren geçişlerinin oluşturduğu ivme-zaman kayıtlarının en büyük değerleri dikkate alındığında, tren hattına 17m mesafedeki uzaklığa bağlı azalımın birinci saha çalışmasında daha fazla olduğu söylenebilir. Bunun aksine özellikle hatta dik doğrultuda ikinci ve üçüncü saha ölçümlerinde aynı noktada büyütme etkileri gözlemlenmiştir. Seçilen pilot bölgeye sonradan döşenen parke kilit taşı ve hendek bariyeri İstanbul yönlü hızlı tren titreşimlerini azaltsa da, tepe ivme genliklerinde elde edilen yalıtım oranı ivmeölçürlere daha yakın olan Ankara yönlü birinci demiryolu hattındaki titreşimlere oranla daha azdır (Şekil 13-24).

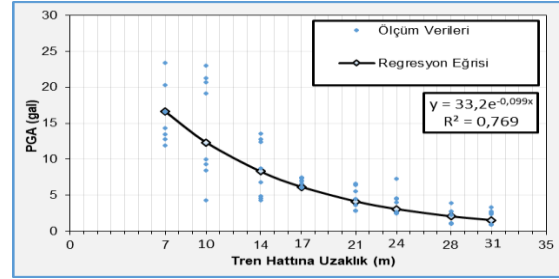
3.2. YHT geçişlerinin deneysel ve analitik olarak değerlendirilmesinde regresyon analizi

YHT trenlerinin doğal saha koşulları altında dalga iletimi açısından alüvyon gibi en elverişsiz zeminlerde oluşturduğu tepe ivme-zaman titreşim değerlerinin mesafeye bağlı değişimi incelendiğinde Bornitz analitik çözümünün orantılı değişim gösterdiği ancak bu durumun deneysel ölçümler için geçerli olmadığı anlaşılmıştır. Seçilen pilot çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı ile hendek bariyer varlığını analitik çözümün dikkate alamadığı konusu vurgulanması gereken bir husustur. Bununla alakalı olarak, literatürde yaygın olarak kullanılan analitik çözüm yaklaşımlarındaki geometrik ve malzeme sönüm katsayılarının seçiminde, yerel zemin koşullarını daha gerçekçi tanımlayan jeofizik ve geoteknik deneylerin önemi bir kez daha anlaşılmıştır. Buna ilaveten özellikle deneysel ölçüm sonuçlarına göre demiryolu hattından belirli mesafelerde azalımın aksine tepe ivme genlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum yansıyan ve/veya saçılan yüzey dalgalarının varlığını düşündürmüştür. Gene çalışma sahasındaki yerel zemin koşullarının homojen yapıda olmaması sebebiyle büyütme zonlarının etkisiyle bazı ölçüm noktalarındaki titreşim seviyeleri artmıştır. Bu sebeplerden dolayı, çalışma sahasında kaydedilen ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini test etmek amacıyla regresyon analizi yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Alüvyon birikintisi gibi oldukça zayıf bir zemin ortamı üzerine inşa edilen demiryolu hattında oluşan titreşimlerin ölçüldüğü birinci ve ikinci saha ölçümlerine ait hatta dik ve paralel doğrultulardaki titreşim genliğindeki azalımın Regresyon analizi Şekil 25 ve 26'da verilmiştir. Analizler yapılırken

dinamik titreşim kaynağına olan uzaklık x parametresiyle, x 'e bağlı oluşan tepe ivme genlikleri ise y parametresiyle tanımlanmıştır.



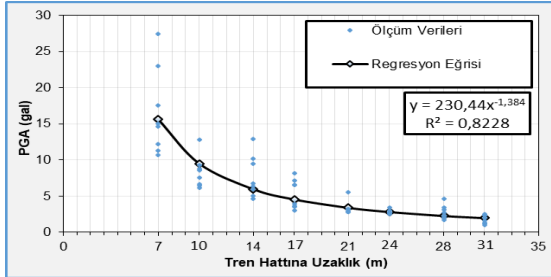
Şekil 25. 1. ve 2. saha ölçümlerine ait hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi



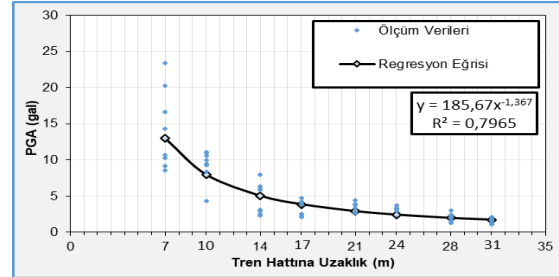
Şekil 26. 1. ve 2. saha ölçümlerine ait hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi

Yapılan regresyon analizi sonucunda değişkenler arasındaki doğrusal bağımlılığın göstergesi olan belirtme katsayı değerinin her iki doğrultu için 1'e yakın olması bağımlı ve bağımsız parametreler arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir.

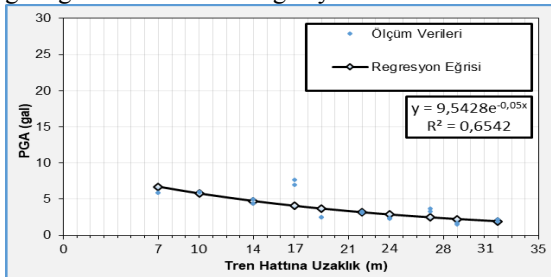
Ölçüm sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı etkisinin ve hendek varlığının değerlendirildiği üçüncü saha çalışması ile birinci ve ikinci saha çalışmalarında demiryolu hattına dik (NS) ve paralel (EW) doğrultularda alüvyon tabanlı zemin formasyonlarında ölçülen yüzey titreşim tepe ivme genliklerine ait regresyon analizi sonuçları Şekil 27-30'da gösterilmiştir. Birinci ve ikinci saha çalışmalarına ait elde edilen sonuçlardan özellikle çalışma sahasındaki hatta dik ve paralel doğrultularda hendekli durumda ölçülen tepe ivme titreşim genliklerinde oluşan azalım için hesaplanan determinasyon katsayısı değerinin %70'in üzerinde çıkması rassal değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin kuvvetli olduğunu göstermiştir. Benzer performansın üçüncü saha çalışmasında demiryolu hattına paralel doğrultuda ölçülen parke kilit taşı döşeli hendekli serbest zemin titreşimleri içinde geçerli olduğu söylenebilir.



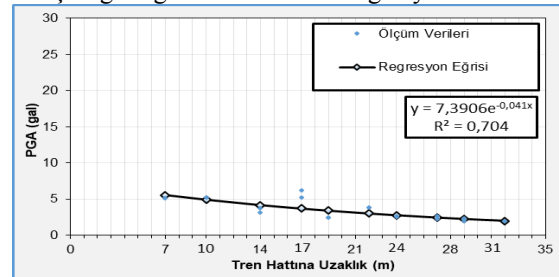
Şekil 27. Hendekli durumda 1. ve 2. saha ölçümlerine ait hatta dik doğrultuda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi



Şekil 28. Hendekli durumda 1. ve 2. saha ölçümlerine ait hatta paralel doğrultuda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi

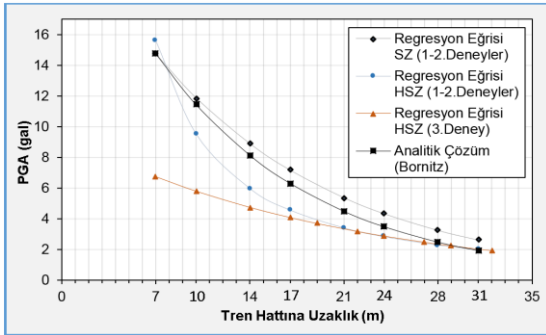


Şekil 29. Hendekli durumda 3. saha ölçümüne ait hatta dik doğrultuda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi

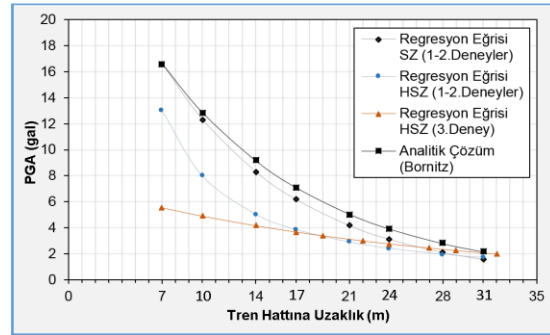


Şekil 30. Hendekli durumda 3. saha ölçümüne ait hatta paralel doğrultuda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi

Yapılan regresyon analizlerinin son aşamasında hızlı tren hattına dik ve paralel doğrultulardaki serbest zemin, hendekli serbest zemin ve beton parke kilit taşı döşeli hendekli serbest zemin koşulları için elde edilen Regresyon eğrileri ile Analitik yönteme ait azalım ilişkilerinin karşılaştırılması Şekil 31 ve 32’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre her iki doğrultuda Bornitz analitik çözüm yaklaşımı için teorik olarak hesaplanan değerler arasında uzaklığa bağlı orantısal azalım söz konusudur. Birinci ve ikinci saha ölçümlerinde YHT geçişlerine bağlı oluşan serbest zemin titreşimlerinin hatta paralel doğrultuda daha yüksek değerlerde olduğu anlaşılmıştır. Hendekli ve hendeksiz test sahasında ölçülen ivme-zaman kayıtlarının tepe genlik değerleri karşılaştırıldığında, hendek varlığının hızlı tren kaynaklı titreşimleri önemli oranda azalttığı söylenebilir. Buna ilaveten çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşının özellikle demiryolu hattına yakın ölçüm noktalarında (7-14m) oluşan titreşim seviyelerinde hendeğin dışında önemli oranda yalıtım etkisi gösterdiği anlaşılmıştır.



Şekil 31. Hatta dik doğrultuda titreşim yayılımı için elde edilen Regresyon eğrileri ile Analitik yönteme ait azalım ilişkilerinin karşılaştırılması



Şekil 32. Hatta paralel doğrultuda titreşim yayılımı için elde edilen Regresyon eğrileri ile Analitik yönteme ait azalım ilişkilerinin karşılaştırılması

4. Sonuç

Yapılan bu çalışmada, TCDD genel taşımacılık hizmetleri için kullanılan YHT tren geçişlerinin alüvyon zemin ortamında ve hendekli serbest zeminde ürettiği yer hareketinin dalga oluşum mekanizmasına odaklanılmıştır. Buna ilaveten hendekli durumda ölçüm sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı kaplamasının yer titreşimine etkisi deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar genel anlamda değerlendirildiğinde, yüksek hız trenlerinin serbest zemin ve hendekli serbest zeminde oluşturduğu, maksimum titreşim etkileri demiryolu hattından uzaklaştıkça Bornitz analitik çözüm yöntemine göre orantılı bir azalım ilişkisi gösterirken, bu durumun hatta paralel (E-W) ve hatta dik (N-S) doğrultular için ölçülen deneysel verilerde geçerli olmadığı anlaşılmıştır. Kazıldığında yanıl stabilite sorunu olmayan zeminlerde en az bir dalga boyu derinliğinde uygulanan açık hendeklerin en etkili titreşim yalıtım aracı olduğu literatürden bilinmektedir [33]. Alüvyon tabanlı zemin koşullarına sahip ölçüm sahasında, hendekli ve hendeksiz serbest zemin yüzeylerinde yüksek hızlı tren kaynaklı titreşimler için elde edilen maksimum ivmelere göre söz konusu yalıtım etkisi gözlenmiştir. İstenmeyen titreşimlerin engellenmesiyle alakalı önlemler kapsamında gene yüksek hızlı demiryolu hatlarında balast altı malzemesi olarak kullanılacak asfalt kaplamaların taban zemindeki gerilme ve deformasyonları azaltacağı ve daha güvenli tren seferleri oluşturacağı düşünülebilir [34]. Ayrıca, çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı hendek varlığının dışında özellikle demiryolu hattına yakın ölçüm noktalarında önemli oranda yalıtım etkisi göstermiştir. Bununla birlikte, titreşim enerjisinin zemin ortamında soğrulmasını mesafeye bağlı tanımlayan ve literatürde yapılan birçok deneysel çalışmada [22, 25] farklı hızlara sahip tren geçişleri için test edilen Bornitz'in sunmuş olduğu teorik formülasyonun, seçilen pilot çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı ile hendek bariyer varlığını dikkate alamadığı konusu vurgulanması gereken bir husustur.

Doğal saha koşullarında gerçek yük kaynağına bağlı yapılan bu deneysel çalışmada elde edilen ölçüm sonuçlarının özellikle Bornitz analitik çözüm yaklaşımıyla kıyaslanması, mesafeye bağlı azalımda kullanılan teorik yaklaşımların eksikliğini ortaya çıkarmıştır. Demiryolu hattından çevreye yayılan yüzeysel titreşim dalgalarının uzaklıkla birlikte genliklerinin monoton azalması teorik olarak beklenen bir sonuç olup deneysel olarak da yapılan saha ölçümleriyle bu durum teyit edilmiştir. Ancak bazı bölgelerde, yerel zemin yapısının mekanik özelliklerinin heterojen dağılım göstermesinden dolayı titreşim seviyesinin arttığı büyütme zonlarına da rastlanılmıştır. Demiryolu hattına eşit uzaklıkta serbest zemin üzerine ardışık olarak yerleştirilen komşu ivmeölçerlerden alınan yer hareketi kayıtlarında bile farklılıklar olabileceği ölçüm sahasında tecrübe edilmiştir. Benzer koşullara sahip noktalarda kaydedilen titreşimler arasındaki fark, YHT trenlerinin geçişleri sırasında farklı frekanslarda oluşan yüzey titreşim dalgalarının yayılma biçimleri ve yerel zemin koşullarının değişmesiyle açıklanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, 217M427 numaralı TÜBİTAK 1001 projesinin sağladığı maddi destekle tamamlanmış olup yazarlar bu destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar.

Kaynakça

- [1] K. Adolfsson, B. Andréasson, P-E. Bengtson, A. Bodare, C. Madshus, R. Massarch, G. Wallmark, P. Zackrisson, *High speed lines on soft ground. Evaluation and analyses of measurements from the West Coast Line*, Technical Report, Banverket, Sweden, 1999.
- [2] G. Degrande, L. Schillemans, "Free field vibrations during the passage of a Thalys HST at variable speed", *Journal of Sound and Vibration*, 247(1), 131-144, 2001.
- [3] Z. Zhang, F. Ma, B. Zhang, "Vibration measurement of long-span floors in high-speed railway station", *Journal of Vibroengineering*, 20(7), 2705-2719, 2018.
- [4] P. Ropars, X. Vuylsteke, E. Augis, "Vibrations induced by metro in sensitive buildings; experimental and numerical comparisons", in: *EURONOISE 2018 Conference*, Heraklion, Greece, 2018, pp. 1381-1386.
- [5] J. Yang, P. Li, Z. Lu, "Numerical Simulation and In-Situ Measurement of Ground-Borne Vibration Due to Subway System", *Sustainability*, 10(7), 2439, 2018.
- [6] W. Yan, H. Zheng, Z. Wu, T. Wan, and X. Tian, "Experimental study and numerical analysis on the vibration characteristics of a terraced slope along an embankment section of a high-speed railway", *Shock and Vibration*, 2020.
- [7] E. Çelebi, G. Schmid, "Investigation of ground vibrations induced by moving loads", *Engineering Structures*, 27(24), 1981-1998, 2005.
- [8] S.H. Ju, "Finite element analysis of structure-borne vibration from high-speed train", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 259-273, 2007.
- [9] L. Auersch, "The effect of critically moving loads on the vibrations of soft soils and isolated railway tracks", *Journal of Sound and Vibration*, 310, 587-607, 2008.
- [10] E. Çelebi, "Three-dimensional modelling of train-track and sub-soil analysis for surface vibrations due to moving loads", *Applied Mathematics and Computation*, 179, 209-230, 2006.
- [11] P. Fiala, G. Degrande, F. Augustinovicz, "Numerical modeling of ground borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic", *Journal of Sound and Vibration*, 301, 718-738, 2007.
- [12] L. Auersch, "Train induced ground vibrations: different amplitude-speed relations for two layered soils", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226 (5), 469-488, 2012.
- [13] G.Y. Gao, J. Song, J. Yang, "Identifying boundary between near field and far field in ground vibration caused by surface loading", *Journal of Central South University*, 21 (8), 3284-3294, 2014.
- [14] Z. Wang, A. Tang, D. Huang, C. Wu, Z. Huang, "A novel environmental vibration analysis system and its application in isolation of environmental vibration induced by high-speed train in Harbin frozen soil site", *Applied Acoustics*, 193, 108781, 2022.
- [15] J. Yao, R. Zhao, N. Zhang, D. Yang, "Vibration isolation effect study of in-filled trench barriers to train-induced environmental vibrations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105741, 2019.

- [16] D.P.N. Kontoni, A.A. Farghaly, “Mitigation of train-induced vibrations on nearby high-rise buildings by open or geofoam-filled trenches”, *Journal of Vibroengineering*, 22 (2), 416-426, 2020.
- [17] Y. E. Ibrahim, M. Nabil, “Finite element analysis of multistory structures subjected to train-induced vibrations considering soil-structure interaction”, *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00592, 2021.
- [18] A. Lyrtzakakis, Y. Tsompanakis, P. N. Psarropoulos, “Efficient mitigation of high-speed train vibrations on adjacent reinforced concrete buildings”, *Construction and Building Materials*, 314, 125653, 2022.
- [19] S. Ahmad, T.M. Al-Hussaini, “Simplified design for vibration screening by open and infilled trenches”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117 (1), 67-88, 1991.
- [20] S.H. Ju, H.T. Lin, “Experimentally investigating finite element accuracy for ground vibration induced by high-speed trains”, *Engineering Structures*, 30, 733-746, 2008.
- [21] D. Macijauskas, V. B. Stefan “Propagation of harmonical vibrations in peat”, *International Journal of GEOMATE*, 7(2), 1101-1106, 2014.
- [22] F. Goktepe, H.S. Kuyuk, E. Celebi, “In-situ measurement of railway-traffic induced vibrations nearby the liquid-storage tank”, *Earthquakes and Structures*, 12 (5), 583-589, 2017.
- [23] S.J. Yang, "Attenuation of Ground Vibration Induced by Dynamical Machinery", *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Rolla, Missouri, USA, 1981.
- [24] D-S. Kim, J-S. Lee, “Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 115–126, 2000.
- [25] X.W. Ren, J.F. Wu, Y.Q. Tang, J.C. Yang, “Propagation and attenuation characteristics of the vibration in soft soil foundations induced by high-speed trains”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 374-383, 2019.
- [26] S-H. Ju, S-H. Ni, “Determining Rayleigh damping parameters of soils for finite element analysis”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31, 1239–1255, 2007.
- [27] H. Amick, M. Gendreau, “Construction vibrations and their impact on vibrationsensitive facilities”, *ASCE Construction Congress 6*, Orlando, 2000.
- [28] M. Komazawa, H. Morikawa, K. Nakamura, J. Akamatsu, K. Nishimura, S. Sawada, A. Erken, A. Önalp, “Bedrock Structure in Adapazari, Turkey – A Possible Cause of Severe Damage by the 1999 Kocaeli Earthquake”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 829 – 836, 2002.
- [29] TBDY, 2018. “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği” Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [30] MGS Proje Müşavirlik Mühendislik Ticaret Ltd. Şti., 2013. “TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, Sivas-Erzincan Demiryolu Projesi, Çevresel Etki Değerlendirme Başvuru Dosyası”, Ankara.
- [31] M. Şahin, F. Göktepe, E. Çelebi, A.C. Zülfişkar, O. Kırtel, “Farklı Frekans İçeriklerine Sahip Tren Geçişlerinde Oluşan Titreşim Enerjisinin Soğurulmasının Deneysel ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi”, 8. *Uluslararası Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [32] M. Şahin, “Alüvyon Zemin Ortamındaki Dalga Soğurulmasının Tren Geçişleri İçin Deneysel ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, Türkiye, 2020.
- [33] M. Naghizadehroknı, M. Ziegler, J. Sprengel, “A full experimental and numerical modelling of the practicability of thin foam barrier as vibration reduction measure”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106416, 2020.
- [34] C. Gürer, T.A. Törer, K. Aslantaş, “Yüksek Hızlı Hatlarda Grantüler Alt Balast Yerine Asfalt Tabaka Kullanımının Sonlu Elemanlarla Modellenmesi”, *Demiryolu Mühendisliği*, 14, 39-48, 2021.

Özgeçmiş



Murat ŞAHİN

Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği ve Mühendislik Tamamlama Programı ile Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde tamamlayan yazar, yüksek lisans eğitimini “Alüvyon Zemin Ortamındaki Dalga Soğurulmasının Tren Geçişleri İçin Deneysel ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi” başlıklı teziyle Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda tamamlamıştır.

E-Posta: muratemirbeyoglu@gmail.com



Fatih GÖKTEPE

Lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, yüksek lisans ve doktora eğitimini aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı'nda tamamlayan yazar halen Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi'nde Doçent unvanında öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Yazarın araştırma konuları zemin dinamiği, zeminlerde dalga yayılımı, yapı-zemin dinamik etkileşimi, hareketli yüklerin modellenmesi, geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi, doğal afetler ve titreşim azaltıcı dalga bariyerlerinin tasarımı üzerinedir.

E-Posta: fgoktepe@bartin.edu.tr



Erkan ÇELEBİ

Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Yüksek lisans ve doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği'nde tamamlayan yazar halen Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi'nde Profesör unvanında öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Yazarın araştırma konuları betonarme yapılar, geoteknik deprem mühendisliği, yapı dinamiği, yapı-zemin dinamik etkileşimi, yer titreşimleri, yer tepki analizleri, sonlu elemanlar yöntemi, titreşim dalgalarının azaltılması ve yüksek hızlı demiryolu trafiği kaynaklı zemin titreşim ölçümleri üzerinedir.

E-Posta: ecelebi@sakarya.edu.tr



Abdullah Can ZÜLFİKAR

Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Yüksek Lisans Eğitimini Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalında, Doktora Eğitimini Japon Milli Eğitim Bakanlığı (Monbusho) burslusu olarak Okayama Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Halen Gebze Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları Deprem Mühendisliği, Kuvvetli Yer Hareketi, Zemin Davranış Analizi, Tren titreşimleri, Deprem Tehlike ve Risk Analizi üzerinedir.

E-Posta: aczulfikar@gtu.edu.tr



Osman KIRTEL

Lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Yüksek lisans ve doktora eğitimini Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği'nde tamamlayan yazar halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi'nde Dr.Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. Yazarın araştırma konuları betonarme yapılar, deprem mühendisliği, yapı dinamiği, yapı-zemin dinamik etkileşimi, patlama etkileri, çevresel titreşimler, sonlu elemanlar yöntemi, titreşim dalgalarının azaltılması ve yüksek hızlı demiryolu trafiği kaynaklı zemin titreşim ölçümleri üzerinedir.

E-Posta: okirtel@subu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Murat ŞAHİN: Deneysel Saha Çalışmaları, Verilerin Deneysel ve Analitik Analizi, Grafiklerin Elde Edilmesi, Metnin Yazımı ve Yorumlanması, Kavramsallaştırma, Metodoloji. Fatih GÖKTEPE: Deneysel Saha Çalışmaları, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Metnin Yazımı ve Gözden Geçirilerek Düzenlenmesi. Erkan ÇELEBİ: Deneysel Saha Çalışmaları, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Metnin Yazımı ve Gözden Geçirilerek Düzenlenmesi. Abdullah Can ZÜLFİKAR: Deneysel Saha Çalışmaları, Metodoloji, Metnin Gözden Geçirilerek İncelenmesi ve Kontrol Edilmesi. Osman KIRTEL: Deneysel Saha Çalışmaları, Metodoloji, Metnin Gözden Geçirilerek İncelenmesi ve Kontrol Edilmesi.



Demiryolu Hat Geometrisinin Fraktal Analizi

Murat Vergi TACİROĞLU^{*1}, Mustafa KARASHAHİN², Mesut TİĞDEMİR³, Hakan IŞIKER⁴

¹ Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Ulaştırma Hizmetleri, Mersin, Türkiye

² İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Müh., İstanbul, Türkiye

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Böl., Isparta, Türkiye

⁴ Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mersin, Türkiye

*mtaciroglu@mersin.edu.tr

(Alınış/Received: 13.06.2022, Kabul/Accepted: 06.07.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Hat geometrisi muayene araçlarıyla yapılan ölçümlerden elde edilen grafiklere göre demiryolu hattı yatay ve düşey düzlemlerde düzgün olmayan dalgalı bir geometriye sahiptir. Bu geometrik yapı fraktal desen olarak göz önüne alındığında hat geometrisinin düzgünsüzlüğü fraktal boyutlar yardımı ile sayısal olarak ifade edilebilir. Bu çalışmada Ankara-Eskişehir Yüksek Hızlı Tren (YHT) hattının geometrik düzgünsüzlüğünü belirlemek için fraktal analiz metodundan faydalanılmıştır. Fraktal boyutları hesaplamak için cetvel metodunu temel alan bir hesap algoritması kullanılmıştır. Fraktal boyutlar fleş ve nivelman grafikleri için hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, hat geometrisinin genel düzgünsüzlüğünün fraktal boyut ile sayısal olarak ifade edilebildiği belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda hat kalitesinin göstergesi olan geometrik parametrelerin standart sapması ile fraktal boyutlar arasındaki ilişki araştırılmıştır. Buna göre önerilen fraktal boyut ile standart sapma arasında güçlü bir ilişki vardır.

Anahtar kelimeler: Hat geometrisi, Fraktal analiz, Kalite indeksi, Düzgünsüzlük

Fractal Analysis of Railway Track Geometry

Abstract: The railway track has a non-uniform wavy geometry in the horizontal and vertical planes, as seen in the graphs produced by track geometry recording cars. The roughness of the track geometry can be expressed numerically using fractal dimensions if this geometric structure is considered a fractal pattern. In this study, fractal analysis method was used to determine the geometric roughness of the Ankara-Eskişehir High-Speed Railway track. A calculation algorithm based on the ruler method was used to calculate fractal dimensions. Fractal dimensions are calculated for alignment and longitudinal level graphs. According to the calculations, it has been determined that the general unevenness of the line geometry can be expressed numerically with the fractal dimension. At the end of the study, the relationship between the standard deviation of geometric parameters, which are indicators of track quality, and fractal dimensions, was investigated. Accordingly, there is a strong relationship between the proposed fractal dimension and the standard deviation.

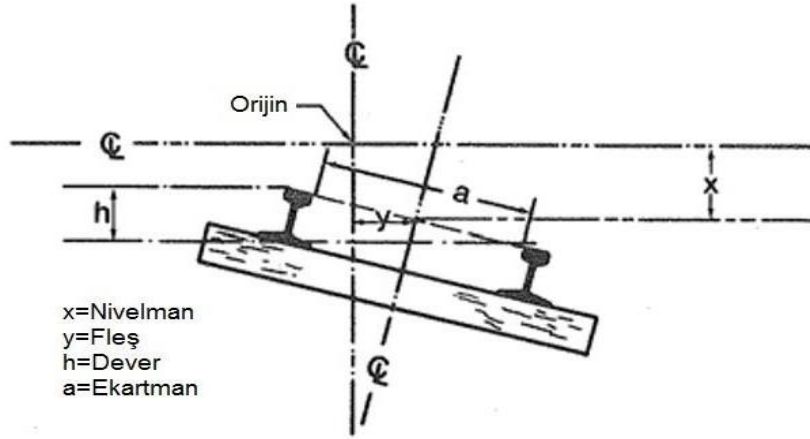
Keywords: Track geometry, Fractal analysis, Quality index, Roughness

1. Giriş

Rayların yatay ve düşey düzlemlerdeki konumunu gösteren demiryolu geometrisi yatayda fleş ve ekartman düşeyde ise nivelman, dever ve burulma parametreleri ile ifade edilirler. Hat açıklığı veya demiryolu uzmanları tarafından daha çok tercih edilen ismi ile ekartman, rayların birbirlerine bakan iç yüzleri arasındaki mesafedir. Ekartman demiryolunun herhangi bir yerinden ray yuvarlanma yüzeyinin 16 mm aşağısından ölçülür. Fleş, her bir rayın demiryolunun ortasında geçtiği kabul edilen hayali yol eksenine göre yatay konumudur. Nivelman, rayların üst yüzeyinin düşey eksenindeki konumunu göstermektedir. Dever, yatay kurplarda oluşan merkez kaç kuvvetinin demiryolu araçları üzerindeki zararlı etkilerini azaltmak amacıyla dış ray dizisi ile iç ray dizisi

Atıf için/Cite as: M. V. Taciroğlu, M. Karashahin, M. Tığdemir, H. Işıker “Demiryolu hat geometrisinin fraktal analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 170-184, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1130088

arasında oluşturulan yükseklik farkı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1). Burulma ise belirli mesafelerde ölçülen iki dever miktarı arasındaki cebrik fark olarak ifade edilmektedir [1].



Şekil 1. Nivelman, fleş, dever ve ekartman parametrelerinin gösterimi [1]

Her yol geometrisi parametresinin kendi tasarım değerleri vardır. Trenlerin trafik yükleri ve atmosferik etkilerle hattın servis ömrü boyunca demiryolu geometrisi bozulur. Tasarım değerlerindeki sapmalar, düzgün olmayan bir yol geometrisi oluşturur. Düzgün olmayan yol geometrisi, demiryolu taşıtlarının ve yol bileşenlerinin bozulmasına, yolcu konforunun düşmesine, trenlerin işletme hızının düşürülmesine ve ileri aşamalarda raydan çıkmaya neden olur [2]. Bu olumsuz etkiler nedeniyle yol geometrisinin bakım ve onarım çalışmaları ile iyileştirilmesi gerekir. Demiryolu hatlarının bakım maliyetleri, toplam kullanım ömrü maliyetlerinin yaklaşık %70'ini oluşturur[3,4,5]. Avrupa ülkelerinin demiryolu sistemlerinin bakımı ve yenilenmesi için her yıl yaklaşık milyarlarca Avro ayrıldığı tahmin edilmektedir [6,7]. Tahsis edilen bütçelerin büyüklüğü, bakım ve onarım çalışmalarının belirli bir programda ve gerektiği kadar yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bakım ve onarım çalışmalarının türü ve tarihinin tespiti için otomatik yol muayene araçları ile hat geometrisi kontrolleri yapılarak demiryolunun durumu belirlenmeye çalışılır.

Gelişen teknolojiye paralel olarak demiryolu işletmesinin standartları da yükselmiştir. Avrupa genelinde ve ülkemizde Yüksek Hızlı Tren (YHT) hatlarında, hat geometrisi ölçümlerinin değerlendirilmesinde EN-13848 standart serisi kullanılmaktadır. Bu standartta, hattın geometrik kalitesinin değerlendirilirken üç gösterge tanımlanmıştır. Bunlar: İzole kusurların aşırı değerleri, 200 metre uzunluğundaki yol kesimleri için geometri değerlerinin standart sapması (SD) ve ortalama değerleridir. Bu normda demiryolu geometrisi için üç temel kalite düzeyi bulunmaktadır [8]:

- 1- Acil Eylem Limiti (IAL): Aşılması durumunda derayman riskini kabul edilebilir bir düzeye indirmek için önlemler alınmasını gerektiren sınır değerleri ifade eder. Bu, hattı kapatarak, hızı düşürerek veya hat geometrisini düzelterek yapılabilir;
- 2- Müdahale Sınırı (IL): Bir sonraki muayeneden önce acil eylem sınırına ulaşılmaması için aşılması durumunda düzeltici bakım gerektiren değeri ifade eder;
- 3-Uyarı Sınırı (AL): Aşıldığında, hat geometrisinin durumunun düzenli olarak planlanan bakım işlemlerinde analiz edilmesini ve dikkate alınmasını gerektiren değeri ifade eder [9].

Ana seviyelerin eşik değerleri hızın bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Ayrıca, fleş ve nivelman parametreleri için ana seviyelerin eşik değerleri kusurların dalga boyuna (λ) göre değişmektedir. Geometrik kusurların dalga boyları, yol-aracı etkileşimi için önemlidir. EN 13848'de dört dalga boyu tanımlanmıştır: Kısa dalga boylu kusurlar için D0 ($1m < \lambda \leq 5m$), orta dalga boyu D1 ($3m <$

$\lambda \leq 25\text{m}$), uzun dalga boyu D2 ($25\text{m} < \lambda \leq 70\text{ m}$) ve çok uzun dalga boyu D3 (nivelman için $70\text{ m} < \lambda \leq 150\text{ m}$ ve $70\text{ m} < \lambda \leq 200\text{ m}$ fleş için) [10]. Orta dalga boylu kusurlar yolcuların konforunu olumsuz etkilerken, kısa dalga boylu kusurlar tren dingillerinde ve tekerleklerinde daha fazla titreşim yaratır [11]. Geometrik düzgünlüklerin dalga boyları farklı demiryolu araçları ve/veya aynı aracın farklı hızları için enerji ağırlık katsayısını değiştirdiğinden yol/araç etkileşimini doğrudan etkilemektedir [12]. SD, genellikle D1 dalga boyunda nivelman ve fleş parametreleri için hesaplanır. EN 13848-6'ya göre SD, belirli bir dalga boyu aralığında demiryolu aracının oluşturduğu tepki sinyalinin enerjisine bağlıdır [13].

Demiryolunun işletme durumu genellikle hat geometrisi ölçüm verilerinden türetilen bir kalite indeksi ile sayısal olarak ifade edilir. Bugüne kadar, çeşitli istatistiksel veya ampirik yöntemler kullanılarak, dünya çapında üniversiteler, teknoloji firmaları ve demiryolu kuruluşlarındaki araştırmacılar tarafından bir çok demiryolu kalite indeksi (TQI) geliştirilmiştir. Hindistan demiryolları tarafından kullanılan hat geometri indeksi (TGI) [14], Avrupa Demiryolu Araştırma Merkezi (ORE) tarafından geliştirilen doğrudan standart sapma (SD) yaklaşımı [15], Çin de kullanılan hat kalite indeksi [16], Polonyalı araştırmacılar tarafından geliştirilen J indeksi [17], Kanada Ulusal Demiryolu Şirketi'nin hat kalite indeksi (TQI) [18], İsveç Ulusal Demiryolları tarafından kullanılan Q indeksi [19], Hollanda da ProRail tarafından kullanılan Q indeksi, İsveç'te kullanılan K değeri ve Amerikan demiryolu şirketi Amtrak tarafından geliştirilen lineer düzgünlük (R^2) indeksi, orta dalga boylu hat geometrisi verilerinin istatistiksel analizine dayanmaktadır [20].

2000 yılında Hyslip [2], demiryolu geometrisinin durumunu belirlemek için fraktal analiz yöntemine dayalı bir çalışma yapmıştır. Fraktal analiz metodolojisi, düşey hat geometrisinin farklı dalga boyları ve bunların genliklerine sahip birçok harmonik düzensizlik parçasının toplamından türetilebileceği gerçeğine dayanmaktadır [21]. Geleneksel demiryolu hattının düşey geometrisinin düzgünlük ve dalgalı görünümünün nicelenmesine dayanan bu çalışmada, Hyslip düşey hat geometrisinin fraktal boyutlarını hesaplamıştır. Elde edilen sonuçlara göre fraktal analiz, hat geometrisi verilerinin düzgünlüğünü ölçmek için iyi göstergeler sağlar ve böylece yol altyapısı durumunu değerlendirilebilir [2]. Daha sonra Landgraf ve Hansmann [21], Hyslip'in metodolojisini Avusturya Federal Demiryollarından gelen verilere uygulamışlardır.

Bu çalışmada, fraktal analiz yöntemi ile demiryolu hattının geometrik düzgünlüğünü değerlendirmek için bir yöntem önerilmektedir. Çalışmada, Ankara-Eskişehir YHT güzergâhında yapılan hat muayenelerinden elde edilen geometri verileri kullanılmıştır. Bu veriler ile hat geometrisi grafikleri çizilmiş ve yazılan program ile fleş ve nivelman parametreleri için yeni bir algoritma yazılarak fraktal boyutlar hesaplanmıştır. Fraktal analiz, 200 metre uzunluğundaki hat kesimlerine ait geometri grafikleri üzerinde yapılmıştır. Geometri grafiklerinin temel özelliği yatay düzlemde 1/5000, düşey düzlemde 1/1 ölçeğe sahip olmalarıdır. Bu ölçeklendirme ile hat geometrisi düzgünlükleri grafikte daha görünür hale gelir ve farklı dalga boylarındaki düzgünlükler fark edilebilir. Karşılaştırmalı sonuçlara göre, demiryolu hattında görülen geometrik düzgünlükler önerilen fraktal boyut ile sayısal olarak ifade edilebilir.

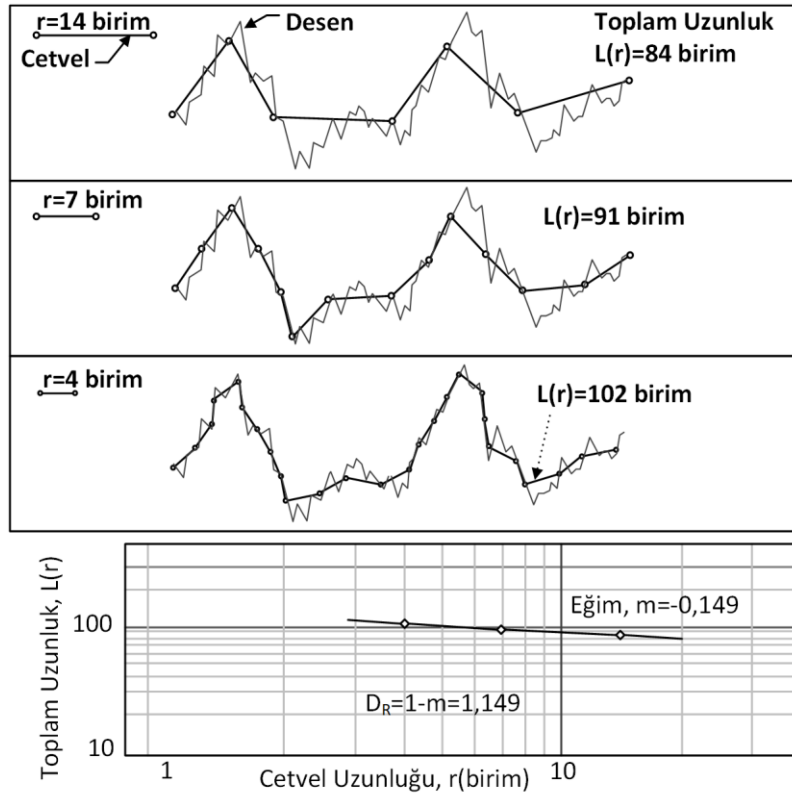
2. Metot

2.1. Fraktal analiz

Fraktal analiz, düzensiz, rastgele görünen desenleri nicelemek için kullanılan bir matematiksel yöntemdir [22]. Fraktal boyut ise yapılan analiz sonucunda hesaplanan, yapının karmaşıklığını veya düzgünlüğünü ifade eden ondalıklı sayısal bir değerdir. Bir desenin fraktal boyutu, desenin düzgünlük derecesine bağlı olarak değişir ve her desen için farklıdır [23]. Ayrıntılı, karmaşık desenlerin fraktal boyutları daha büyükken daha az karmaşık olan veya daha düzgün

geometriye sahip olan desenlerin fraktal boyutları daha küçüktür. Son yüzyılda matematik üzerinde önemli etkileri olan fraktal analiz yönteminin temel bilimler, çeşitli mühendislik dalları, mimarlık ve tıp gibi çeşitli alanlarda uygulamaları bulunmaktadır.

En sık kullanılan fraktal boyut hesaplama yöntemlerinden biri cetvel yöntemidir. Mandelbrot'un İngiltere kıyı şeridini ölçmek için yaptığı çalışma, bu yöntemin en bilinen örneklerindedir [22]. Bu yöntemde, bir desenin fraktal boyutunu hesaplamak için desenin uzunluğu farklı boylardaki cetvellerle ölçülür. Şekil 2, düzgünsüz bir desen üzerinde cetvel yönteminin nasıl uygulanabileceğini göstermektedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, çeşitli uzunluklara sahip cetveller, her seferinde bir noktayı kesecek şekilde desen üzerinde adım adım ilerletilir. Şeklin toplam uzunluğu ($L(r)$) basitçe cetvelin uzunluğunun (r) adım sayısı (N) ile çarpılması ile hesaplanır. Ölçümde kullanılan cetvel boyutu küçüldükçe, desenin ölçülen toplam uzunluğu artar. Cetvel boyutu küçüldükçe, cetveller düzgünsüz desende daha fazla noktada kesişir ve ölçümün doğruluğu artar. Daha sonra $\log(r)$ ve $\log L(r)$ grafiği çizilir. Desenin fraktal boyut (D_R) değeri, Şekil 2'de gösterildiği gibi grafikteki noktalar arasındaki ilişkiyi gösteren eğilim çizgisinin eğimi (m) kullanılarak hesaplanır [2].



Şekil 2. Cetvel metodu ile fraktal boyut hesabı [2]

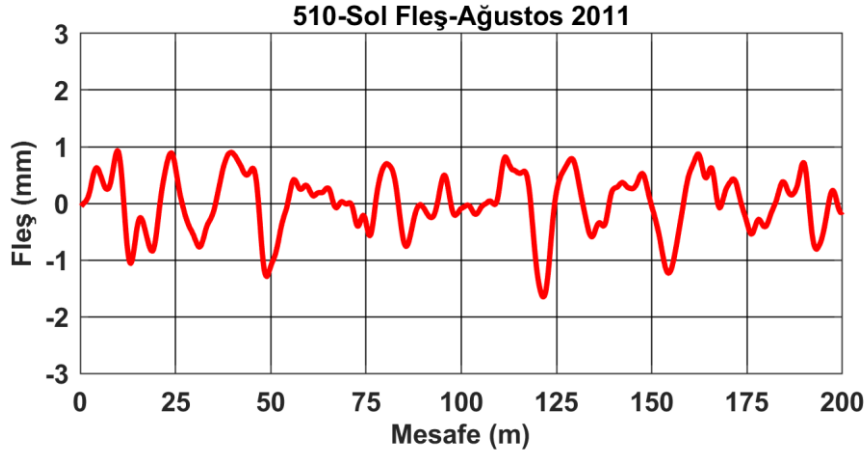
Gerçek fraktallar, ölçek ne kadar büyütülürse büyütülsün aynı örüntüyü gösteren ve bir fraktal boyutu olan kendine benzer yapılardır. Doğal fraktallar ise belirli bir sınır değer içinde benzer özelliklere sahip yapılardır. Doğal fraktal desenler büyütüldükçe, farklı desenler ortaya çıkar veya fark edilir hale gelir [24]. Bu özelliklerinden dolayı birçok fraktal boyuta sahiptirler ve fraktal boyut her inceleme düzeyinde farklı bir değer alır. Buna çoklu-fraktal özellik denir. Çoklu-fraktal bir yapının her bir fraktal boyutu, her bir inceleme düzeyinde desenin düzgünlüğünün göstergesidir. Hyslip'in çalışmasında gösterdiği gibi, demiryolu hattının geometrisi, farklı ölçeklerde farklı detaylar gösterdiği için doğal bir fraktal yapı olarak kabul edilmektedir.

2.2. Hat geometrisi verileri

Türkiye'nin ilk YHT hattı olan Ankara-Eskişehir yüksek hızlı demiryolu 2009 yılında işletmeye açılmıştır. Demiryolunu üstyapısında UIC 60 tipi uzun kaynaklı raylar, B 70 tipi öngerilmeli betonarme traversler ve bazalt kökenli balast malzemesi kullanılmıştır. Çift hat olarak tasarlanmış demiryolunun uzunluğu 245 km, hat açıklığı 1435 mm, dingil yükü 22,5 ton ve azami işletme hızı da 250 km/s'dir. Hat kontrol çalışmalarında özel ekipmanlarla donatılmış Piri Reis isimli ölçüm treni kullanılmaktadır. Bu araç 250 km/s hızla giderken her 0,25 m de bir hat geometrisi parametrelerini ölçebilme kapasitesine sahiptir. Piri Reis treni ölçümler sırasında kendi hızını da kaydetmektedir. Böylece ölçüm esnasındaki hız değişimleri de kayıt altına alınmaktadır. EN-13848-5 standardında göre yapılan ölçümler her iki hat için ayrı ayrı yapılmaktadır. Yüksek hızlı demiryolunda sadece yolcu trenleri hizmet etmektedir. Bu çalışmada kullanılan verilerin toplandığı tarihlerde yüksek hızlı demiryolunda karşılık olarak günde ortalama 10 sefer yapılmaktaydı. Dolayısıyla YHT hattı düşük trafik hacmine sahiptir.

Ağustos 2011, Aralık 2011, Mart 2012, Temmuz 2012 ve Kasım 2012 tarihlerinde yapılan 5 farklı hat geometrisi ölçümü bu çalışmanın temel verilerini oluşturmaktadır. Hesaplarda kullanılan veriler demiryolunun 518+880 ile 322+211 kilometreleri arasında kalan yaklaşık 197 kilometrelik kesimine aittir. Daha önce belirtildiği gibi yüksek hızlı demiryolu platformu yan yana çift hatlıdır. Yapılan ilk yüzeysel incelemede komşu hatların geometrilerinde meydana gelen değişimler arasında anlamlı bir farklılık olmadığı görülmüştür. Örneğin hatlarda meydana gelen kusurların bulunduğu kesimler aynı olmakla beraber kusurların miktarlarının da yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür [25]. Bu yüzden çalışmada yalnızca "Kuzey Hattı" olarak isimlendirilen hatta ait ölçüm verileri dikkate alınmıştır. Bu veriler 197 km'lik hat uzunluğu göz önüne alındığında her ölçümde her bir geometri parametresi(nivelman, fleş, burulma, dever ve ekartman) için ayrı ayrı yaklaşık 800000 noktasal ölçümü içermektedir. Bu bilgiler doğrultusunda hat 200 metre uzunluğunda 989 alt kesime bölündü. Yapılan incelemede bu alt kesimlerin sadece 43 tanesinde yapılan 5 ölçümde en az bir kere EN-13848-5'de belirtilen sınır değerleri aşan kusurlar oluştuğu görülmüştür. Bundan dolayı araştırmada bu kesimler üzerine odaklanılmıştır.

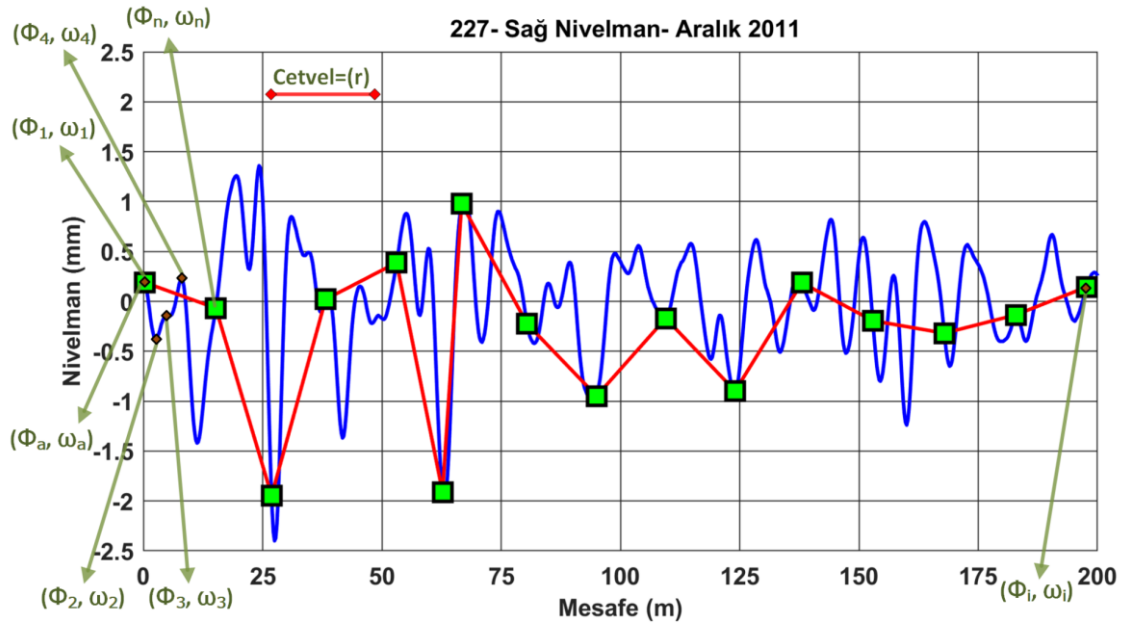
Hat geometrisi ölçüm verilerinin fraktal analizini yapmak için ilk olarak dikkate alınan alt kesime ait geometri grafiğinin çizilmesi gerekti. Her ne kadar ölçüm treninin yaptığı kontroller sonucunda hat geometrisi grafikleri çizilse de bu çalışmada yapılacak hesaplar için noktasal ölçüm verileri kullanılarak alt-kesimlerin geometri grafikleri bilgisayar ortamında yeniden oluşturuldu. Her bir ölçüme ait noktasal ölçüm verileri topluluğu içinden incelenen 43 alt-kesime ait nivelman ve fleş değerleri alındı. Bu değerler kullanılarak her bir alt kesimde sağ ve sol ray dizileri için ayrı ayrı fleş ve nivelman grafikleri çizildi. Özetle her bir alt-kesim için 2 adet nivelman ve 2 adet fleş olmak 4 farklı grafik çizildi. 5 farklı zamanda yapılan ölçüm verileri kullanılarak toplamda 860 farklı grafik çizildi. Şekil 3 de 200 metre uzunluğundaki bir alt kesim için fleş parametresine ait bir hat grafiği örneği görülmektedir. Grafiğin üstünde kesim numarası-ölçüm zamanı (ay ve yıl olarak)-geometrik parametre bilgileri bulunmaktadır.



Şekil 3. Demiryolu geometrisi (Fleş) grafiği örneği

2.3. Fraktal boyut hesap algoritması

Çalışmanın devamında çizilen grafiklerin fraktal boyutunu hesaplamak için MAT-LAB ortamında bir program yazıldı. Programın temel mantığı farklı uzunluktaki cetvellerin grafik eğrisi üzerinde adım adım ilerletilerek fraktal boyutların hesaplanmasına dayanmaktadır. İlk olarak ham ölçüm verilerini kullanarak yatay düzlemde 1/5000 ve düşey düzlemde 1/1 ölçeğe sahip olan geometri grafiği oluşturulur. Kullanılan ölçek değerleri hat kontrol treninin oluşturduğu grafiklerin ölçekleri ile aynıdır. Bu grafikler büyütüldüğünde uç uca eklenmiş doğru parçalarından oluştuğu açıkça görülmektedir. Daha sonra belirlenen boyda bir cetvel geometri grafiği üzerinde adım adım ilerletilir ve grafik eğrisinin boyu ölçülür. Şekil 4 yazılan program tarafından oluşturulan örnek bir şekildir. Şekil 4 de geometri grafiği üzerinde ilerletilen cetvellerin boyları farklı gibi görünmektedir. Bu durum şeklin yatay ve düşey düzlemlerde farklı ölçeklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Her bir cetvelin başlangıç ve son noktalarının koordinatlarından yola çıkarak yapılan hesaplarda farklı gibi görünen cetvel boylarının birbirine eşit olduğunu doğrulanmıştır. Cetvel adım adım ilerletilirken cetvelin başlangıç ve son noktaları geometri eğrisi üzerine denk gelmelidir. Yani grafik eğrisi üzerinde cetvelin denk geldiği noktaların koordinatları belirlenmelidir. Bunun için daire denklemini temel alan bir hesaplama yapılmıştır [25].



Şekil 4. Fraktal programında cetvelin adım adım ilerletilmesi

Ölçümde kullanılacak ilk cetvelin başlangıç noktası (Φ_a, ω_a) ve son noktası (Φ_n, ω_n) olarak isimlendirilirse (Şekil 4) cetvel uzunluğu (r) için daire denkleminde yararlanılarak aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$r^2 = (\Phi_n - \Phi_a)^2 + (\omega_n - \omega_a)^2 \quad (1)$$

Geometri grafiğini oluşturan doğrulardan ilkinin başlangıç (Φ_1, ω_1) ve son noktaları (Φ_2, ω_2) bilindiğinden bu doğrunun eğimi (m) aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanır.

$$m = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Phi_2 - \Phi_1} \quad (2)$$

Ölçüme grafiğin ilk noktasından başlanacağı için (Φ_a, ω_a) ve (Φ_1, ω_1) noktaları aynı noktaları gösterir. Eğer cetvelin son noktasının geometri grafiğini oluşturan ilk doğrunun doğrultusu üzerinde olduğu kabul edilirse, (Φ_n, ω_n) noktasının koordinatları, (Φ_1, ω_1) ve m 'e bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\omega_n = m * (\Phi_n - \Phi_1) + \omega_1 \quad (3)$$

Denklem 1.'deki üstel ifade açılırsa aşağıda verilen Denklem 4. elde edilmektedir.

$$\Phi_n^2 - 2\Phi_n\Phi_a + \Phi_a^2 + \omega_n^2 - 2\omega_n\omega_a + \omega_a^2 - r^2 = 0 \quad (4)$$

ω_n değeri Denklem 3.'de ifade edildiği şekilde Denklem 4.'de yerine yazılırsa aşağıda verilen Denklem 5. elde edilmektedir.

$$\Phi_n^2 - 2\Phi_n\Phi_a + \Phi_a^2 + m^2\Phi_n^2 - 2m(m\Phi_1 - \omega_1)\Phi_n + (\omega_1 - m\Phi_1)^2 - 2m\omega_a\Phi_n + 2m\Phi_1\omega_a - 2\omega_1\omega_a + \omega_a^2 - r^2 = 0 \quad (5)$$

Denklem 5. ikinci dereceden bir denklemi göstermektedir. Denklem 5.'de Φ_n ifadesi dışında kalan bütün değerler bilinen değerlerdir. Bilinmeyen Φ_n ifadesine göz önüne alınarak aşağıdaki katsayılar elde edilir.

$$X = (m^2 + 1)\Phi_n^2 \quad (6)$$

$$Y = (-2\Phi_a - 2m(m\Phi_1 - \omega_1) - 2m\omega_a)\Phi_n \quad (7)$$

$$Z = \Phi_a^2 + (\omega_1 - m\Phi_1)^2 + 2m\Phi_1\omega_a - 2\omega_1\omega_a + \omega_a^2 - r^2 = 0 \quad (8)$$

X, Y ve Z katsayıları yardımı ile Denklem 5. aşağıdaki eşitliğe dönüşmektedir

$$X\Phi_n^2 + Y\Phi_n + Z = 0 \quad (9)$$

Bu aşamadan sonra denklemin kökleri araştırılır. Köklerin bulunması için ikinci derece denklemin diskriminant (Δ) değeri incelenir.

- $\Delta < 0$ ise Φ_n değeri bakılan doğru üzerinde değildir. Bu durumda (Φ_n, ω_n) 'in bir sonraki doğru parçası üzerinde olduğu kabul edilerek için aynı işlemler bir sonraki doğru parçasının koordinatları kullanılarak tekrarlanır.
- $\Delta = 0$ ise denklemin çakışık iki kökü vardır. Bu durumda bulunan Φ_n değerinin geometri grafiğini oluşturan ilk doğru üzerinde olup olmadığına bakılır. Eğer, $\Phi_2 \geq \Phi_n > \Phi_a$ ise Φ_n ilk doğru üzerindedir. Fakat $\Phi_n > \Phi_2$ ise Φ_n ilk doğru parçası üzerinde değildir. Bu durumda (Φ_n, ω_n) 'in bir sonraki doğru parçası üzerinde olduğu kabul edilerek aynı işlemler tekrarlanır.
- $\Delta > 0$ ise denklemin ayrık iki kökü vardır. Bulunan kök değerlerinin en az bir tanesinin veya her ikisinin birden grafiğin ilk doğru parçası üzerinde olup olmadığına bakılır. Eğer $\Phi_2 \geq \Phi_n > \Phi_a$ ise Φ_n ilk doğru üzerindedir eğer kökler bu aralığın dışında ise (Φ_n, ω_n) 'in bir sonraki doğru parçası üzerinde olduğu kabul edilerek için aynı işlemler tekrarlanır.

Yukarıda anlatılan işlemler sonunda birinci adımda kullanılan cetvelin son noktası belirlenmiş olur. Birinci adımda belirlenen cetvelin son noktası ikinci adımın ilk noktasıdır. İkinci cetvel adımında aynı yaklaşım uygulanır ve ikinci adımın son noktası belirlenir. Adım adım ilerleme tüm grafik boyunca devam eder ve başlangıç noktasından son noktaya kadar kaç adım atıldığı belirlenir. Bulunan adım sayısı (N) ile kullanılan cetvelin uzunluğu (r) çarpılınca toplam grafik uzunluğu (L) hesaplanmış olur. Aynı işlemler farklı uzunluktaki cetvellerle tekrarlanarak her bir cetvel uzunluğunda ölçülen toplam grafik boyu belirlenir. Burada cetvel uzunluğu küçüldükçe ölçülen grafik boyu da büyüyecektir. Farklı cetveller için grafik boyları belirlendikten sonra Denklem 10. yardımıyla analizi yapılan geometri parametresi için fraktal boyut belirlenmiş olur.

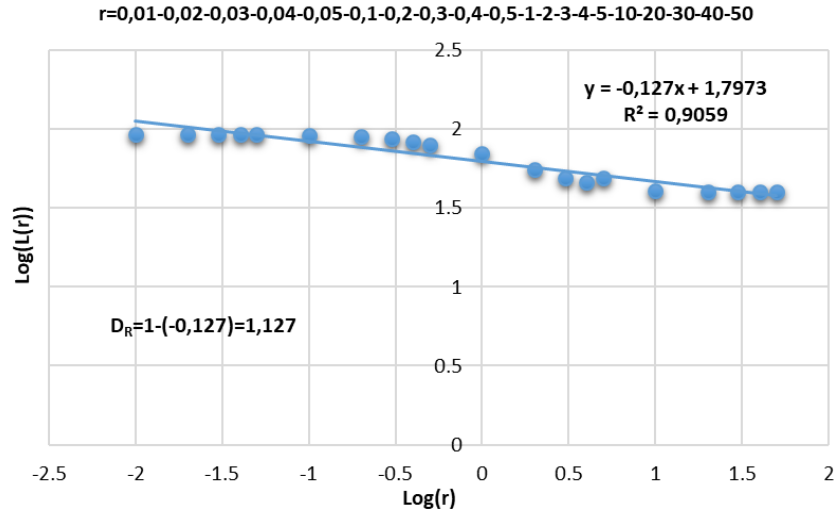
$$D_R = - \frac{\sum(\text{Log}_{10}(N)\text{Log}_{10}(L)) - (\sum \text{Log}_{10}(N) \sum \text{Log}_{10}(L))/J}{\sum(\text{Log}_{10}(L))^2 - (\sum(\text{Log}_{10}(L))^2)/J} \quad (10)$$

Burada D_R , geometri parametresinin fraktal boyutu, N ölçümde kullanılan cetvelin adım sayısı, r, ölçümde kullanılan cetvelin boyu ve J ise kullanılan farklı uzunluktaki cetvellerin sayısıdır [26].

2.4. Fraktal boyut hesabı için cetvel boyu seçimi

Fraktal boyut hesabı için cetvel boyunun seçilmesi gerekir. Bu çalışmada hangi uzunlukta cetvellerin kullanılacağına karar verilirken geometri grafiklerinin boyutları göz önüne alındı. Geometri grafikleri yatayda 1/5000 ve düşeyde 1/1 ölçeğe sahip olduğundan 200 metre uzunluğunda hat kesimleri için grafik boyu yatay ekseninde 40 mm'dir. Düşey eksen değerleri ise geometri parametresinin mm cinsinden ölçülen değerlerine göre ve 0.01 mm hassasiyetle değişmektedir. Bundan dolayı fraktal boyut hesabında kullanılacak cetvel uzunluklarının milimetre cinsinden değişen boyutlarda olmasına karar verildi. Ayrıca fraktal boyut hesabında $\text{Log}(r)-\text{Log}L(r)$ grafiklerinde ki noktalar arasındaki ilişkiyi gösteren regresyon doğrusunun belirtme katsayısı (R^2) 1'e yakın olması gerektiğinden cetvel uzunluğu seçiminde (R^2) değeri de dikkate alınmıştır. Bu çalışmada fraktal boyut hesabı için cetvel boyları 0.01-0.02-0.03-0.04-0.05-

0.1-0.2-0.3-0.4-0.5-1-2-3-4-5-10-20-30-40-50 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 5 de seçilen cetvel boyları için fraktal boyut hesap grafiği görünmektedir. Grafiğin eğilim çizgisinin belirtme katsayısı da ($R^2=0,9059$) seçilen cetvel boylarının uygunluğunu desteklemektedir.



Şekil 5. Fraktal boyut hesap grafiği

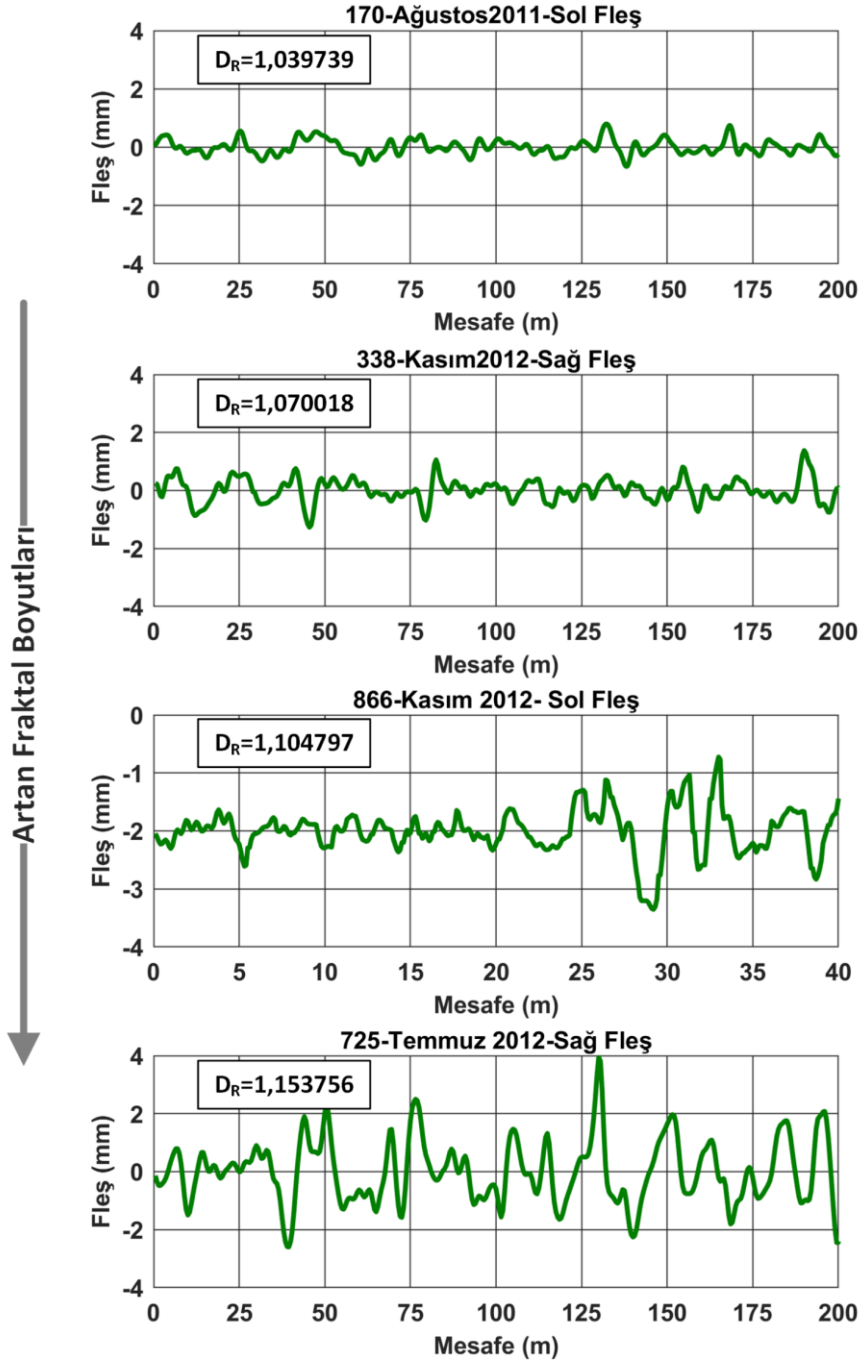
3. Bulgular

Tablo 1 bu çalışmada kullanılan hat geometrisi verilerine göre nivelman ve fleş parametreleri için hesaplanan fraktal boyutların en büyük ve en küçük değerlerini göstermektedir. Tablo 1 'e göre geometrik parametreler için gidiş yönüne göre sağ ve sol ray dizlerinin her ikisi içinde hesaplanan fraktal boyutlar birbirine yakındır. Yani her bir geometrik parametre için sağ sol ray dizlerinde benzer geometrik desenler oluşmaktadır.

Tablo 1. Fleş ve nivelman için fraktal boyutların değişimi

Geometrik Parametre		Fleş		Nivelman	
		Sağ	Sol	Sağ	Sol
Fraktal Boyut	En küçük	1,041847	1,033525	1,042444	1,052363
	En büyük	1,153756	1,151911	1,228617	1,225414

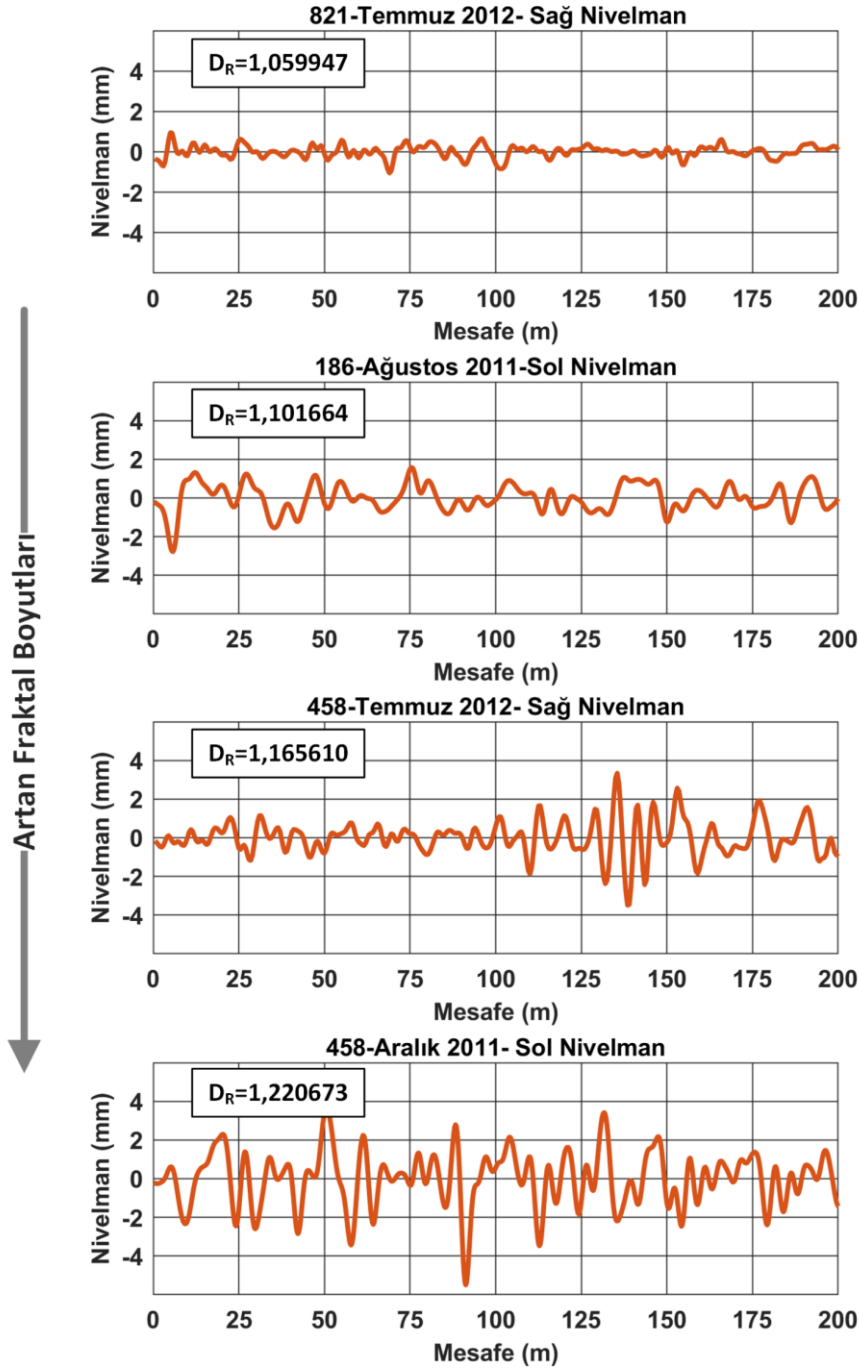
Şekil 6 fleş parametresi için fraktal boyutlar artış yönünde değiştikçe hat kesimi grafiklerinin nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi fraktal boyut büyüdükçe hat geometrisi deseni daha dalgalı, düzensüz bir hal almaktadır. Fraktal boyutların küçük değerleri için kısa boylu, yuvarlak tepeli ve küçük genlikli dalgalardan oluşan bir geometrik desen oluştuğu görülmektedir. Bu tür grafiklerde geometri değişimleri de küçük aralıkta (-1 ile +1 mm arası) meydana gelmektedir.



Şekil 6. Fleş parametresi için artan fraktal boyutlarla hat geometrisi grafiklerinin değişimi

Fraktal boyut büyüdükçe orta boylu, sivri tepeli ve daha büyük genlikli düzgünlük dalgalarında oluşan bir desen oluşmakla beraber orta ve kısa boylu düzgünlük dalgalarının her ikisi de daha sık görülmektedir. Bu tür grafiklerde geometri değişimleri daha büyük bir aralıkta (-4 ile +4 mm arası) meydana gelmektedir Ayrıca büyük fraktal boyutlu grafikler de oluşan izole kusurlarda EN-13848-5’de belirtilen eşik değerlere yaklaşmış veya onları aşmıştır. Dikkate alınan hat kesimi için oluşan izole kusurlar AL ve IL sınıfıdır.

Şekil 7 nivelman parametresi için fraktal boyutlar artış yönünde değiştiğinde hat kesimi grafiklerinin nasıl değiştiğini göstermektedir.



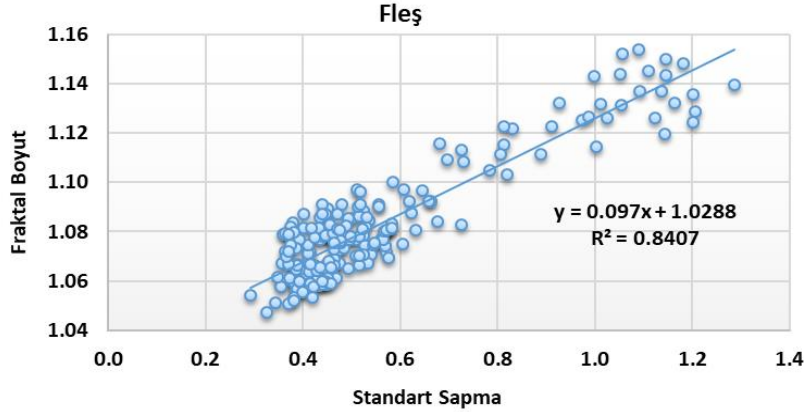
Şekil 7. Nivelman parametresi için artan fraktal boyutlarla hat geometrisi grafiklerinin değişimi

Şekil 7’de ki grafiklerde oluşan değişimlerde fleş grafiklerine benzer şekildedir. Fraktal boyut değerleri arttıkça oluşan geometri deseni daha düzgünsüz bir görünüm sergilemektedir. Bunun dışında Tablo 1 den de görülebileceği gibi nivelman grafikleri için hesaplanan en büyük fraktal boyut değeri fleş grafikleri için hesaplanan en büyük değerden daha büyüktür. Bunun nedeni nivelman grafiklerinin oluşan izole kusurların daha büyük değerler almasıdır. Fleş grafiklerinde değişimler düşey düzlemde -4 ile +4 mm arasında meydana gelirken nivelman grafiklerinde düşey düzlemdeki değişimler -6 ve +6 mm arasında meydana gelmektedir.

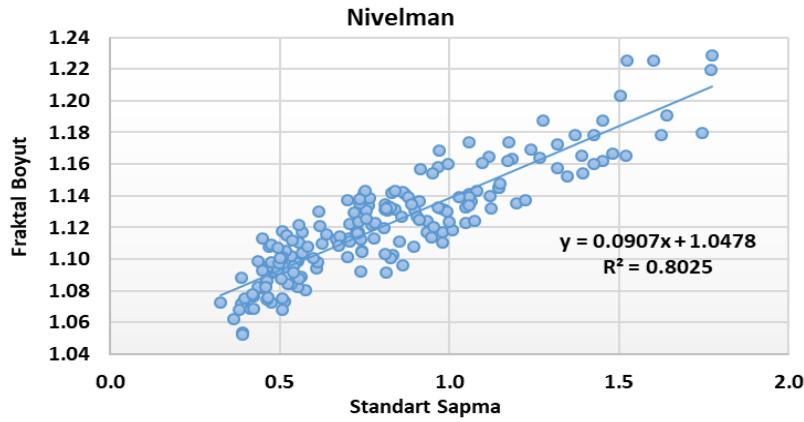
Hesaplanan Fraktal boyut ile demiryolu hat geometrisi grafiklerindeki geometri değişimlerinin oluşturduğu dalgaların boyları, genlikleri, oluşan dalgaların tepelerinin yuvarlaklığı ve geometri

parametresinin aldığı değer açısından değerlendirme yapılabilmektedir. Böylece demiryolu hat geometrisi grafiklerinin ne kadar kırıklı ya da düzgün olmayan bir yapıya sahip olduğunun kıyaslaması yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, fraktal boyut değerleri ile hattın işletme koşullarının belirlenebilmesi için 43 farklı kesimin fleş ve nivelman parametrelerine ait toplam 860 grafiğin fraktal boyutları hesaplanmıştır. Yapılan incelemede ayrıca her bir kesimde sağ ve sol ray dizilerinin fleş ve nivelman okumalarının en büyük standart sapma değerleri ile sağ ve sol ray dizilerinin en büyük fraktal boyutları arasında yüksek bir ilişki olduğu gözlenmiştir. (Şekil 8 ve Şekil 9)



Şekil 8. Fleş parametresi için standart sapma-fraktal boyut ilişkisi



Şekil 9. Nivelman parametresi için standart sapma-fraktal boyut ilişkisi

Bu çalışmada dikkate alınan yüksek hızlı tren hattında, güvenlik önlemlerinin üst düzeyde olması nedeniyle, sürekli bakım ve onarım çalışmaları yapılmaktadır. Bu nedenle belirli bir yol kesiminde meydana gelen bozulmaların zamana bağlı olarak değişimi ve dolayısıyla hat kesimlerinin fraktal boyutlarının zamana bağlı değişimi de incelenememiştir. Örneğin 170 numaralı kesimde sağ ray dizisinde fleş parametresi için Ağustos 2011, Aralık 2011, Mart 2012, Temmuz 2012 ve Kasım 2012 tarihlerin yapılan ölçümler sonucunda hesaplanan fraktal boyutlar sırasıyla 1,06171-1,06006- 1,057512-1,07792 ve 1,05963 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlarda olduğu gibi fraktal boyutlar zamanla inişli çıkışlı bir değişim gösterdiğinden bozulmaların değişim trendi izlenememiştir.

4. Sonuç

Demiryolu hattının işletme durumunu tanımlamak için yaygın olarak kullanılan indeksler genellikle istatistiksel yaklaşımlardan türetilir. İndeks değerlerin hesap esasları kusurların genliğine odaklanır ve geometrik düzensizliklerin dalga boyunu ihmal eder. Geometrik düzensizliklerin dalga boyları, yol/araç etkileşimi için önemlidir. Bu nedenle, yol durumunun belirlenmesinde geometrik düzensizliklerin dalga boyu dikkate alınmalıdır. Bu amaçla, bu çalışmada, hat geometrisi düzensizliklerinin dalga boylarını niceleyen fraktal analize dayalı bir yaklaşım önerilmiştir.

Yapılan hesaplamalara dayanarak, hat geometrisinin genel düzgünsüzlüğünün fraktal boyut ile sayısal olarak ifade edilebildiği belirlenmiştir. Bu, önerme fraktal boyutun SD'ye bir alternatif olabileceği anlamına gelir. Yine de bu önermenin desteklenmesi gerekmektedir. Ülkemizde YHT hatlarında bakım ve onarım çalışmaları EN-13848 standartlarında belirtilen üç ana kalite düzeyi dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu çalışmada dikkate alınan yüksek hızlı tren hattında, güvenlik önlemlerinin üst düzeyde olması nedeniyle, hat geometri kontrolleri beklenmeden, tren sürücülerinin ve teknik personelin görüşleri alınarak YHT hattında sürekli bakım ve onarım çalışmaları yapılmaktadır. Bu, durum gözlemlenebilecek kusurların miktarını ve hat geometrisi model tipini sınırlamıştır. Bu nedenle farklı kusur türlerinin meydana geldiği durumlarda fraktal boyutların nasıl değişebileceği tam olarak belirlenememiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, herhangi bir yol kesitinde önerilen fraktal boyutların değişimi gözlemlenerek, yol geometrisinin bozulma eğilimi değerlendirilebilir. Bu değerlendirmeye demiryolunun temel işletme parametreleri olan trafik ve hız sınıfları da dahil edilerek fraktal boyutlarla geometrik bozulmaların limit değerleri belirlenebilir. Böylece hat trafiği yönetiminde karar alma aşamasında fraktal boyutlar kullanılarak demiryolunda ne zaman hız kısıtlaması yapılacağına karar verilebilir. Ayrıca geometrik parametrelerin önem katsayıları belirlenerek fraktal boyutlardan tek bir hat kalite indeks değeri elde edilebilir. Böylece etkin bakım ve onarım planları yapılabilir.

Kaynakça

- [1] M.V. Taciroğlu, M. Karaşahin, M. Tığdemir, “Yüksek hızlı tren hatlarında hat kalitesine etki eden parametreler üzerine bir çalışma”, *Ç. Ü. Müh.Mim. Fak. Dergisi*, Cilt 31, Sayı 2, s. 279-291, Aralık 2016
- [2] J.P. Hyslip, “Fractal Analysis of Geometry Data for Railway Track Condition Assessment,” Ph.D. Thesis, Dept. Civil and Environ. Eng., Grad. School of the Univ. of Massachusetts, Massachusetts, 2002.
- [3] F.J. Heyns, “Construction and maintenance of underground railway tracks to safety standard of SANS: 0339,” *J. South Afr. Inst. Min. Metall.*, vol.106, no. 12, 2006
- [4] A.R.B. Berawi, R. Delgado, R. Calçada, C. Vale, “Evaluating track geometrical quality through different methodologies,” *Int. J. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 38–47, 2010
- [5] J. Sadeghi, H. Heydari, E. Amiri Doloei, “Improvement of railway maintenance approach by developing a new railway condition index,” *J. Transp. Eng. Part A.*, vol. 143, no.8, 2017
- [6] T. Lidén, “Railway infrastructure maintenance - a survey of planning problems and conducted research,” *Transport. Res. Procedia*, vol. 10, no.7, pp. 574–583, 2015, doi:10.1016/j.trpro.2015.09.011
- [7] A. Falamarzi, S. Moridpour, M. Nazem, “A review of rail track degradation prediction models,” *Aust. J. Civil Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 152–166, 2019, doi:10.1080/14488353.2019.1667710
- [8] P. Yalınz, S. İça, “Demiryollarında düzeltici bakım çalışmalarının etkilerinin standart sapma yöntemi ile değerlendirilmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 29-42, Jan. 2021, doi: 10.47072/demiryolu.802565
- [9] *Railway applications-Track — Track geometry quality, part 5: Geometric quality levels – plain line, switches and crossings*, EN-13848-5, 2017
- [10] *Railway applications-Track — Track geometry quality, part 1: Characterisation of track geometry*, EN-13848-1, 2019

- [11] I. Soleimanmeigouni, A. Ahmadi, U. Kumar, "Track geometry degradation and maintenance modelling: A review," *Proc. IMechE Part F: J. Rail Rapid Transit.*, vol. 232, no.1, pp. 73–102, 2018, doi:10.1177/0954409716657849
- [12] H. Li, T. Xiao, "Improved generalized energy index method for comprehensive evaluation and prediction of track irregularity", *J. Stat. Comput. Simul.*, no. 84, pp. 1213–1231, 2014, https://doi.org/10.1080/00949655.2013.797420
- [13] *Railway applications-track — Track geometry quality, part 6: Characterisation of track geometry quality*, EN-13848-6, 2014
- [14] J.S., Mundrey, *Railway Track Engineering*. New Delhi, India: McGraw-Hill, 2003
- [15] J. Sadeghi, "Development of railway track geometry indexes based on statistical distribution of geometry data," *J. Transport. Eng., ASCE*, vol.136, no.8, pp. 693–700, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2010)136:8(693)
- [16] P. Xu, Q. Sun, R. Liu, F. Wang, "A short-range prediction model for track quality index," *Proc. Inst. Mech. Eng. F J Rail Rapid Transit.*, vol. 225, no.3, pp. 277–285, 2011
- J. Madejski, J. Graboznyk, "Continuous geometry measurement for diagnostics of tracks and switches," *In Proceedings of the International Conference on Switches*, Delft, Netherlands, 2002
- [17] R.K. Liu, P. Xu, Z.Z. Sun, C. Zou, Q.X. Sun, "Establishment of track quality index standard recommendations for beijing metro," *Discrete Dyn. Nat. Soc.*, vol. 2015, doi: 10.1155/2015/473830
- [18] I. Arasteh Khouy, P. Larsson-Kraik, A. Nissen, U. Juntti, H. Schunnesson, "Optimisation of track geometry inspection interval," *Proc. IMechE, Part F: J. Rail Rapid. Transit.*, vol. 228, no.5, pp.546–556, 2014, doi: 10.1177/0954409713484711
- [19] A. Falamarzi, S. Moridpour, M. Nazem, "A time-based track quality index: Melbourne tram case study," *Int. J. Rail Transport.*, vol. 9, no.1, pp. 23–38, 2019, doi:10.1080/23248378.2019.1703838
- [20] M. Landgraf, F. Hansmann, "Fractal analysis as an innovative approach for evaluating the condition of railway tracks," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit.*, vol. 233, no. 6, pp. 596–605, 2019, doi:10.1177/0954409718795763
- [21] B. Mandelbrot, *The fractal geometry of nature*, San Francisco, USA:W.H: Freeman and Company, 1983
- [22] B.H. Kaye, *A random walk through fractal dimesions*, New York, USA:VCH Publishers, 1989
- [23] B.L. Cox, J.S.Y. Wang, "Fractal surfaces: Measurement and applications in the earth sciences", *Fractals*, vol. 1, no.1, pp. 87–115, 1993
- [24] M.V. Taciroğlu, "Yüksek hızlı tren hatlarında fleş ve nivelman bozulmalarının modellenmesi," Doktora Tezi, İnş. Müh. ABD, Fen Bil. Enst. Süleyman Demirel Üniv., Isparta, 2015
- [25] E. Kolay, K. Kayabalı, "Agregaların köşeliliğinin ve pürüzlülüğünün belirlenmesinde fraktal boyut yönteminin kullanılması," *Yerbilimler*, cilt 26, sayı 2, 2005

Özgeçmiş



Murat Vergi TACİROĞLU

1981 yılında doğmuştur. İnşaat mühendisliği alanında lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini Süleyman Demirel Üniversitesinde tamamlamıştır. Mersin Üniversitesinde Dr. Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları demiryolu hat geometrisi, demiryolu üstyapısı ve karayolu üstyapısıdır.
E-Posta: mtaciroglu@mersin.edu.tr



Mustafa KARASAHİN

1964 yılında doğmuştur. İnşaat mühendisliği alanında lisans eğitimini Akdeniz Üniversitesinde, yüksek lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesinde ve doktora eğitimini The University of Nottingham da tamamlamıştır. İstanbul Gelişim Üniversitesinde Profesör Doktor olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları hava limanları, karayolu üstyapısı ve demiryolu mühendisliğidir.
E-Posta: mkarasahin@gelisim.edu.tr

**Mesut TIĞDEMİR**

1970 yılında doğmuştur. İnşaat mühendisliği alanında lisans eğitimini Akdeniz Üniversitesinde, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini Süleyman Demirel Üniversitesinde tamamlamıştır. Süleyman Demirel Üniversitesinde Profesör Doktor olarak çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları karayolu üstyapısı, bilgisayar destekli modelleme ve demiryolu mühendisliğidir.

E-Posta: mesuttigdemir@sdu.edu.tr

**Hakan İŞİKER**

1979 yılında doğmuştur. Elektrik-elektronik mühendisliği alanında lisans eğitimini Niğde Üniversitesinde, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini Mersin Üniversitesinde tamamlamıştır. Mersin Üniversitesinde Dr. Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları pasif/aktif radarlar, yapay zekâ ve görüntü işlemedir.

E-Posta: hakan.isiker@mersin.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Murat Vergi TACIROĞLU: Kavramsallaştırma, Görselleştirme, Metodoloji, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Mustafa KARAŞAHİN: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Mesut TIĞDEMİR: Yazma-orijinal taslak hazırlama, İnceleme. Hakan İŞİKER: Yazılım, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Katener Sistemlerindeki İzolatör Kusurlarının Derin Öğrenme ile Tespiti

Gülşah KARADUMAN*^{ID}, Erhan AKIN^{ID}, Berkan BİNAY^{ID}, Miraç DİLEKLİ^{ID}

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

*gkaraduman@firat.edu.tr

(Alınış/Received: 10.05.2022, Kabul/Accepted: 22.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: İzolatörler elektrikli demiryolu hatlarında katener sistemlerin en önemli bileşenleridir. İzolatörlerde meydana gelen kırıklar veya yanmalar ulaşımda kesintilere neden olmaktadır. Bu kesintiler de özellikle yüksek hızlı ray hatlarında güvenli çalışmayı engeller. İzolatörlerdeki arızaların erken bir aşamada tespit edilmesi katener sistemlerine en uygun zamanda müdahale etmeyi ve izolatör kaynaklı kazaları engellemeyi sağlayacaktır. Bu makalede katener sistemlerindeki izolatörleri arızalı ya da sağlam olarak sınıflandırmak için derin öğrenme tabanlı bir yöntem önerilmektedir. Çalışmada 1100 adet izolatör görüntüsü içeren bir veri seti kullanılmıştır. Bu veri setindeki görüntüler ResNet34 derin öğrenme mimarisi ile eğitilmiş ve test edilmiştir. Önerilen mimari ile izolatörlerdeki arızalar %95,7 doğruluk, %99 kesinlik ve %96,6 duyarlılık değerleriyle sınıflandırılmıştır. Bu değerler gerçekleştirilen çalışmanın katener sistemlerindeki izolatörlerdeki arıza tespiti için güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Katener, İzolatör, Derin öğrenme, Sınıflandırma, ResNet34

Detection of Insulator Faults in Catenary Systems with Deep Learning

Abstract: Insulators are the most important components of catenary systems in electrified railway lines. Fractures or burns in insulators cause interruptions in transportation. These interruptions also prevent safe operation, especially on high-speed rail lines. Detecting faults in insulators at an early stage will enable to intervene in catenary systems at the most appropriate time and prevent insulator-related accidents. In this article, a deep learning-based method is proposed to classify insulators in catenary systems as faulty or intact. A data set containing 1100 insulator images was used in the study. The images in this dataset are trained and tested with the ResNet34 deep learning architecture. With the proposed architecture, faults in insulators are classified with 95,7% accuracy, 99% precision and 96,6% recall values. These values show that the performed study is a reliable method for fault detection in insulators in catenary systems.

Keywords: Catenary, Insulator, Deep learning, Classification, ResNet34

1. Giriş

Raylı sistemlerde izolatörler, yüksek hızlı demiryollarındaki katenerlerin temel bileşenlerini oluşturmaktadırlar. İzolatörlerde meydana gelen arızalar yüksek hızlı trenlerin güvenli çalışmasını etkileyebilir hatta durdurabilir. Bu sebeple izolatörlerdeki kusurların tespit edilmesi güvenli ve konforlu bir seyahat için oldukça önemlidir. Düzenli olarak kontrol edilmeyen ve arızaların tespiti yapılmayan sistemlerde sistem çabuk bozulur, arızalanır ve hem maddi açıdan zarar verirken hem de kamu güvenliğini fazlasıyla tehdit etmektedir. Bu arızaların tespiti bazen insan gözüyle tespit edilemezken önceden eğitilmiş makineler bu olasılığı fazlasıyla düşürmektedir. Bunun en büyük örneği gece karanlığında bu arızalar insan gözüyle görülmeyecek boyutlarda olup herhangi bir hasar, aşınma, voltaj hataları tespit edilemez. Yüksek çözünürlüklü kameralar ile alınan görüntüler önceden eğitilen sistemlere gönderilerek gece karanlığında bile bu hatalar yakalanabilmekte ve tespit edilebilmektedir, sistem tarafından tanınan bu hatalar bir ara yüz ile kullanıcının bilgisine anlık sunulabilmektedir [1]. Mevsimlerin bile bu elektrik sistemlerinin üzerinde etkisi varken, zorlu mevsim koşulları altında temassızlık sorunları, genleşme ve büzülme sorunları da düzeltilmediği takdirde taşıta ve yolculara ciddi hasarlar

Atıf için/Cite as: G. Karaduman, E. Akın, B. Binay, M. Dilekli, " Katener sistemlerindeki izolatör kusurlarının derin öğrenme ile tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 185-195, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1114665

verirken kamu güvenliğine büyük ölçüde zarar verir. Son yıllarda bunların önüne geçmek amacıyla katener sistemlerinin arızalarının tespiti için birçok yazılım ve donanım sistemi geliştirilmiştir. Özellikle demiryolu ekipmanlarının eksikliklerinin ve bu ekipmanlardaki kusurların tespiti için derin öğrenme uygulamaları oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Mekanik gücü yüksek olan ve temizlemeye pek ihtiyaç duymayan izolatörler katener sistemlerde hava hattını taşımaya ve topraklamaya yaramaktadır. Bazı yapılarda rüzgâr ve yağmur ile kendini temizleyebilen izolatörler cam, kauçuk gibi malzemelerden yapılmaktadır. Şekil 1’de bir seramik izolatör gösterilmektedir. İzolatörler elektrik akımını iyi iletmelidir ve herhangi bir akım kaçağı, kırılma, hasar görme, aşınma gibi sorunlarla karşı karşıya kalmamalıdır.



Şekil 1. Seramik izolatör [2]

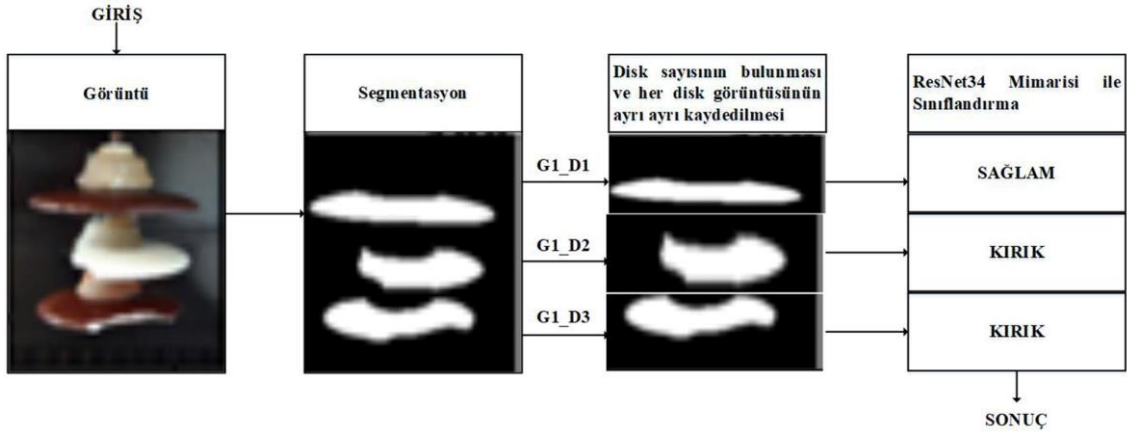
Tan vd. [1] izolatörlerdeki arızaları tespit edebilmek için saçaklı kontür özneliklerine ve gri benzerlik eşleşmesine dayalı bir füzyon algoritması önermişlerdir. Kontür çıkarma ile her bir izolatör diskini ayrı ayrı elde etmişlerdir. Disklerin aralarındaki boşlukların mesafesine ve gri parlaklık benzerliğine dayanan bir izolatör hata tespit modeli oluşturmuşlardır. %91,71 oranında bir kesinlik ve %99,5 duyarlılık ile izolatörleri sınıflandırmışlardır. Han vd. [3] katener sistemindeki izolatörlerdeki kusurları otomatik olarak tespit edebilmek için bir bilgisayarlı görü algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada izolatörleri tespit etmektedirler. İkinci aşamada ise izolatörlerdeki kusurları tespit etmektedirler. İzolatörlerdeki kusurların tespiti için bir yerel yoğunluk periyodu tahmin algoritması tasarlamışlardır. Deneysel sonuçlarda geliştirdikleri algoritmanın seramik disklerin kırılmasını ve iki disk arasına sıkışan yabancı cisimleri algıladığını raporlamışlardır. Fan vd. [5] otomatik bir izolatör kusur tespit yöntemi önermişlerdir. Önerdikleri yöntemde ilk olarak Rastgele Orman sınıflandırma yöntemi ile izolatör görüntülerini bölütlemişlerdir. Daha sonra, izolatörlerin normal ve kusurlu durumlarını sınıflandırmak için bir Konvolüsyonel Sinir ağı mimarisi kullanmışlardır. Geliştirdikleri mimari için deneysel veri seti olarak kullandıkları görüntüleri bir insansız hava aracı ile elde etmişlerdir. Geliştirdikleri mimari izolatör kusurlarını %89 doğrulukla tanımıştır. Mehlomakulu vd. [6] katener sistemlerinde izolatör arızalarını tespit etmek için drone denetiminde optik ve termal görüntüler elde eden ve bu görüntüleri birleştiren bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntemde kendi tasarladıkları bir evrimsel sinir ağı modeli ile önceden eğitilmiş VGG16 ve ResNet50 modelleri arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda VGG16 modelinin diğer modellere göre görüntüleri daha doğru tanıdığını görmüşlerdir. Wen vd. [7] izolatör defektlerinin tespit edilmesi için tam bölge tabanlı ve kaskad maske çıkarma tabanlı olmak üzere iki derin öğrenme mimarisi önermişlerdir. İlk olarak özellik piramit ağı, kademeli regresyon ve birleşim üzerinden geliştirilmiş kesişim dâhil olmak üzere bir dizi gelişmiş tekniğe dayalı bir R-CNN mimarisi önermişlerdir. Önerdikleri modelde önce bir kodlayıcı-kod çözücü maske çıkarma ağı kullanarak karmaşık arka planı ortadan kaldırmak için bir izolatör maske görüntüsü oluşturmuşlardır ve daha sonra izolatörlerdeki kusurları tespit etmek için tam bölge tabanlı bir CNN ağı önermişlerdir. Sampedro vd. [8] izolatör kusurlarını tespit etmek için izolatördeki disk dizilerinin segmentasyonundan sorumlu bir bileşeni ve teşhisinden sorumlu iki bileşeni birleştiren bir yöntem önermektedirler. İzolatör disk dizilerinin bölümlenme bileşeni, CNN mimarisinin belirli seviyelerinde yeni atlama bağlantılarını kullanarak

U-Net ağının yeteneklerini geliştirerek Up-Net olarak adlandırdıkları yeni bir evrişimli ağ mimarisinden oluşmaktadır. Önerdikleri Up-Net varyantlarının yeteneklerini izolatör dizi elemanlarının doğru segmentasyonunu sağlayarak, veri büyütme ve transfer öğrenme tekniklerini uygulayarak arttırmışlardır. İzolatör dizisi teşhisi ile ilgili olarak, izolatör dizisi bölümlene bileşeni tarafından üretilen maskeyi girdi olarak alan ve değişken sayıda diskin yokluğunu belirleme yeteneğine sahip bir evrişimsel sinir ağı (CNN) tasarlamışlardır. İzolatörlerin kirlenmeleri de elektrik iletimini kesintiye uğratabilmektedir. Corso vd. [9] izolatörlerdeki kirlilik seviyelerini görüntüden sınıflandırmak için k-en yakın komşu algoritmasının kullanılmasını önermişlerdir. Ortalama, varyans, asimetri, basıklık, enerji ve entropi gibi bilgisayarlı görme özelliklerini k-NN'yi eğitmek için kullanmışlardır. k-NN, k-kat çapraz doğrulama yöntemini kullanarak %85.17'ye kadar doğruluk elde etmişlerdir. Liu vd. [10] karmaşık bir arka plana sahip hava görüntülerinde izolatör arızalarının tespiti için Sadece Bir Kez Bakarsınız (YOLO) temelli modifiye edilmiş bir model önermişlerdir. İlk olarak, farklı sahnelerde bir veya birden fazla arızaya sahip hava görüntülerini toplamışlardır ve ardından yeni bir veri seti oluşturmuşlardır. İkinci olarak, düşük çözünürlüklü öznetelik katmanlarında özneteliğin yeniden kullanımını ve yayılmasını artırmak için, YOLO-v3 ve Çapraz Aşamalı Kısmi Ağa dayalı bir Çapraz Aşama Kısmi Yoğun YOLO (CSPD-YOLO) modeli önermişlerdir. Özellik piramidi ağı ve geliştirilmiş kayıp işlevini, izolatör arıza tespitinin doğruluğunu artırmak için CSPD-YOLO modeline uyarlamışlardır. Li vd. [11] izolatör disklerini bölümlenmek için doğru olmayan konumlandırma, düşük tanıma verimliliği ve karmaşık arka planda yalıtılan görüntünün zor bölümlenmesi problemlerini çözmeyi amaçlayan dinamik maske kullanan bir kızılötesi izolatör görüntü bölümlenme algoritması önermişlerdir. Önerdikleri algoritmada kızılötesi görüntüdeki izolatörleri dikketgen bir çerçeve ile işaretleyerek izolatör dizisinin genel bölümlenmesini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlarda, önerdikleri algoritmanın çok sayıda kızılötesi görüntüyü eğitmek için ResNet-101-FPN omurgasını ve 3x eğitim planını kullandığını, bu da izolatörlerin doğru tanımlanmasını ve yüksek hassasiyetli segmentasyonunu gerçekleştirebildiğini göstermişlerdir. Zhao vd. [12] İkili Sağlam Değişmez Ölçeklenebilir Anahtar Noktalara ve Yerel olarak Birleştirilmiş Tanımlayıcıların Vektörüne dayanan izolatör dizilerinin tespiti için kızılötesi görüntü kullanan bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntemde kullandıkları özellik çıkarma yöntemini Binary Feature Pooling olarak adlandırmışlardır. Destek Vektör Makinesine (SVM) dayalı bir sınıflandırma modelini, kızılötesi görüntüde izolatör dizisini bulmak için çok ölçekli sürgülü pencere çerçevesine entegre etmişlerdir. Li vd. [14] izolatör kusurlarının tespiti için derin öğrenme ve Zernike moment algoritmalarını birleştiren bir yöntem önermişlerdir. İzolatörleri tanımak için R-CNN algoritması kullanmışlardır. İzolatörlerin kontur özelliklerini çıkarmak için de Zernike moment algoritmasını kullanmışlardır. Han vd. [15] izolatörlerdeki kırılmaları tespit etmek için YOLOv5'e dayalı bir yöntem önermişlerdir. Geliştirilmiş YOLOv5 algoritması ile ortalama kesinlik değerini %95.02 olarak elde etmişlerdir.

Bu çalışmada katener sistemlerinin sağlıklı çalışması için izolatörlerdeki kusurların tespitlerine odaklanılmıştır. Katener sistemlerdeki izolatörlerdeki kırıkların tespit edilmesi için hazır bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti iki sınıftan oluşmaktadır: kırık, sağlam. Veri setinden alınan izolatör görüntülerine segmentasyon uygulanarak izolatörler arka plandan ayrılmış ve izolatördeki disk görüntüleri elde edilmiştir. Disk görüntülerinin siyah beyaz görüntüleri elde edilerek her bir diskin sınırı belirlenmiştir. Sınırları belirlenen diskler ile beyaz piksel yoğunluklarından yola çıkılarak izolatör görüntüsündeki disk sayıları elde edilmiştir. Her bir disk görüntüsü orijinal görüntü ismine ek olarak yeniden adlandırılmış ve siyah beyaz disk görüntülerinden oluşan yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti ResNet34 derin öğrenme mimarisi kullanılarak sınıflandırılmıştır. Her görüntüye ait disk görüntülerinin ResNet34 mimarisinden elde edilen sınıf değerlerinden herhangi biri "Kırık" sınıfına ait ise orijinal görüntü "Kırık" olarak sınıflandırılmıştır. Tüm disklerin "Sağlam" sınıfına ait olması durumunda da orijinal görüntü "Sağlam" olarak değerlendirilmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda izolatörlerdeki arızalar %95,7 doğruluk, %99 kesinlik ve %96,6 duyarlılık değerleriyle sınıflandırılmıştır. Bu değerler literatürdeki değerlere oranla daha iyidir.

2. Metot

Katener sistemler elektrikli trenlere hareket etmeleri için gerekli gücü sağlamaktadırlar. Elektrikli trenlerin güvenli bir şekilde çalışması için katener sisteminin tüm bileşenleri sağlıklı olmalıdır. Bu makalede de katener sisteminin en önemli bileşenlerinden biri olan izolatörlerdeki arızaları sınıflandırmak için bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemin blok diyagramı Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Önerilen yöntemin blok diyagramı

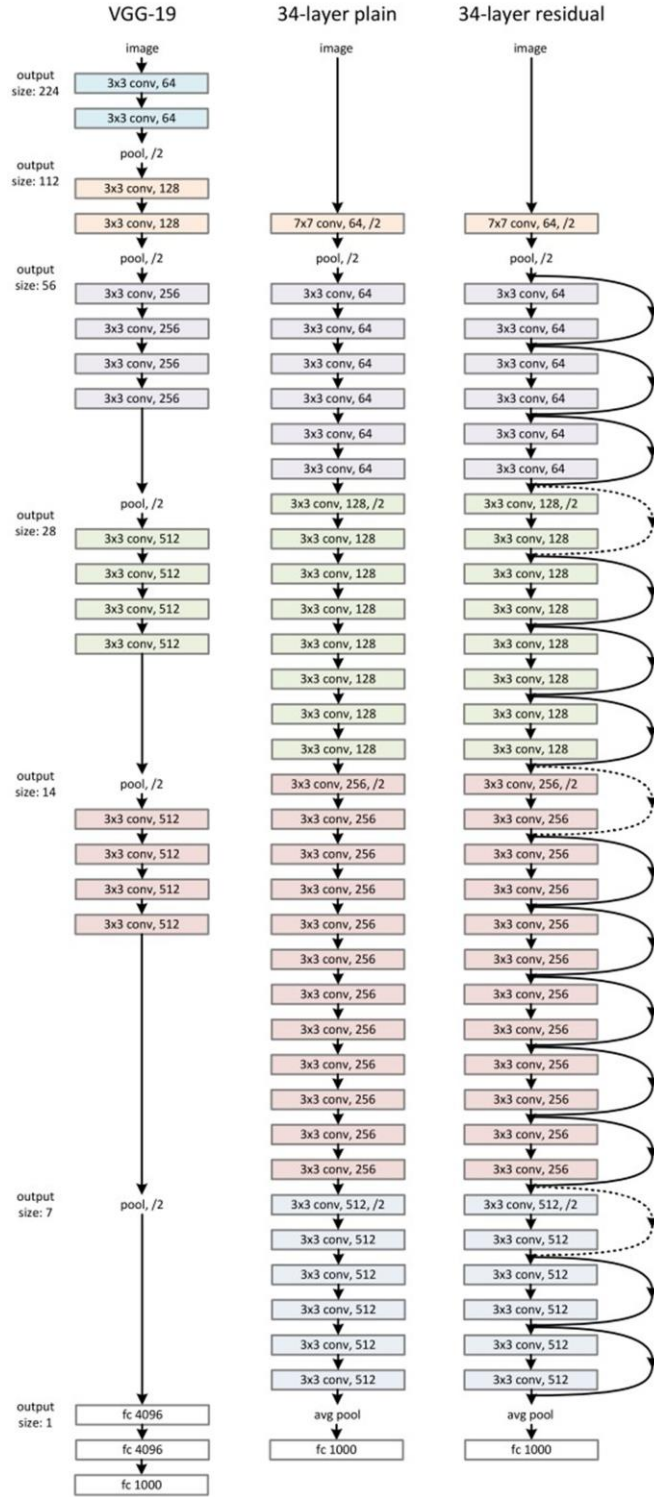
Bu çalışmada yaklaşık 1100 adet görüntü eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Görüntüler app.labelbox sitesinden elde edilmiştir. Yaklaşık 1100 görüntü arasında çeşitli uzaklıklarda, kırık, sağlam, hasar görmüş şeklinde izolatör örnekleri bulunmaktadır. Görüntülerden kırık, hasar görmüş ve eksik diskli görüntüler KIRIK sınıfına aittir. Veri setinde toplam 855 görüntü SAĞLAM sınıfına, 245 görüntü de KIRIK sınıfına aittir. KIRIK sınıfı önerilen yöntemde 0 olarak, SAĞLAM sınıfı da 1 olarak gösterilmektedir. 3 disk halinde ve seramikten olan bu izolatörler çeşitli boyutlarda ve renklerdedir. Bu çalışmada hedef resim formatında verilen bir izolatörü tanımak, algılamak ve algılanan bu izolatörün kırık veya sağlam olup olmadığını tespit etmektir. Önerilen yöntemde öncelikle girdi olarak alınan görüntünün bir izolatör olup olmadığı kontrol edilmekte ve daha sonra kaç diskin hasarlı olup olmadığı kontrol edilmektedir. Veri setinden elde edilen görüntüler K-means kümeleme algoritması kullanılarak segmentasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Kullanılan K-means algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir:

- Görüntüyü siyah-beyaz görüntüye dönüştür
- K adet küme merkezi rastgele belirlenir (c_1, c_2, \dots, c_k)
- Görüntüdeki her beyaz piksel(p) için en yakın c_i kümesi bulunur ve p, c_i kümesine atanır. Bu atama işlemi için Denklem 1. deki formül kullanılır:

$$K = \sum_{c_i} \sum_{p \in C_i} \|p_j - c_i\| \quad (1)$$

- Kümelerin yeni merkezleri hesaplanır (c_j)
- Eğer küme merkezi değişirse 2. Adıma gidilir.

Segmentasyon işlemleri tamamlandıktan sonra beyaz piksellerin oluşturdukları alanlar Canny kenar çıkarım algoritması ile belirlendi.



Şekil 3. ResNet34 mimarisi [3]

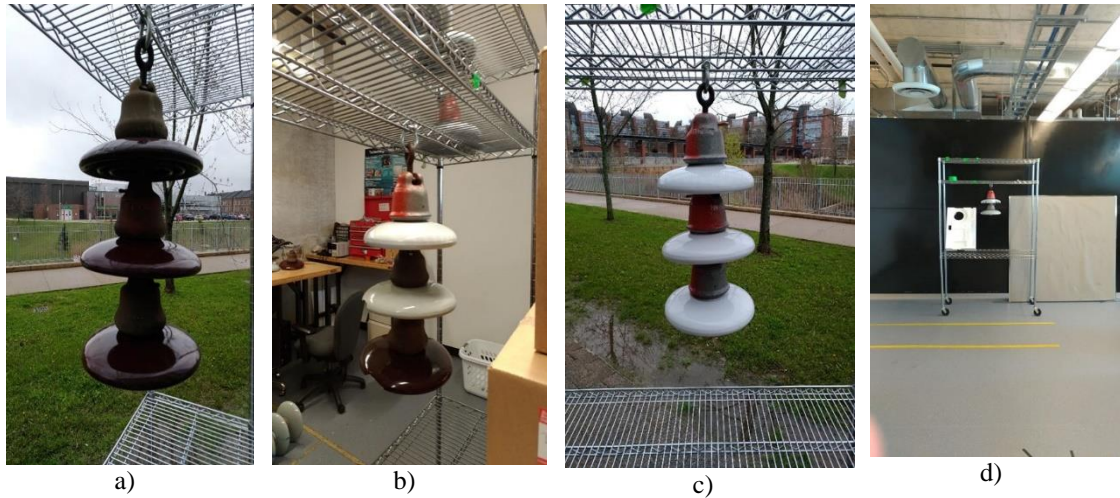
Daha sonra sınırları belirlenen her bir alan sayılarak görüntüde kaç disk olduğu belirlenmiştir. Belirlenen disk sayısı ve beyaz piksel yoğunluğunun olduğu alanlar referans alınarak görüntü disk sayısı kadar bölündü. Böylece her disk ayrı bir görüntü olarak kaydedildi. Disk görüntülerinin hangi orijinal görüntüye ait olduğu belli olacak şekilde adlandırma yapıldı. Örneğin “G1.jpg” görüntüsüne ait birinci disk görüntüsü “G1-D1” şeklinde kaydedildi. Bu şekilde veri seti disk

görüntülerinden oluşacak şekilde güncellendi. Veri setindeki görüntüleri sınıflandırmak için ResNet34 mimarisi kullanıldı.

Görüntü tanıma amacıyla derin öğrenme içeren bu mimari yapay sinir ağlarının eğitimi için kullanılır ve derin ağların eğitimi açısından referansız eğitim yerine referanslı eğitimi baz almaktadır. Düşük karmaşıklığa sahiptir ancak diğer ağlardan kat ve kat daha fazla eğitim verisi ve girdisi içerir. Yaklaşık 150 katmana kadar derinliğe sahip ağların eğitimi için sıklıkla kullanılan bir mimaridir. Hata payı %3'lük bir seviyeye kadar inen bu mimaride yüzlerce katmanlı ağlarda analiz yapmayı da bize sunmaktadır. Kısacası önceden eğitilmiş modeller referans olarak yeni modellerin eğitimi için kullanılır. Şekil 3'te ResNet34 mimarisinin blok diyagramı gösterilmektedir. ResNet34 mimarisinin çıktısı olarak disklerin "Sağlam" veya "Kırık" sınıflarından hangisine ait oldukları elde edilmektedir. Her bir orijinal görüntünün tüm disk görüntülerinin sonuçları ele alınmaktadır. Eğer disk sınıflarından biri bile "Kırık" sınıfına ait ise o görüntüdeki izolatör arızalı olarak değerlendirilmektedir.

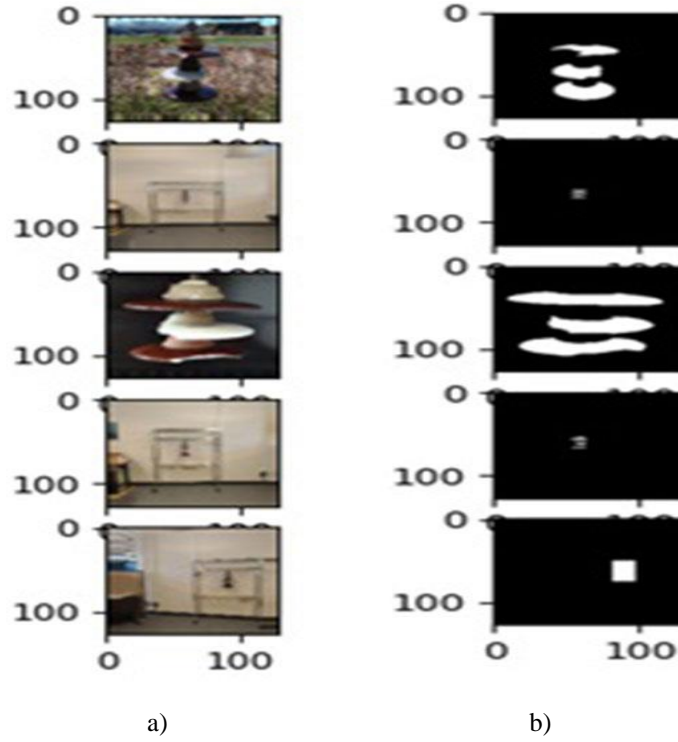
3. Bulgular

1100 adet eksik, farklı renklerde, kırık ve sağlam izolatör görüntülerinden oluşan bir veri setindeki görüntüler bir derin öğrenme mimarisi ile sınıflandırıldı. Şekil 4'te veri setine ait bazı görüntüler verilmektedir.

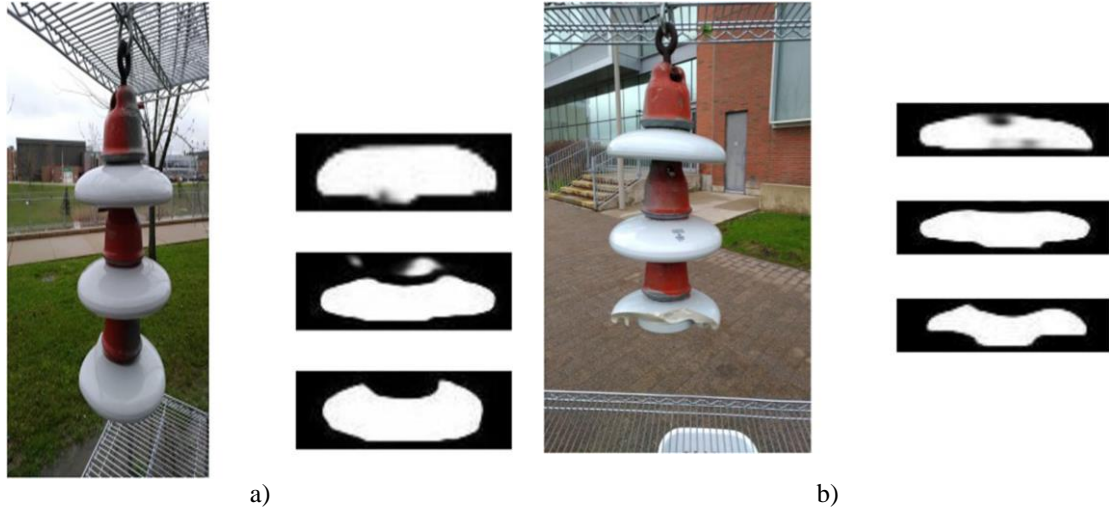


Şekil 4. Veri setindeki bazı görüntü örnekleri a) Tek renk sağlam seramik izolatör b) Farklı renklerde kırık ve sağlam diskli izolatör c) Tek renk sağlam seramik izolatör d) Eksik diskli izolatör

Veri setindeki görüntülere K-means kümeleme algoritması kullanılarak segmentasyon işlemi uygulanmıştır. Bazı görüntülere segmentasyon uygulandıktan sonraki görseller Şekil 5'te gösterilmektedir. Segmentasyon işleminden sonra her bir diskin ayrı ayrı değerlendirilmesi ve daha sağlıklı sonuç elde edilmesi için bölütlenmiş görüntülerde kaç adet disk olduğu bulunmuştur. Siyah beyaz görüntülere Canny kenar çıkarım algoritması uygulandı. Canny kenar çıkarımı ile beyaz piksellerle gösterilen disklerin sınırları belirlendi. Bu belirlenen sınırlar ve bölütlenmiş görüntülerdeki her bir beyaz piksel yoğunluğu içeren alanlar referans alınarak her bir görüntü kaç adet disk olduğu bulunmuştur. Disk sayısına göre her bir görüntü alt görüntülere ayrılmıştır. Alt görüntüler ayrılan bazı orijinal görüntü örnekleri Şekil 6'da gösterilmektedir.

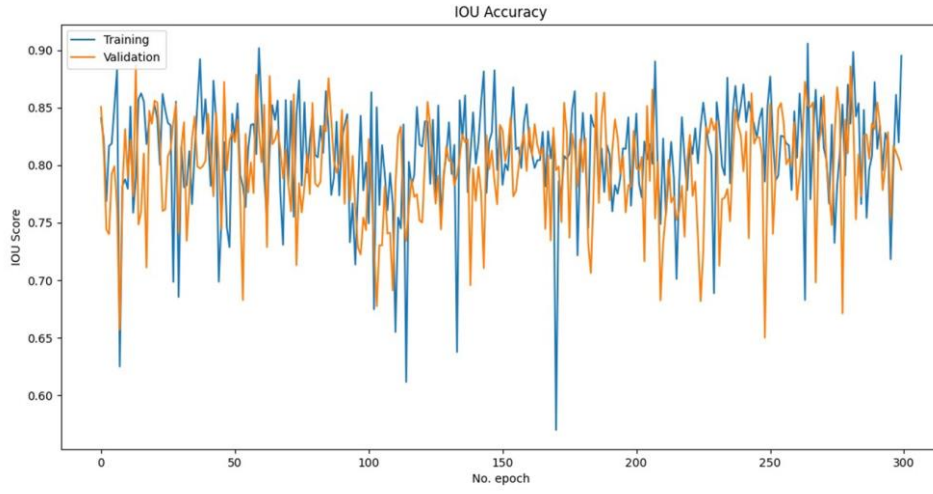


Şekil 5. Segmentasyon uygulanmış bazı görüntüler a) Orijinal görüntüler b) Segmentasyon uygulanmış görüntüler

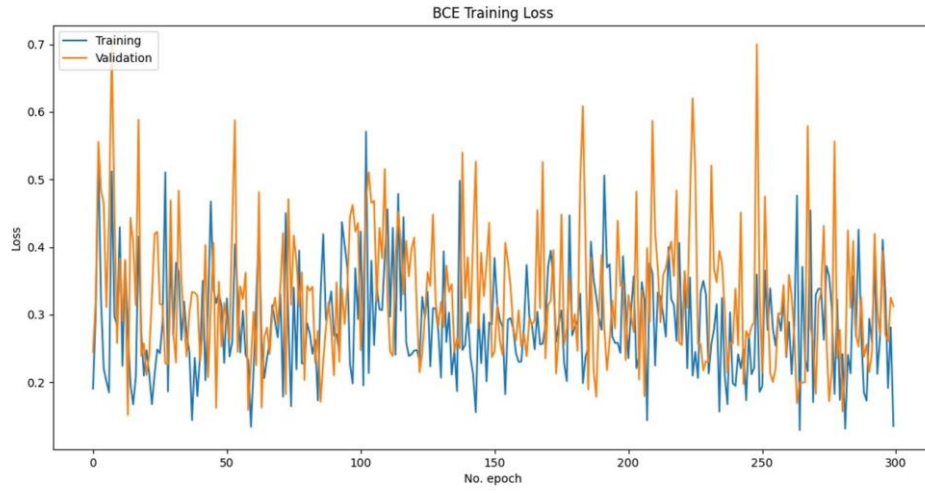


Şekil 6. Alt görüntülere ayrılmış orijinal görüntüler a) Sağlam izolatöre ait alt görüntüler b) Bir diski kırık izolatöre ait alt görüntüler

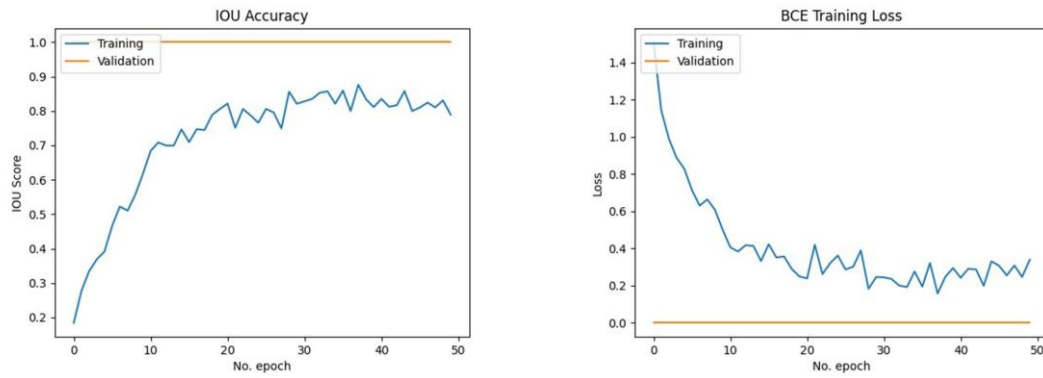
Elde edilen alt görüntülerle yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setindeki görüntülerin 1100 tanesi ile ResNet34 mimarisi eğitilmiş, 300 tanesi ile de doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Doğrulama ve test işleminde kullanılan görüntüler eğitimde kullanılmamıştır. ResNet34 mimarisi 300 epoch eğitilmiştir. ResNet34 mimarisinde kullanılan veri seti ile elde edilen doğruluk grafiği Şekil 7’de, kayıp grafiği de Şekil 8’de gösterilmektedir. Şekil 9’da da 50 epoch için doğruluk ve kayıp grafikleri verilmektedir.



Şekil 7. ResNet34 doğruluk grafiği

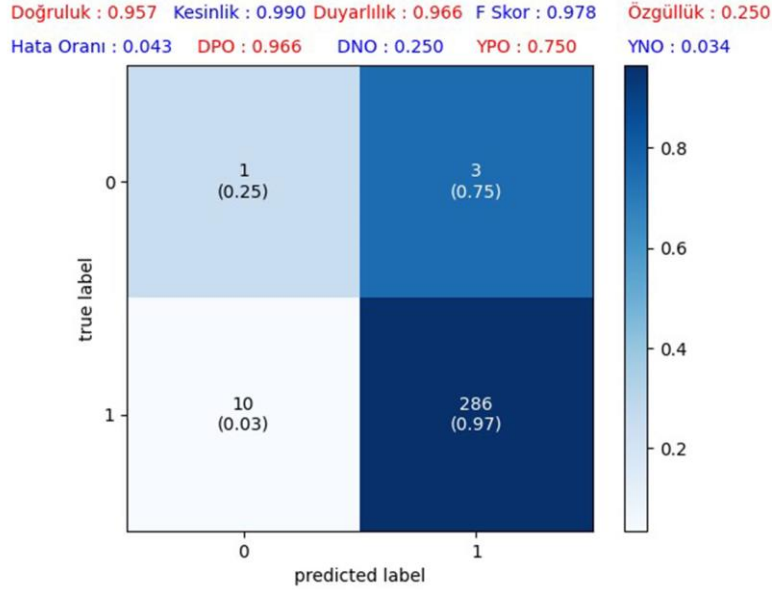


Şekil 8. ResNet34 kayıp grafiği



Şekil 9. 50 Epochta Eğitilen Sinir Ağının doğruluk ve kayıp grafikleri

ResNet34 mimarisinden elde edilen sınıflandırma sonuçlarını daha detaylı analiz edebilmek için Konfüzyon Matrisi oluşturulmuştur. Kullanılan derin öğrenme mimarisine ait Konfüzyon Matrisi ve başarı metrikleri Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Konfüzyon matris ve başarı metrikleri

Konfüzyon matrisinde doğrulama için kullanılan 300 görüntüden True Negatif(TN) değeri 1 olarak elde edilmiştir. False Pozitif(FP) değeri 3, False Negatif(FN) değeri 10 ve True Pozitif(TP) değeri 286 olarak elde edilmiştir. Bu değerlerden yola çıkılarak doğruluk değeri 0.957, kesinlik değeri 0.990 ve duyarlılık değeri de 0.966 olarak elde edilmiştir. Doğruluk değeri 0,957 olarak elde edilmiştir. Bu değer %95 doğrulama yaptığını belirtmektedir ve bu oran sisteminin ne kadar doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Kesinlik değeri 0,990 olarak hesaplanmıştır. Bu değer %99 oranında algılama yaptığını göstermektedir ve sistemin algılamalarını ve ölçümlerini ne kadar hassas bir şekilde yaptığını göstermektedir. Önerdiğimiz sistemin literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Önerilen yöntemin literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması

Referans Numarası	Kullanılan Yöntem	Doğruluk Oranı
[9]	KNN	% 85,17
[5]	CNN	% 89
[1]	Kontür özellikleri ve gri benzerlik eşleştirme	% 91,71
[15]	YOLOv5	% 95,02
Önerilen Yöntem	ResNet34	% 95,7

Tablodan da görülebileceği gibi önerilen yöntem literatürde yapılan çalışmalara göre daha yüksek bir doğruluk oranına sahiptir.

4. Sonuç

İzolatörler katener sistemlerinde elektrik ileten tellerin havada asılı durmasını ve katener hattının topraklanmasını sağlayan bileşenlerdir. İzolatörler elektrik iletimi sırasında yanabilmekte veya kırılabilir. Bu bileşenlerde oluşan bu arızalar katener hattının güvenliğini tehdit etmektedir. Katener hattının sağlıklı bir şekilde çalışması için tüm bileşenleri gibi izolatörlerinin de sağlam olması gerekmektedir. Bu makalede de izolatör görüntülerinden oluşan bir veri seti

kullanılarak izolatörlerdeki arızaların tespiti için derin öğrenme tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Veri setindeki görüntüler bölütlenerek izolatör disklerini içeren alt görüntüler elde edilmiştir. Bu alt görüntüler ResNet34 mimarisi ile sınıflandırılmıştır. Sınıflandırılan alt görüntüler birleştirilerek orijinal görüntülerin sağlamlığı değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda izolatörlerdeki arızalar %95,7 doğruluk, %99 kesinlik ve %96,6 duyarlılık değerleriyle sınıflandırılmıştır.

Kaynakça

- [1] P. Tan, X. F. Li, X. J. M. Xu, J. E. Ma, F. J. Wang, J. Ding, Y. Ning, “Catenary insulator defect detection based on contour features and gray similarity matching”. *Journal of Zhejiang University Science A*, vol. 21, no.1, pp. 64-73, 2020, doi: 10.1631/jzus.A1900341.
- [2] Elektrikci, “Elektrik Tesislerinde İzolatörler” 2022 [Online]. Available: <https://www.elektrikce.com/elektrik-tesislerinde-izolatorler/> [21.07.2022].
- [3] Y. Han, Z. Liu, D. J. Lee, W. Liu, J. Chen, & Z. Han, “Computer vision-based automatic rod-insulator defect detection in high-speed railway catenary system”. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no.3, pp.1-15, 2018, doi: 10.1177/1729881418773943.
- [4] T. Kumar, “ResNet-34” 2022 [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/pytorch/resnet34> [21.07.2022].
- [5] P. Fan, H. M. Shen, C. Zhao, Z. Wei, J. G. Yao, Z. Q. Zhou, Q. Hu, ” Defect identification detection research for insulator of transmission lines based on deep learning”. *In Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1828, No. 1, pp. 1-7 IOP Publishing, February, 2021, doi:10.1088/1742-6596/1828/1/012019.
- [6] V. Mehlomakulu, T. Magadza, “Transmission line isolator fault detection based on deep learning and UAV imageries”, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol.11, no.2, pp. 1028-1035, February 2022, doi: 10.21275/SR22216013540.
- [7] Q. Wen, Z. Luo, R. Chen, Y. Yang, & G. Li, “Deep learning approaches on defect detection in high resolution aerial images of insulators”. *Sensors*, vol. 21, no.4, pp.1-24, 2021, doi:10.3390/s21041033.
- [8] C. Sampedro, J. Rodriguez-Vazquez, A. Rodriguez-Ramos, A. Carrio, & P. Campoy, “Deep learning-based system for automatic recognition and diagnosis of electrical insulator strings”. *IEEE Access*, vol. 7, pp.101283-101308, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2931144.
- [9] M. P. Corso, F. L. Perez, S. F. Stefenon, K. C. Yow, R. García Ovejero, & V. R. Q. Leithardt, “Classification of contaminated insulators using k-nearest neighbors based on computer vision”. *Computers*, vol. 10, no. 9, pp. 1-18, 2021, doi: 10.3390/computers10090112.
- [10] C. Liu, Y. Wu, J. Liu, Z. Sun, & H. Xu, “Insulator Faults Detection in Aerial Images from High-Voltage Transmission Lines Based on Deep Learning Model”. *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, pp. 1-20, 2021, doi: 10.3390/app11104647.
- [11] T. Li, J. Zhou, G. Song, Y. Wen, Y. Ye, & S. Chen, “Insulator Infrared Image Segmentation Algorithm Based on Dynamic Mask and Box Annotation”. *11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, China, 2021, pp. 432-435.
- [12] Z. Zhao, G. Xu, & Y. Qi, “Representation of binary feature pooling for detection of insulator strings in infrared images”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 5, pp. 2858-2866, 2016, 10.1109/TDEI.2016.7736846.
- [13] E. Güçlü, İ. Aydın and E. Akın , "DCGAN ve Siyam Sınır Ağını Kullanarak Demiryolu Bağlantı Elemanlarındaki Kusurların Tespiti", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 46-59, Jan. 2022, doi:10.47072/demiryolu.1015962.
- [14] T. Li, T. Hao, “Damage Detection of Insulators in Catenary Based on Deep Learning and Zernike Moment Algorithms”, *Applied Sciences*, vol. 12, no. 10, pp. 1-16, 2022, doi: 10.3390/app12105004.
- [15] G. Han, M. He, M. Gao, J. Yu, K. Liu, L. Qin, “Insulator breakage detection based on improved YOLOv5”. *Sustainability*, vol. 14, no. 10, pp. 1-17, 2022, doi:10.3390/su14106066.
- [16] G. Karaduman, M. Karakose, I. Aydın, E. Akın, “Contactless rail profile measurement and rail fault diagnosis approach using featured pixel counting”, *Intelligent Automation And Soft Computing*, vol. 26, no. 3, pp. 455–463, 2020, doi:10.32604/iasc.2020.013922.

Özgeçmiş**Gülşah KARADUMAN**

1986 tarihinde doğmuştur. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Fırat Üniversitesinde Dr. Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları Raylı Sistemler, Arıza Teşhisi, Görüntü İşleme, Yapay Zekâdır.

E-Posta: gkaraduman@firat.edu.tr

**Erhan AKIN**

1962 tarihinde doğmuştur. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Fırat Üniversitesinde Prof. Dr. olarak çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları Raylı Sistemler, Arıza Teşhisi, Görüntü İşleme, Yapay Zekâ, Bulanık Mantık ve Kontrol Sistemleridir.

E-Posta: eakin@firat.edu.tr

**Berkan BİNAY**

2000 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimine Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde devam etmektedir. İlgili alanına giren araştırma konuları Görüntü İşleme, Yapay Zekâdır.

E-Posta: binayberkan@gmail.com

**Miraç DİLEKLİ**

1997 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimine Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde devam etmektedir. İlgili alanına giren araştırma konuları Görüntü İşleme, Yapay Zekâdır.

E-Posta: mirac.mrdl@gmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Gülşah KARADUMAN: Kaynaklar, Metodoloji, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme, İnceleme. Erhan AKIN: Metodoloji, Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Yazarların katkıları: Berkan BİNAY: Kavramsallaştırma, Yazılım. Miraç DİLEKLİ: Kavramsallaştırma, Yazılım, Doğrulama.