



Demiryollarında Ray Kırılmalarının, Ani Rijitlik Değişimlerinin ve Geometrik Süreksizliklerin Akıllı Telefonlarla, Seyir Hâlinde Ölçümler Alınarak, Sürekli Takibi

Ferhat ÇEÇEN^{ORCID}

Süleyman Demirel Üniversitesi, Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Isparta, Türkiye

cecenferhat@sdu.edu.tr

(Alınış/Received: 03.04.2024, Kabul/Accepted: 26.04.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Raylı ulaşım sistemlerinde, ulaşım güvenliğinin sağlanması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından “Hat Durumu Değerlendirmenin” önemi büyüktür. Bu bağlamda, en yaygın kullanılan metotlardan biri, “Seyir Esnasında Ölçümlerdir”. Ancak konvansiyonel ölçüm/kayıt/teşhis trenleri, oldukça yüksek maliyetlere sahiptir. Ayrıca yıl içerisinde yalnızca birkaç kez ölçüm alınabilmektedir ve ölçümler müddetince de tren trafiği kısıtlanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, raylı ulaşım güvenliğini tehdit eden ray kırıklarının ve bakım maliyetlerini artıran ani rijitlik değişimleri ile geometrik süreksizliklerin “akıllı telefonlarla” tespit ve takip edilip edilmeyeceğini belirlemektir. Bu amaçla, literatürde günümüze dek yürütülen çalışmaların yorumlanması akabinde, önerilen yöntem, sektörün rahatlıkla kullanılabileceği bir sadelikte, adım adım izah edilmiştir. Yürütülen düşey ivme ölçümleri sonucunda, gerek ray kırıklarının, gerekse ani rijitlik değişimlerinin/geometrik süreksizliklerin, önerilen mobil cihazlı ölçüm metoduyla rahatlıkla teşhis edilebildiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapısal sağlık izleme, Hat durumu değerlendirme, Demiryolu hata teşhisi, Ray çatlağı

Continuous Monitoring of Rail Breaks, Abrupt Stiffness Changes, and Geometric Discontinuities using On-board Measurements via Smartphones

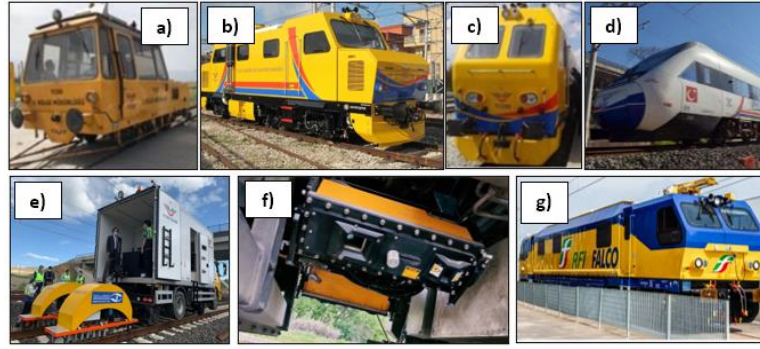
Abstract: In rail transport systems, "Track Condition Assessment" is of great importance for ensuring transportation safety and reducing maintenance costs. In this context, one of the most widely used methods is "On-board Measurement". However, the conventional measurement/recording/diagnostic trains are very expensive. In addition, measurements can only be made a few times a year, and train traffic is restricted during the measurements. The aim of this study is to determine whether rail breaks/fractures, which threaten transportation safety, and abrupt stiffness changes and geometric discontinuities, which increase maintenance costs, can be detected and monitored using “smartphones”. For this purpose, after reviewing and interpreting existing studies carried out in the literature to date, the proposed method is explained step by step in a simple way that can be easily used by the industry. As a result of the vertical acceleration measurements carried out, it was found that both the rail breaks and abrupt stiffness changes/geometric discontinuities can be easily diagnosed using the proposed mobile device measurement method.

Keywords: Structural health monitoring, Track condition assessment, Railway fault diagnosis, Rail crack

1. Giriş

Raylı ulaşım sistemlerinde, yapı elemanlarının ve hat geometrisinin yeterli sıklıkla muayene edilerek, sorunlara zamanında müdahale edilmesi, gerek ulaşım güvenliğinin sürdürülmesi, gerekse bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından büyük öneme sahiptir [1]. Genel hatlarıyla Yapısal Sağlık İzleme (Structural Health Monitoring, SHM) kategorisine giren, demiryolu özelinde ise Hat Durumu Değerlendirme (Track Condition Assessment, TCA) olarak tabir edilen bu muayenelerde birçok farklı metot kullanılmaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan metotlardan biri, seyir esnasında ölçümdür (On-board Measurement, OM) [2]. Şekil 1’de, ülkemizde bu amaçla kullanılan çeşitli ölçüm/kayıt/teşhis araç/tren/ekipmanları sunulmuştur.

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, “Demiryollarında ray kırılmalarının, ani rijitlik değişimlerinin ve geometrik süreksizliklerin akıllı telefonlarla, seyir hâlinde ölçümler alınarak, sürekli takibi,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 54-66, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1464183



Şekil 1. Ülkemizdeki çeşitli TCA araç/tren/ekipmanları: a) Matisa MPV-7 [3], b) Mermec Roger-400 [4], c) Mermec Roger-800 [3], d) Piri Reis [5], e) Demir-Göz [6], f) Latronix kit [7], g) Tesmec OCPD002 [8]

Şekil 1.a'daki Matisa MPV-7 ve Şekil 1.c'deki Mermec Roger-800 hat ölçüm trenlerinin en yüksek işletim hızları sırasıyla 70 ve 140 km/sa olup, konvansiyonel hat kesimlerinde yürütülen geometrik ölçümlerde kullanılmaktadır [3]. Şekil 1.b'deki Mermec Roger-400'ün hız limiti ise 80 km/sa olup, rayların ultrasonik muayenelerinde kullanılmaktadır [4]. TCDD Teknik A.Ş. tarafından geliştirilen Şekil 1.e'deki Demir-Göz ise; Mobil Demiryolu Aracı vb. iş makinelerinin arkasına bağlanılarak, ray ultrasonik muayenelerini, 40 km/sa hıza kadar gerçekleştirebilmektedir [6]. Hızlı tren hatlarında gerekli muayeneler ise, Piri Reis (Şekil 1.d) adı verilen ölçüm treni ile gerçekleştirilmektedir [5, 9]. TCDD, söz konusu ölçüm işlemlerinin bir kısmını, hizmet alımı suretiyle de yaptırmaktadır. Örneğin TCDD Teknik A. Ş., 2021-2022 yıllarında, yaklaşık 25.000 kilometrelik, hat ölçüm ve raporlandırması yapmıştır [7]. Bu esnada kullanılan lazer sensörlü Latronix Track Measurement (LTM) kiti, Şekil 1.f'de görülmektedir [7]. Şekil 1.g'deki Tesmec OCPD002 hat denetim aracının en yüksek hızı ise 140 km/sa olup, ray profili-aşınması, kataner geometrisi-aşınması ve makas sistemleri konusunda muayeneler gerçekleştirebilmektedir [8]. Ülkemizdeki örnekleri sunulan, bu ve benzeri ölçüm/kayıt/teşhis araç/tren/ekipmanları, oldukça yüksek maliyetlere sahip olup, ülkelerin binlerce kilometrelik demiryolu ağları, bu gibi az sayıdaki vasıtayla analiz edilmeye çalışılmaktadır. Sonuçta, hat kategorisine bağlı olarak artmakla birlikte, yıl içerisinde yalnızca birkaç defa ölçüm alınması mümkün olmaktadır. Bu kısıtlama, “küresel” ölçekte geçerli olup, literatürdeki çeşitli yabancı kaynaklarda da belirtilmektedir [2, 10]. Bu yüzden, bazı ülkeler, “yolcu trenlerini” özel tertibatlar ile donatarak, bazı önemli verileri, “sürekli” takip etmek için kullanmaktadır (Continuous Track Monitoring, CTM). Örneğin Alman Demiryolları uzun zaman önce, yemek vagonlarında bu uygulamaya başlamıştır. Sonuçta, hat geometrisi kalitesiyle taşıt davranışı arasında güçlü bir ilişki olduğu, vagon içinden ve aks kutusundan alınan ivme ölçümleri arasında yüksek bir korelasyon bulunduğu belirlenmiştir [11].

Yukarıdaki örnekte de görüldüğü üzere; CTM ölçümlerinde genelde atalet/eylemsizlik esaslı sensörler (ivmeölçerler vb.) kullanılmaktadır. Ayrıca müstakil bir tren/araç işletilmesine ve fazla sayıda personel görevlendirilmesine de gerek duyulmamaktadır. Bu farklılıklar sayesinde, ölçümler, oldukça düşük bir maliyetle gerçekleştirilebilmektedir [10]. CTM'nin sunduğu bu mali tasarrufun yanı sıra, diğer bazı önemli avantajları da söz konusudur. Bu metot ile çok daha sık ölçüm almak, hatta her tren seferini, bir ölçüm sürecine dönüştürmek mümkün olmaktadır. Bu ise bazı kritik unsurların takibi için büyük bir avantaj anlamına gelmektedir. Örneğin ray kırılmaları veya makas sistemi arızaları gibi bazı spesifik sorunların “tamamen” önlenmesi, yıl içerisinde yürütülen birkaç muayene ile mümkün olmayabilmektedir. CTM'nin sağladığı üçüncü önemli avantaj ise; hat geometrisi henüz bozulmaya başlamadan ve yapı elemanlarında sorunlar tam olarak ortaya çıkmadan, ileride sorun çıkarma ihtimali olan lokasyonların önceden belirlenebilmesidir (kestirimci bakım). Örneğin tünel/köprü giriş ve çıkışlarında, ani rijitlik değişimi nedeniyle sıklıkla sorunlar yaşanabilmektedir [12]. Bu lokasyonlarda yeterli/uygun önlemler alınmamışsa, bu rijitlik değişimi, ilerleyen süreçte çeşitli hasarlara ve kazalara sebebiyet verebilmektedir. İvmeölçer kayıtlarında, bu sorun rahatlıkla tespit edilebilmekte ve henüz hat

geometrisi bozulmadan ve üstyapı elemanlarında hasar meydana gelmeden önlem alınabilmektedir [12]. Konvansiyonel ölçüm/kayıt/teşhis tren/araçlarıyla ise hat geometrisi bozulmaya başladıktan veya üstyapı elemanları hasara uğradıktan (ray kırıkları vb.) sonra bu durumun farkına varılabilmektedir. Yukarıda değinilen sorunların bazıları, seyir hâlinde ölçüm (OM) tekniği dışında, farklı metotlarla da analiz ve takip edilebilmektedir. Örneğin “sinyalizasyon” sistemleriyle ray kırığı takibi, birçok ülkede yaygın olarak kullanılan bir metottur. Ancak bu uygulama, bir “kestirimci bakım” metodu değildir. Çünkü bu metotta, raylar kırıldıktan ve kırılan iki ray parçası birbirinden sinyalizasyon akımını iletemeyecek kadar uzaklaştıktan sonra hata tespiti mümkün olabilmektedir. Öte yandan, ray kırığının biçimine ve/veya ortam iklim şartlarına bağlı olarak elektrik akımının “mevcut kırık(lar)a rağmen- iletimi de söz konusu olabilmektedir. Örneğin travers hizasında meydana gelen ray kırıklarında gergi kışaclarının, tünellerde su sızıntılarının, sıcak havalarda ise ray genleşmesinin sinyalizasyon sistemini yanılttığı tecrübelerle sabittir. CTM’nin sağladığı dördüncü önemli avantaj, ölçüm süresince tren trafiğini aksatmamasıdır. Günümüzde özellikle yüksek hızlı yolcu taşımacılığı yapılan hatlarda, sefer sıklıkları oldukça artmış durumdadır ve zorunlu bakım işlemlerinin, geceleri, birkaç saatlik zaman diliminde yürütülmesi gerekmektedir. Bu yüzden, araç parklarındaki vasıtaların sayısı (yüksek maliyetlerine rağmen) artırılrsa dahi, demiryolu trafiği yönetim kısıtları nedeniyle, çok sık kullanılmaları mümkün olmayabilmektedir.

CTM metodunun bu önemli avantajları nedeniyle, son yıllarda, hakkında yürütülen araştırmalar oldukça artmış vaziyettedir. Bu çalışmalarda çeşitli farklı CTM metotları araştırılmış olup, bu metotlardan en çok rağbet görenlerden biri, akıllı telefonlu CTM ölçümleridir. Bu çalışmalarda, CTM metodunda kullanılan sensörlere benzer sensörler içeren akıllı telefonların/mobil cihazların, demiryolu ölçümlerinin en azından bir kısmında, kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmaktadır [2, 12]. Çünkü akıllı telefonlar, MEMS tipi (Micro-electro Mechanical System) ivmeölçerler ve açısal hız ölçerler (jiroskop) içerdiği gibi, uydu bazlı koordinat verisi sağlayan Küresel Konum Belirleme Sistemi (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) çipleri de içermekte ve ayrıca kablosuz veri iletişimi de sağlamaktadır. Bu donanım ve özellikleri ile akıllı telefonların, hem bazı önemli verilerin “ekonomik” bir şekilde, “süreklili” ölçümünü sağlayabilmesi, hem de ölçüm sonuçlarının dünyanın her yerinden izlenebildiği “gerçek zamanlı” erişime de imkân tanınması beklenilmektedir [13]. Bu inovatif konuda, ülkemizde günümüze kadar, ne yazık ki, herhangi bir akademik çalışma yürütülmemiş/yayımlanmamıştır. Yabancı literatürde tespit edilebilen çeşitli çalışmaların ana amaçları, kullanılan sensör tipleri ve veri alma sıklıkları (VAS) ise Tablo 1’de özetlenmiştir. Referansları verilen çalışmaların ana amaçları incelendiğinde, mobil cihazlarla; demiryolu taşıtlarının konumlarının ivme-jiroskop verileriyle belirlenmesi [13], seyahat konforunun ölçülmesi [12, 14, 15], çeşitli geometrik parametrelerin belirlenmesi [10, 11] ve çeşitli hat kesimlerinin titreşim şiddeti üzerindeki etkileri [2, 16, 17] konularının araştırıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar faydalı olsalar da sektörün ihtiyaç duyduğu “öncelikli” alanlara, tam anlamıyla yönelik değillerdir. Ayrıca ölçüm prosedürleri, sektörün kolayca kullanabileceği şekilde izah edilmemiş, hatta uygunsuz ölçüm teknikleri kullanılmıştır.

Tablo 1. Mobil cihazların raylı sistemlerde, çeşitli alanlarda kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmalar

Çalışmanın Ana Amacı	İvmeölçer VAS	Jiroskop VAS	GNSS	Referans
Konum takibi	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Yok	[13]
Seyahat konforu	10 Hz	Yok	Var	[14]
Seyahat konforu	18-35 Hz	Yok	Yok	[15]
Seyahat konforu	30 Hz	Yok	Yok	[12]
Geometrik parametreler	76-120 Hz	132-198 Hz	Var	[11]
Geometrik parametreler	200-500 Hz	200-500 Hz	Yok	[10]
Titreşim şiddeti-hat kesimi ilişkisi	100 Hz	Yok	Yok	[16]

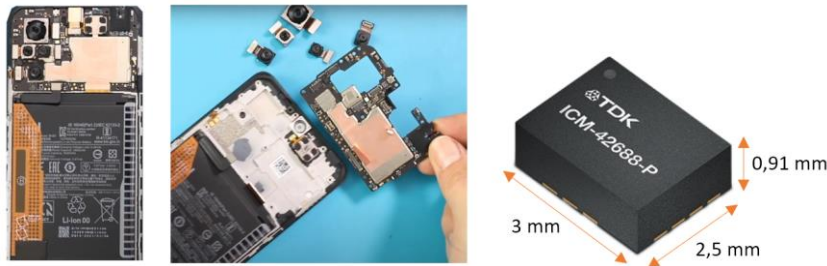
Titreşim şiddeti-hat kesimi ilişkisi	100 Hz	Yok	Var	[17]
Titreşim şiddeti-hat kesimi ilişkisi	232-432 Hz	Yok	Yok	[2]

Sonuç olarak, bu çalışmanın amacı, raylı ulaşım sektörünün “öncelikli ihtiyacı” olduğu düşünülen ve konvansiyonel TCA muayenelerinin kısmen/tamamen “eksik kaldığı” görülen hususların takviyesidir. Bu bağlamda; akıllı telefon (mobil cihaz) kullanılarak, daha yüksek sıklıkla (istenilirse her tren seferinde), daha ekonomik, kestirimci bakım anlayışına uygun ve tren trafiğini aksatmayacak bir çözüm ortaya konulması hedeflenmektedir. Ayrıca, literatürde mevcut mobil cihazlı TCA çalışmalarında tespit edilen çeşitli eksilik/yanlışıklar ortaya konularak, daha uygun bir ölçüm prosedürü elde edilmeye çalışılacaktır. Bu bağlamda, önerilecek uygulamanın raylı ulaşım sektöründe, çeşitli kademelerdeki personellerin rahatlıkla uygulayabileceği bir sadeliğe sahip olmasına ve detaylıca izah edilmesine özen gösterilmiştir. Bu sayede, çeşitli kritik hususların (ray kırığı vb.) muayenesi daha sık yapılabilecek ve sonuçta, bakım maliyetlerinin düşürülmesi ve daha önemlisi, ulaşım güvenliğinin artırılması açısından fayda sağlanabilecektir.

2. Metot

2.1. Ölçümlerde kullanılan mobil cihaz

Çalışma kapsamında yürütülen ölçümlerde, Xiaomi Redmi Note 10 Pro modeli mobil cihaz kullanılmıştır. Mobil cihazda, TDK InvenSense icm4x6xx modeli 3-eksenli ivmeölçer mevcuttur. Bu ivmeölçerin kapasitesi $156,9064 \text{ m/s}^2$, çözünürlüğü $0.0047884034 \text{ m/s}^2$, sinyal/gürültü performansı ise $70 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 'dir. İvmeölçer ile aynı kutu içerisinde, açılabilir hız ölçer de (jiroskop) bulunmaktadır. Bu jiroskop, TDK Invensense icm4x6xx modeli ve 3-eksenlidir. Kapasitesi 34.905556 rad/s , çözünürlüğü ise $0.001065233 \text{ rad/s}$ 'dir. Gerek ivmeölçer gerekse jiroskop, MEMS tipi (Microelectro Mechanical System) olup, Şekil 2'den görüldüğü üzere oldukça küçük boyutlara sahiptir. Adı geçen mobil cihazın kullanılmasının nedeni, yukarıda zikredilen hassas ölçüm karakteristiklerine ilaveten, çoğu mobil cihazdan daha yüksek “örnekleme hızına/veri alma sıklığına” sahip olmasıdır. Bu konuya ilişkin detaylar ilerleyen bölümde sunulacaktır.

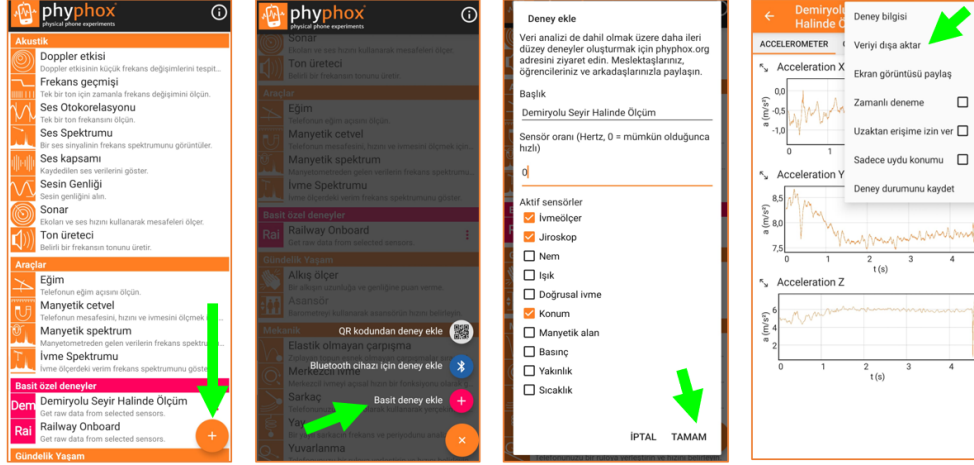


Şekil 2. Kullanılan mobil cihazın iç görünümü ve ivmeölçer ile jiroskobu içeren kutunun boyutları [18]

2.2. Ölçümlerde kullanılan yazılım ve uygulanan ayarlar

Çalışma kapsamında yürütülen ölçümlerde, Google Play (Android) veya App Store (iOS) üzerinden ücretsiz olarak yüklenebilen, Phyphox yazılımı (1.1.12-beta2 kodlu Android sürümü) kullanılmıştır. RWTH Aachen Üniversitesi (Almanya) tarafından geliştirilen bu yazılım, birçok ödül kazanmıştır [19]. Yazılım mobil cihaz içerisindeki termometre, barometre, manyetometre, ivmeölçer, lüks ölçer, jiroskop, konum sensörleri üzerinden veri alıp, istenilen örnekleme hızlarında kayıt gerçekleştirebilmekte ve uzaktan erişime/ekran paylaşımına da izin vermektedir. Şekil 3'te çalışma esnasında kullanılan deney şablonunun ayarlandığı işlem adımları sunulmuştur. En soldaki ekran görüntüsü, program başlangıç ekranı olup, sağ alt köşesindeki “🔴” simgesi ve açılan ekranda basit deney ekle “🔴” simgesi kullanılarak, şablon ayarlarına girilmektedir. Açılan

ekranda, deney şablonu için bir “başlık” belirlenmektedir. Ardından sensör oranı (örnekleme hızı, sampling rate) değeri girilmektedir. Bu değer, kullanılan mobil cihaz altyapısına ve sensör tipine bağlı olarak, çeşitli telefon modelleri arasında oldukça değişkendir. “0” değeri girilmesi hâlinde, mobil cihazın izin verdiği en yüksek örnekleme hızı ile kayıt gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. Phypbox yazılımında deney (ölçüm) şablonunun belirlenmesi ve kaydedilen verinin dışı aktarımı

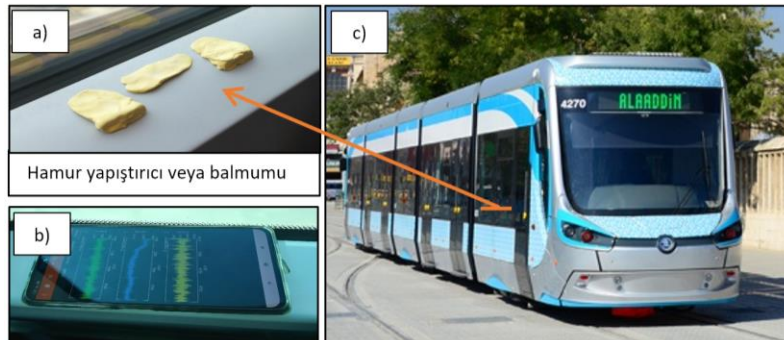
Phypbox internet sitesinde [20] 3883 adet (ve sürekli artan sayıda) mobil cihazın sensörleri ile ilgili veri tabanı mevcuttur. Bu sitede verileri bulunmayan ve her yıl piyasaya yenileri dâhil olan, yüzlerce başka model mobil cihaz da söz konusudur. Dolayısıyla günümüzde dünyada mevcut çeşitli birçok mobil cihazın bu çalışma kapsamında karşılaştırılması mümkün olmamıştır. Bunun yerine, sensör hassasiyeti ve veri alma sıklığı yüksek bir mobil cihazın kullanılması yeterli görülmüştür. Bu veri tabanına göre, örneğin iPhone 14 Pro Max modeli mobil cihazın en yüksek veri alma sıklığı 100 Hz (saniyede 100 adet) iken, bu çalışmada kullanılan Redmi Note 10 Pro'nun 500 Hz'dir. Bu değer, Tablo 1'deki, günümüze kadar çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılan örnekleme hızlarının neredeyse tamamından yüksek ve yalnızca referansı verilen [10] çalışma ile eşittir. Yüksek örnekleme hızı, -ölçüm amacına göre- bazen çok kritik bir ihtiyaç hâline gelebilmektedir. Örneğin 30 km/sa hızla giden bir demiryolu aracı, 1 saniyede yaklaşık 8,3 metre yol katetmektedir. Dolayısıyla örneğin 100 Hz veri alma sıklığı ile her 8,3 cm'de bir veri alınabilirken, 500 Hz veri alma sıklığında, her 1,7 cm'de bir veri alınabilmektedir. Araç hızının artması ile bu mesafeler doğru orantılı olarak artacaktır. Sonuç olarak, özellikle ray kırığı gibi, çok dar bir lokasyonu etkileyen hasar tiplerinin tespiti hedefleniyorsa, ivme değişimi çok kısa bir sürede gerçekleştiğinden, veri alma sıklığının mümkün olduğu kadar artırılması, bu problemlerin tespit edilebilirliği açısından oldukça önemlidir. Aksi takdirde demiryolu aracı söz konusu problemleri lokasyondan geçerken, meydana gelen ivme değişimlerinin pik noktaları kayıt altına alınamayabilecek, ya hafif bir bozulma veya normal bir seyir titreşimi gibi algılanabilecektir. Öte taraftan, Nyquist örnekleme teoremine göre, örnekleme hızı örneğin 100 Hz olan bir mobil cihaz ile ancak 50 Hz'e (yarısı) kadarki sinusoidal sinyaller sağlıklı bir şekilde ölçülebilmektedir [11]. Araç-yol etkileşimi ile ortaya çıkan titreşimlerin frekansları ise araç hızına bağlı olarak artmakta ve eğer mobil cihaz örnekleme hızı yeterli değilse, yüksek frekanslar kayda girememektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, kullanılan mobil cihaz ile ulaşılabilecek en yüksek veri alma sıklığına erişilmesi için Şekil 3'te görülen ayar ekranında, veri alma sıklığı “0” olarak girilmiştir.

Örnekleme hızının ayarlanmasından sonra, sıra, kullanılacak sensör tiplerinin belirlenmesine gelmektedir. Bu çalışmada, mobil cihaz içerisindeki çeşitli sensörlerden, yalnızca ihtiyaç duyulan 3 adedi (ivmeölçer, jiroskop, konum) kullanılmış olup, Şekil 3'te, soldan 3. ekran görüntüsünde görülen onay kutucukları işaretlendikten sonra, ekranın sağ alt köşesindeki “TAMAM” butonu kullanılarak, test ekranına geçilmiştir. Bu ekrandaki “▶” butonu kullanılarak kayıt

başlatılabilmekte, “**II**” butonu kullanılarak da, istenilen zamanda durdurulup, “**▶**” butonu ile kayıt devam ettirilebilmektedir. Kayıt durdurulup “**◀**” butonu ile mevcut ekrandan çıkıldığında ise, ölçüm kaydı, otomatik olarak, giriş ekranında, “Kaydedilmiş deney durumları” kısmında görünür hâle gelmektedir. Bu kayda girilerek, kaydedilen ölçüm sonuçları, yüzeysel olarak incelenebilmektedir. Detaylı analizler için ise; bu çalışmada kullanılan yöntem, kaydedilen verilerin Microsoft Office Excel (.xls) formatına dönüştürülüp, internet üzerinden e-posta adresine veya WhatsApp hesabına transfer edilmesidir. Bunun için ölçüm sonunda, kayıt ekranından ayrılmadan önce veya daha sonra herhangi bir zamanda ilgili ölçüm kaydına girilerek, sağ üst köşedeki “**I**” butonu üzerinden “veriyi dışarı aktar” seçeneği kullanılmıştır. Bu ekran, Şekil 3’teki en sağdaki ekran görüntüsünde mevcuttur. Bu ekranda ayrıca “uzaktan erişime izin verme” ve “ekran görüntüsü paylaşımı” ayarları da mevcut olup, aktifleştirilmesi hâlinde, internet erişimi olan, dünyanın herhangi bir yerinde, gerek sensör verileri (ivme, açısız hız, ışık şiddeti, sıcaklık vb.), gerekse trenin konumu ve hızı, “anlık” olarak izlenebilmektedir (real time access).

2.3. Ölçümlerin gerçekleştirildiği demiryolu aracı ve raylı sistem hattı

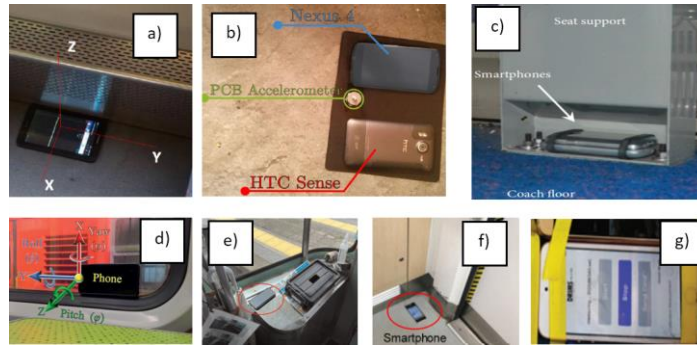
Bu çalışma kapsamında, Konya Büyükşehir Belediyesince işletilen, 1435 mm ekartman mesafesine sahip, kent içi, hafif raylı sistem, yolcu tramvay hattında [21] ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu hattın tercih edilme nedeni, hata tespit edilen lokasyonların kolayca erişilebilir olması ve trafik güvenliği tehlikeye sokulmadan detaylı incelemelerin yapılabilmesidir. Konya’da, Alaaddin-Selçuk Üniversitesi ve Alaaddin-Adliye İstasyonları arasında işletilen 2 farklı tramvay hattı mevcuttur. 2015 yılında hizmete açılan Alaaddin-Adliye hattında, 9 adet istasyon bulunmaktadır ve toplamda 4,4 km uzunluğa sahiptir [21]. Bu çalışmada, çeşitli birçok demiryolu unsurunu içeren (alyman, kurp, makas vb.) Zafer-Mevlânâ İstasyonları arasında kaydedilen ölçüm sonuçlarının verilmesi, çalışma hacminin fazla artmaması bakımından yeterli görülmüştür. Konya ilinde işletilen tramvay setleri, Škoda 28 T1/2 (Škoda ForCity Classic) modelidir. Tramvay setleri, 5 adet (toplamda 32,52 metre), düşük-döşemeli, çift-yönlü, üç sabit boylu vagonlardan oluşmaktadır. Tarif edilen niteliklerdeki toplamda 72 tramvay seti, 2013-2015 yıllarında Škoda tarafından Konya iline özel olarak üretilmiştir [22]. Bu setlerin tümü elektrik enerjisi ile (katener hattı üzerinden pantograflarıyla enerji olarak) çalışmakta olup, hız limitleri 70 km/sa’dır [23]. Ancak 12 adedi, nano-lityum-titanyum akü içermektedir. Bu sayede pantograf mevcut olan hat kesimlerinde şarj olarak, 3 km mesafeye kadar harici enerji kullanmaksızın çalışabilmektedir. Bu akülü setler, Alaaddin-Adliye arasında işletilmekte olup, Şekil 4.a’da örnek bir fotoğraf sunulmuştur. Söz konusu şarjlı setler, Mevlânâ İstasyonundan Alaaddin İstasyonuna kadar (yaklaşık 1,8 km), katener hattından enerji almaksızın ulaşım sağlayabilmektedir [24].



Şekil 4. a) Ölçümlerde mobil cihazın montajında kullanılan hamur yapıştırıcılar, b) Mobil cihazın tramvayda montajı yapılan lokasyon (pencere kenarı), c) Ölçümlerin gerçekleştirildiği tramvay seti örneği

2.4. Mobil cihazın raylı sistem aracı içerisinde konumlandırılması

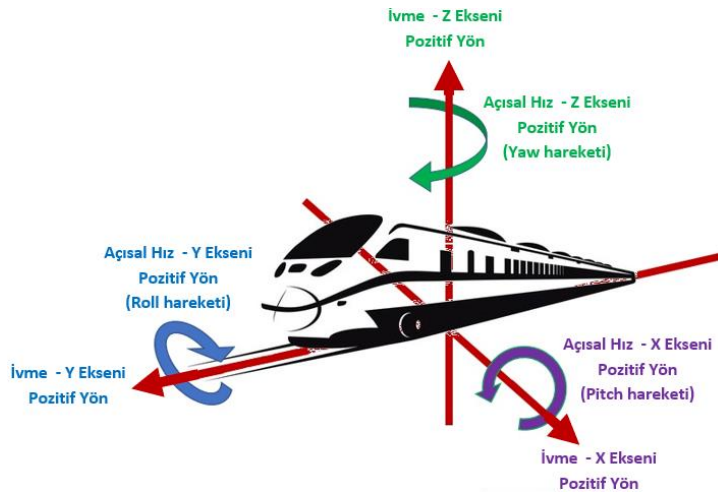
Mobil cihazlarla demiryolu ölçümü konusunda, günümüze kadar yürütülen çalışmalarda (Tablo 1), kullanılan mobil cihazların, demiryolu taşıtları içerisinde konumlandırıldıkları lokasyonlar ve bağlantı tipleri Şekil 5’te toplanmıştır. Bu şekil incelendiğinde, bazı çalışmalarda mobil cihazların zemine veya yolcu koltuğu altına konumlandırıldığı görülmektedir (Şekil 5.a,c,f). Ancak bu durum, hem konum (GNSS) verilerinin alınmasını zorlaştıracak [11-13], hem de vagon içerisinde hareket eden insanların (adım atma vb. hareketlerinin) neden olacağı, istenilmeyen (yanıltıcı) titreşimlerin ölçüm kayıtlarına girmesine neden olacaktır [11]. Mevcut literatürde, “bağlantı yeri” bakımından söz konusu olan bu yanlış tercihler, “bağlantı biçimi” için de söz konusudur. Bu bağlamda, bazı çalışmalarda mobil cihazlar ya hiçbir yapıştırıcı kullanılmadan olduğu gibi konumlandırılmış (Şekil 5.b,c,e,f), ya da titreşim iletme kapasitesi düşük/sönümleyici [12] yapıştırıcı/bant kullanılmıştır (Şekil 5.a,d,g). Şekil 5’te sunulan tüm bu uygulamalar, belirtilen bu sorunlardan ya birini ya da her ikisini birlikte içermektedir. Bu çalışma kapsamında ise hem konum bilgisinin daha iyi alınabileceği bir lokasyon, hem de titreşim şiddet ve frekans bileşenlerini daha iyi iletebilecek bir bağlantı metodu kullanılmıştır.



Şekil 5. Literatürde mobil cihazla hat ölçümü yapılırken kullanılan teknikler: a) Vagon zeminine çift taraflı bantla yapıştırma [12], b) Kauçuk ped üzerine serbest konumlandırma [15], c) Yolcu koltuğunun altında serbest konumlandırma [16], d) Vagon penceresine yapıştırma [10], e) Kontrol panosu üzerinde serbest konumlandırma [2], f) Vagon zemininde serbest konumlandırma [13], g) Bantla yapıştırma [17]

Bu çalışma kapsamında yürütülen ölçümlerde kullanılan mobil cihaz, tramvay yolcu koltuğunun hemen yanındaki pencerenin kenarına (Şekil 4) konumlandırılmıştır. Bu esnada, piyasada rahatlıkla erişilebilen hamur yapıştırıcı (Şekil 4.a) kullanılmıştır. Bu malzemenin tercih edilmesinin nedeni, ölçümler için yeterli yapıştırma kuvvetine ve frekans iletimine sahip olması, ölçümlerden sonra da yapıştırıcının kolayca ve iz bırakmadan ayrılabilmesidir. Ölçümlerde hamur yapıştırıcı yerine frekans iletimi bakımından daha iyi, ancak uygulanabilirlik açısından bir nebze daha zor olan bal mumunun da kullanılabileceği tespit edilmiştir. Bazı trenlerde, pencere kenarındaki vagon gövdesinin bir miktar eğimli olması mümkündür (Şekil 4.a). Bu durumda, kullanılan yapıştırıcının, pencereden uzak kısımlarının bir miktar fazla tutulması (eğime ters) faydalı olacaktır. Çünkü Phyphox yazılımında “kalibrasyon” seçeneği bulunmamaktadır. Ancak, mobil cihazın eğiminin tamamen yeryüzüne paralel hâle getirilmesi zorunluluğu yoktur. Çünkü verilerin Excel’e aktarımı ardından, yapılacak basit bir kalibrasyon işlemi ardından, bu olumsuz etki minimize edilebilmektedir. Bu kalibrasyon ihtiyacı, önceki bir çalışmada kısmen [13] dile getirilmekte, ancak nasıl bir işlem yürütüleceği izah edilmemektedir. Bu çalışmada uygulanan prosedür ise, sektörün rahatça kullanabilmesi için kısaca izah edilecektir. Mobil cihaz, raylı sistem aracına yapıştırıldıktan sonra, tren dururken, ivme değerlerinin (doğrusal ivmeölçer verilerinin) sıfır (0) olması gerekmektedir. Ancak cihaz yapıştırıldığında, yer yüzüne tam paralel olmazsa, sıfır değeri yerine, bazı pozitif/negatif değerler söz konusu olacaktır. Ancak ölçüm işlemi bittikten ve veri transferi tamamlandıktan sonra, Excel’de, taşıt hareket etmediği bir âna ait kayıtlarda, sonuçlar sıfır olacak şekilde/nötrleştirici ekleme/çıkarma formülü uygulandığında ve bu formül tüm satırları kapsayacak şekilde genişletildiğinde, bu sorun, yeterli düzeyde çözülmüş olmaktadır. Benzer uygulama, “kullanılacaksa” açışal hız kayıtlarında da yapılmalıdır.

Çalışma süresince, mobil cihazın ekran kısmı, üste gelecek (vagon tabanına paralel) şekilde (Şekil 4.b) konumlandırma yapılmıştır. Ancak bu uygulama da zorunlu değildir. Mobil cihazın bir düzleminin seyir istikameti ile paralel olması kaydıyla, farklı yönlerde montajı da mümkündür. Öte yandan, yalnızca düşey eksenle analiz yapılacaksa, herhangi bir düzlemin seyir istikametine paralel olmasına da gerek yoktur. Ancak eğer üç-eksenli analiz yapılacaksa, ölçüm sonuçlarının doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için, bir düzlemin seyir düzlemi ile paralel olması ve mobil cihazın tren seyir istikameti ile ilişkisinin doğru bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Cihazın bu çalışmada uygulandığı (Şekil 4’te tarif edilen) şekilde konumlandırılması hâlinde, ölçüm sonuçlarının tren seyir düzlemiyle ekstenel ilişkisi, Şekil 6’daki gibi olacaktır. Şunu ifade etmek gerekir ki; bu çalışmada, araştırma amacıyla uygulanan “geçici süreli” yapıştırma tekniğine, sektörel uygulamalarda ihtiyaç duyulmayabilecektir. Mobil cihazın, kontrol kabini içinde, pencereye yakın uygun bir yere, enerji kaynağına bağlı bir şekilde sabitlenmesi, “uzun süreli” ölçümler için daha uygun olabilecektir. Bu şekilde, yukarıda değinilen “kalibrasyon” işlemine de gerek duyulmayacak, sağlıklı ve pratik bir bağlantı tesis edilmesi mümkün görülmektedir.



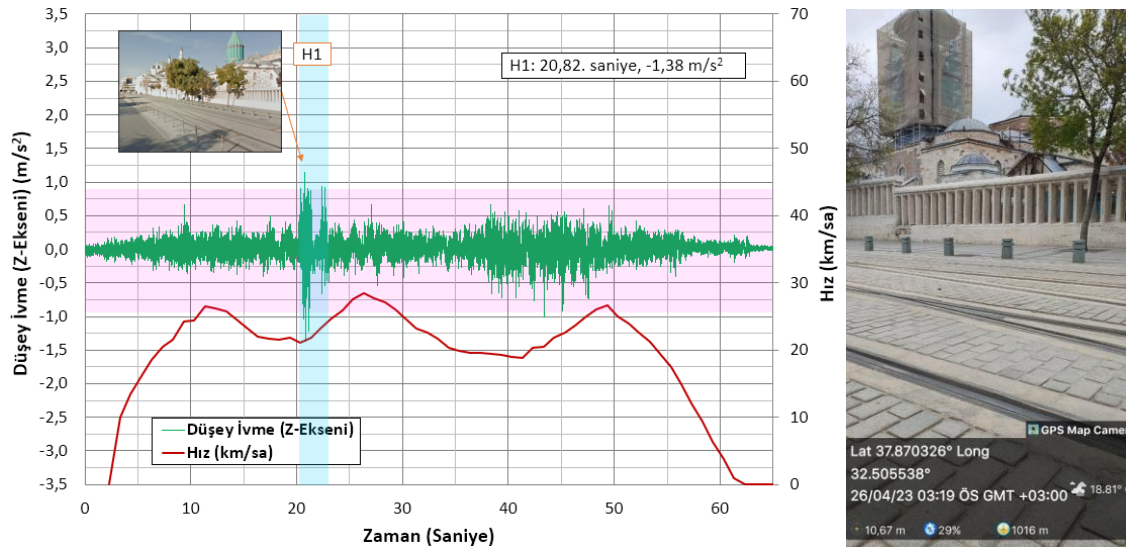
Şekil 6. Mobil cihazla ölçülen ivme ve açısal hız kayıtlarının (Şekil 5 için) hat güzergâhı ile ilişkisi

Bu çalışma kapsamında, mobil cihazın “trenin farklı lokasyonlarına” yapıştırılmasının nasıl bir etkiye sahip olduğu konusu araştırılmamıştır. Bunun nedeni, değinilen konunun, daha önce, çeşitli çalışmalarda araştırılmış olmasıdır. Örneğin Rodríguez ve ark. (2021), farklı ölçüm lokasyonlarından alınan ölçümleri değerlendirdiklerinde, aynı “trende/eğilime” sahip olduklarını belirlemiş ve değersel olarak kayda değer bir farkları olmadıklarını tespit etmiştir [12]. Öte taraftan, 1. Giriş bölümünde detayları verilen Alman Demiryolları CTM analiz sonuçlarına göre, vagon içinden ve aks kutusundan alınan ölçümler arasında yüksek bir korelasyon mevcuttur [11].

3. Bulgular

Önceki bölümde tarif edilen metodoloji kullanılarak, Konya Büyükşehir Belediyesince işletilen tramvay hatlarında çeşitli birçok ölçümler alınmıştır. Ancak bu çalışmada yalnızca Mevlânâ-Zafer İstasyonları arasında kaydedilen, düşey eksenledeki (Şekil 6’daki Z-ekseni) ivme kayıtlarına ait analiz sonuçlarının sunulması yeterli görülmüştür. Bu hat kesiminin tercih edilme nedeni önceki bölümde izah edilmiş olup, düşey eksene ait ivme kayıtlarının analiz edilmesinin gerekçesi ise; ray kırılmaları, ani rijitlik değişimleri ve geometrik süreksizliklerin tespit ve takibi açısından asgari bilgiyi sağlayabilmesidir. İlerleyen süreçte, diğer hat kesimlerinde, diğer eksenlerdeki ivme kayıtları ve açısal hız ölçümleri de kullanılarak, araştırmalara devam edilmesi planlanmaktadır. Şekil 7’de Mevlânâ İstasyonu ile müteakip trafik ışığı arasında kaydedilen düşey ivme-zaman (yeşil renkli) ve hız-zaman (kırmızı renkli) grafikleri sunulmuştur. Yapılan birçok ölçüm sonucunda, Adliye-Zafer İstasyonları arasında, vagon üzerinden alınan mobil cihazlı düşey ivme

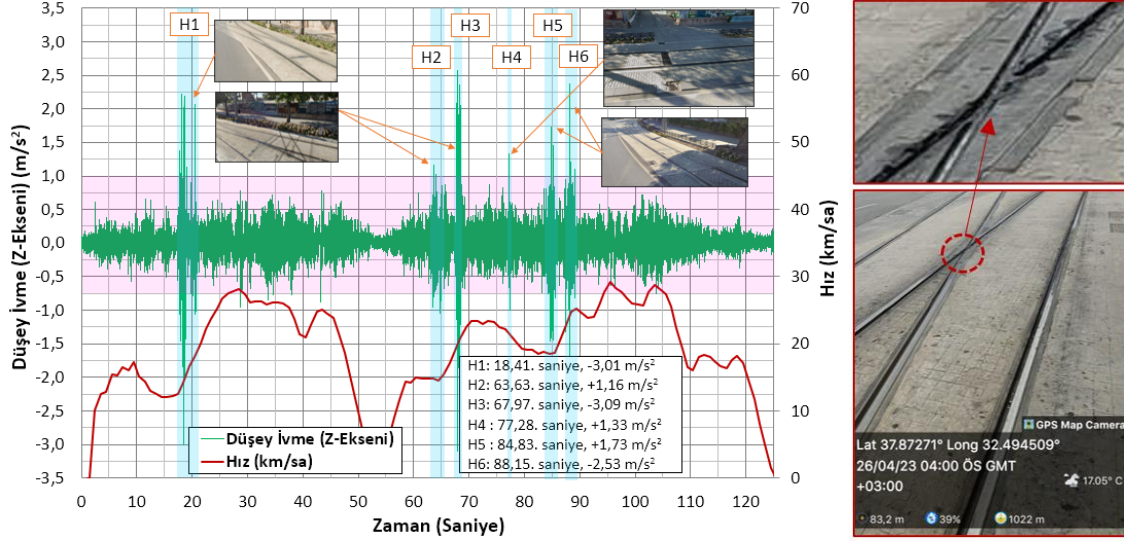
kayıtlarında, $\pm 0,95 \text{ m/s}^2$ değerinin (Şekil 7’de saydam kırmızı dolguyla taranan alanın), normal hat işletimi kaynaklı titreşimlerden kaynaklandığı kanaati hâsıl olmuştur. Diğer ifadeyle; $\pm 0,95 \text{ m/s}^2$ arasındaki düşey ivme değişimleri, (tren setine, üstyapı tipine, taşıt hızına, tolere edilebilir geometrik bozulmalara vs. bağlı olarak artıp azalan) normal hat işletimi kaynaklıdır. Dolayısıyla bu aralıkta kalan ivme değişimleri, bu çalışmanın tespitini hedeflediği problemlerin kapsamı dışındadır. Buna göre, Şekil 7’de, değinilen $\pm 0,95 \text{ m/s}^2$ düşey ivme limitini aşan yalnızca bir hata (H1) tespit edilmiştir. Kayıt işlemleri sonlandırıldığında ve ölçüm sonuçları Excel’e transfer edilerek incelendiğinde, bu H1 hatasının 20,82. saniyede gerçekleştiği tespit edilmiştir. Phypbox yazılımında, ivme kaydı ile senkronize bir şekilde konum (GNSS) bilgileri de kaydedildiğinden, söz konusu zaman diliminde tramvayın bulunduğu koordinatlar (Enlem: 37,87039912, Boylam: 32,50548075 derece) kolayca belirlenebilmiştir. Belirlenen bu koordinatlar, Google Earth veya Google Haritalar uygulamalarına girilerek (arama alanına 37.87039912, 32.50548075 yazılarak), hata konumu haritada ön-izlenebilmekte, hatta karayolu ile yakın bir güzergâhta bulunması hâlinde, Google Sokak Görünümü (Street View) ile de incelenebilmektedir. Hata lokasyonuna erişim için ise; belirlenen koordinatlar, Google, Yandex vb. “Navigasyon” uygulamalarına girilerek, hata lokasyonuna taşıtla ve/veya yaya olarak ulaşım sağlanabilmektedir. Belirtilen koordinatlara ulaşıldığında, Şekil 7’deki, $-1,38 \text{ m/s}^2$ ’ye ulaşan bu çoklu-ivme artışlarının, Mevlânâ Türbesi ve Müzesi önünde teşkil edilen Makas Sisteminden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bölgede hız tahdidi (20/25 km/sa) uygulanmasına rağmen, kaydedilen bu yüksek ivmeler, konvansiyonel makas sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan bir sorundur. Metal tren tekerinin, metal raylar üzerinde yuvarlanırken, karşılaştığı süreksizlikler (makaslar) bu ivme artışlarına neden olmaktadır. Şekil 7’de sağda, GPS Map Cam uygulaması kullanılarak, söz konusu makas sisteminin ölçümlerin gerçekleştirildiği tarihteki görünümü ve enlem, boylam, hava durumu (sıcaklık-nem) gibi çeşitli detay bilgileri ile birlikte sunulmuştur. Bu fotoğraftan söz konusu makas sisteminin, tarihi yapıya yakınlığı da görülebilmektedir. Dikkat çeken bir diğer husus, makas sisteminde tekil ivme değişimi değil, çoklu artış-azalışların söz konusu olmasıdır. Bunun nedeni, sağ ve sol tekerlerin makasa girdiği ve çıktığı lokasyonların farklı olmasıdır. Saniyede 500 veri alınması sayesinde bu çok kısa mesafeler, kayda ayrı ayrı girebilmiştir.



Şekil 7. Mevlânâ İstasyonu ile müteakip trafik ışığı arasındaki hat kesimine ait ivme-hız-zaman grafiği (solda) ve H1 hatasının kaynaklandığı makas sisteminin yakından görünümü (sağda)

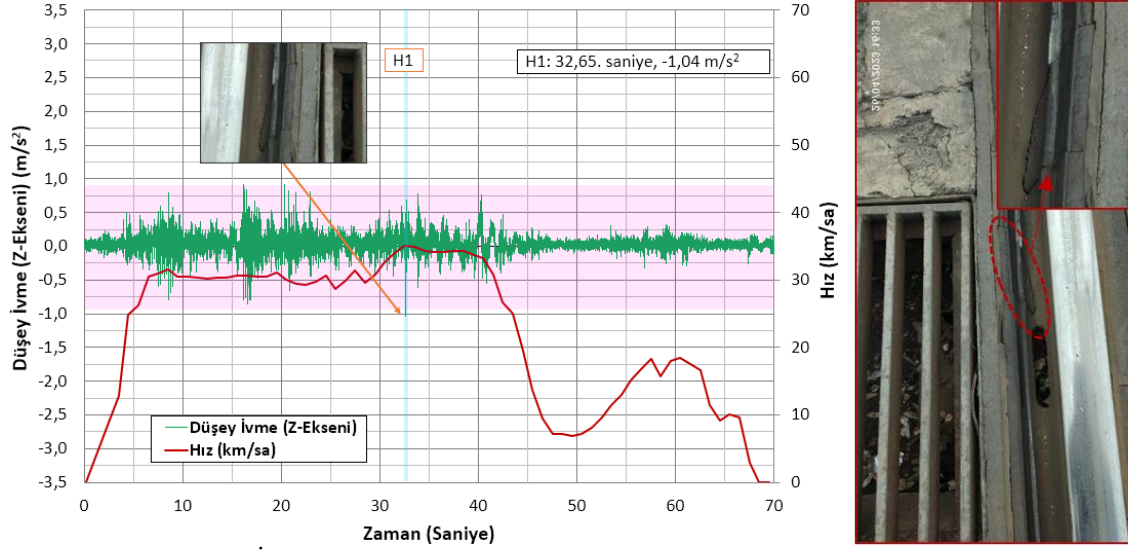
Şekil 7’de sunulan makas sistemi kaynaklı ivme artışı, ölçüm yapılan hat kesimindeki çeşitli bazı diğer makas sistemlerinde de söz konusu olmuştur. Şekil 8’de buna dair 5 örnek (H1, H2, H3, H5, H6) görülmektedir. Ancak ivme şiddetleri, her makasta aynı değildir. Olası ilk neden, tramvay hızının her makasta aynı olmayışıdır. Çünkü hız arttıkça dinamik kuvvetler artmaktadır. Ancak, bazı makaslarda, taşıt hızı aynı olmasına rağmen, ivme şiddeti $-3,00 \text{ m/s}^2$ değerinin üzerine

çıkmıştır. Bunun nedeni, geometrik anormalliğinin daha fazla olmasıdır. Şekil 8’de (sağda), $-3,01 \text{ m/s}^2$ ’ye ulaşan H1 hatasının GPS Map Cam uygulaması ile alınan görüntüsü sunulmuştur. Kayda giren bir diğer hata tipi (H4) ise su drenaj kanalı/ızgarasının neden olduğu rijitlik değişimidir. $+1,33 \text{ m/s}^2$ ’ye ulaşan bu hata, bu bölgede, ilerleyen süreçte üstyapı ve/veya altyapı elemanlarında sorunlar oluşacağını işaret etmektedir. Bu hata tipi, ulaşım güvenliğini henüz tehdit etmese de bakım maliyetlerini düşüren “kestirimci bakım” uygulamaları açısından önem arz etmektedir.



Şekil 8. Mevlânâ-Alaaddin İst. arasındaki hatta ait ivme-hız-zaman grafiği ile H1'in yakından görünümü

Ölçümlerin gerçekleştirildiği hat kesiminde tespit edilen bir diğer çok önemli hata tipi, ray kırığıdır. Sıradan gözle muayeneler esnasında tespit edilmesi oldukça güç olan bu kırılma, kullanılan metodolojinin (mobil cihazlı TCA) sağladığı avantajlar sayesinde tespit edilebilmiş ve Şekil 9’da sunulan grafikte, $-1,04 \text{ m/s}^2$ ’lik “tekil ivme değişimiyle” kendini göstermiştir. Bu yüksek ivmelenme (Şekil 9, H1), daha önce açıklanan hata tipiyle (Şekil 8, H4) aynı nedenden ortaya çıkmıştır. Yani su drenaj kanalı/ızgarasının neden olduğu rijitlik değişimi, zamanla ray kırığına dönüşmüştür. Bu durum, daha önce Şekil 8, H4 hatası için yapılan yorumların haklılığını da ortaya koymaktadır. Yani belirlenen ivme şiddetini aşan ani rijitlik değişimleri ve geometrik süreksizlikler, eğer kestirimci bakım uygulamalarıyla zamanında önlem alınmazsa, zamanla daha yüksek maliyetli bakım işlemleri gerektiren ve ulaşım emniyetini tehdit eden hasarlara sebebiyet verebilmektedir. Söz konusu ray kırığı (km. 00+560) tespit edilince ilgili birime bilgi verilmiş, gerekli müdahalelerin yapılacağına dair teşekkür içeren bir yanıt alınmıştır.



Şekil 9. Alaaddin-Zafer İst. arasındaki hatta ait ivme-hız-zaman grafiği ile ray kırığının yakından görünümü

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, yürütülen mobil cihazlı demiryolu ölçümlerinde, Türkçe dil paketine sahip, ücretsiz bir mobil yazılım (Phyphox) kullanılmıştır. Çalışma içerisinde bu yazılım kullanılarak nasıl ölçüm alınabileceği, mümkün olduğu kadar basite indirgenerek izah edilmeye çalışılmıştır. Bu şekilde raylı ulaşım sektöründe, çeşitli kademelerdeki personellerin rahatlıkla uygulayabileceği bir yöntem ortaya konulmaya çalışılmıştır. Kullanılan mobil cihaz, çalışma içerisinde detayları verilen pratik bir metotla tramvaya bağlanmış ve rutin seyir müddetince düşey ivme değerlerinin ve senkronize bir şekilde konum verilerinin kaydedilmesi sağlanmıştır. Ölçüm yapılan hat kesiminde, rutin seyir esnasında, $\pm 0,95 \text{ m/s}^2$ ivme değerini aşmayan titreşimler olduğu, bu değeri aşan lokasyonlarda ise çeşitli üstyapı/altyapı hatalarının, ani rijitlik değişimlerinin ve geometrik süreksizliklerin mevcut bulunduğu görülmüştür. Bir diğer husus, özellikle ray kırığı gibi hatalar, çok kısa bir mesafede etkili olmakta ve meydana gelen ivme değişimleri birkaç milisaniyeyi geçmemektedir. Dolayısıyla mobil cihazların bu çok kısa süreli ivme değişimini okuyabilmesi için yüksek örnekleme hızı ile ölçüm alması kritik bir öneme sahiptir. Çalışma kapsamında saniyede 500 veri kaydı (500 Hz örnekleme) gerçekleştirilmiştir. Raylı ulaşım sistemi işletmecileri, söz konusu ölçüm sonuçlarını, kestirimci bakım amacıyla kullanabileceklerdir. İşletmeciler, kendi hat ve araç karakteristiklerini baz alarak, belirleyecekleri uyarı-limit değerini aşan lokasyonları takibe alabilir ve müdahale-limit değerini aşan lokasyonlarda; çeşitli bakım, revizyon, modernizasyon, rehabilitasyon kararları alabilir. Örneğin ölçüm yapılan hat güzergâhında, henüz ray çatlağı görülmeyen, ancak yüksek ivme değişimlerine neden olan birçok drenaj kanalı/ızgarası tespit edilmiştir. Bu hatalara karşı, kestirimci bakım anlayışla, önceden önlem alınması oldukça faydalı olacaktır. Nitekim ölçüm yapılan hat kesiminde, bir adet ray kırığı da tespit edilmiştir. Bu ray kırığının, söz konusu drenaj kanalı/ızgarasının bulunduğu bir lokasyonda meydana gelmiş olması, yukarıda değinilen çıkarımların doğruluğunu göstermektedir. Bir diğer kullanım alanı, bazı hat kesimlerinde tekayyüdat (geçici hız sınırlaması) uygulamak ve/veya (hız-zaman-konum verileriyle) tekayyüdatlara uyulup uyulmadığını kontrol etmek olabilir. Bir diğer önemli kullanım alanı ise, bu veriler, hat kesimlerinde ne tür üstyapı/altyapı elemanları kullanılabileceği konusunda karar vermekte kullanılabilir. Örneğin, ölçüm gerçekleştirilen hat kesiminde, Unesco Dünya Mirasında bulunan Mevlânâ Türbe ve Müzesinin yakınına makas sistemi teşkil edildiği ve bu makas sisteminde, $0,95 \text{ m/s}^2$ limit değerini aşan ivmelenmeler söz konusu olduğu tespit edilmiştir. Mobil cihazlı ölçümler sayesinde, makas sisteminin farklı bir bölgeye taşınması kararı alınabilir, mevcut izolasyon tedbirlerinin yeterliliği analiz ettirilebilir veya mevcut izolasyon sistemi inşa edilirken yeterli olsa dahi, makas sisteminin aynı performansa sahip olup olmadığı takibe alınabilir.

Teşekkür

Bu çalışmadaki katkıları için Konya Büyükşehir Belediyesi yetkililerine ve Phyphox, Google Maps, GPS Map Cam ve Microsoft Excel yazılımı geliştiricilerine teşekkürlerimi sunarım.

Kaynakça

- [1] D. Sasi, S. Philip, R. David, J. Swathi, "A review on structural health monitoring of railroad track structures using fiber optic sensors," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33 (7), pp. 3787-3793, 2020
- [2] A. G. Hessami, R. Muttram, *New Research on Railway Engineering and Transportation*, IntechOpen, Jan. 24, 2024. Doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.105261>
- [3] K. Uray, "Demiryolu Bakım İşlerinde Matris Yöntemi Kullanılarak Risklerin Olası Etkilerinin Belirlenmesi," *Afet ve Risk Dergisi*, vol. 4 (2), pp. 121-134, 2021
- [4] Mermec Group, "Roger 400," 2024. [Online]. Available: <https://www.mermecgroup.com/inspect/recording-cars/105/roger-400.php> [Accessed January 28, 2024]
- [5] M. V. Taciroğlu, M. Kardeşahin, M. Tığdemir, "Ankara-Eskişehir Yüksek Hızlı Tren Hattında Meydana Gelen Geometrik Bozulmaların Değerlendirilmesi," *Çukurova Ü. Müh. Mim. F. Der.*, vol. 30(2), pp. 345-354, 2015
- [6] TCDD, "Demiryolları'nda "Demir Göz" Göreve Başladı," 2021. [Online]. Available: <https://www.tcdd.gov.tr/haberler/demiryollarinda-demir-goz-goreve-basladi> [Accessed January 28, 2024]
- [7] Latronix AB, "25 000 km of Latronix Track Measurement, together with TCDD Teknik," 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=bIuaRV4m8wY> [Accessed January 28, 2024]
- [8] Tesmec, "OCPD002," 2024. [Online]. Available: <https://www.tesmec.com/railway/products/diagnostic-solutions/ocpd002-rail-diagnostic-vehicle> [Accessed January 28, 2024]
- [9] M. V. Taciroğlu, M. Kardeşahin, M. Tığdemir, H. Işıker, "Demiryolu Hat Geometrisinin Fraktal Analizi," *Demiryolu Mühendisliği.*, vol. 16, pp. 170-184, Temmuz 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1130088
- [10] Á. Vinkó, T. Simonek, C. Ágh, A. Csikós, B. Figura, "Feasibility of Onboard Smartphones for Railway Track Geometry Estimation: Sensing Capabilities and Characterization", *P. Pol. Civ. En.*, vol. 67, pp. 200-210, 2022
- [11] F. Seraj, N. Meratnia, P. J. M. Havinga, "RoVi: Continuous transport infrastructure monitoring framework for preventive maintenance," in *PerCom*, Kona, HI, USA, 2017, pp. 217-226
- [12] A. Rodríguez, R. Sanudo, M. Miranda, A. Gomez, J. Benavente, "Smartphones and tablets applications in railways, ride comfort and track quality: Transition zones analysis," *Measurement*, vol: 182, ID: 109644, 2021
- [13] J. Cong, M. Gao, Y. Wang, R. Chen, P. Wang, "Subway rail transit monitoring by built-in sensor platform of smartphone," *Frontiers of Inf. Technology & Electronic Engineering*, vol. 21 (8), pp. 1226-1238, 2020
- [14] E. Simonyi, Z. Fazekas, P. Gaspar, "Smartphone application for assessing various aspects of urban public transport," *Transportation Research Procedia*, vol. 3, pp. 185-194, 2014
- [15] A. Azzoug, S. Kaewunruen, "RideComfort: A Development of Crowdsourcing Smartphones in Measuring Train Ride Quality," *Frontiers in Built Environment*, vol: 3 (3), pp. 1-12, 2017
- [16] A. Paixao, E. Fortunato, R. Calçada, "Smartphone's Sensing Capabilities for On-Board Railway Track Monitoring: Structural Performance and Geometrical Degradation Assessment," *Advances in Civil Engineering*, vol: 2019, ID: 1729153, 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/1729153>
- [17] H. T. Aung, K. Inoue, S. H. Pha, W. Takeuchi, "Condition Monitoring of Yangon Circular Railway and Yangon-Mandalay Railway Based on Car-Body Acceleration Response Using a Portable Device," *Journal of Disaster Research*, Vol. 15 (3), 2020
- [18] Geardo, "Xiaomi Redmi Note 10 Pro Teardown | Screen Replacement," 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=3CIvc4B8SY> [Accessed January 28, 2024]
- [19] Phyphox, "Awards," 2024. [Online]. Available: <https://phyphox.org/> [Accessed January 28, 2024]
- [20] Phyphox, "Phyphox Sensor Database," 2024. [Online]. Available: <https://phyphox.org/sensordb/> [Accessed January 28, 2024]

- [21] Wikipedia, “Konya tramvayı,” 2024. [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Konya_tramvay%C4%B1#cite_note-urbanrail-1 [Accessed January 28, 2024]
- [22] Railway Gazette International, “Škoda Transportation wins Konya tram contract,” 2013. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/koda-transportation-wins-konya-tram-contract/37820.article> [Accessed January 28, 2024]
- [23] Wikipedia, “Škoda 28 T,” 2024. [Online]. Available: https://en.m.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_28_T [Accessed January 28, 2024]
- [24] Railway Gazette International, “Konya orders trams for catenary-free operation,” 2014. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/konya-orders-trams-for-catenary-free-operation/39481.article> [Accessed January 28, 2024]

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD’de geçen 16 yıllık hizmeti akabinde, Süleyman Demirel Üniversitesinde Dr. Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Demiryollarında seyir hâlinde ölçüm sistemleri ve milli demiryolu traversleri geliştirilmesi konulu araştırmaları devam etmektedir.
E-Posta: cecenferhat@sdu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.