

**Mobil Cihaz Tabanlı Atalet Ölçümleriyle Demiryolu Kurp Tespiti ve Yarıçap Belirleme**

Ferhat ÇEÇEN^{*1}, Erdal MELEMEZ², Bekir AKTAŞ³, Recep Koray KIYILDI⁴, Mehmet SALTAN⁵

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Isparta, Türkiye

² TCDD Bakım Dairesi Başk., 62 YBO Müdürlüğü, 621 Yol Bakım Onarım Şefliği, Adana, Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

⁴ Ömer Halis Demir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye

⁵ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

*cecenferhat@sdu.edu.tr

(Alınış/Received: 15.05.2025, Kabul/Accepted: 21.06.2025, Yayımlama/Published: 31.07.2025)

Öz: Bu çalışmada, taşınabilir cihazlar aracılığıyla demiryolu hatlarında kurp yarıçapının belirlenmesine yönelik düşük maliyetli ve pratik bir yöntem geliştirilmiştir. GNSS ve jiroskop verileri, mobil cihaz sensörlerinden zaman senkronlu olarak toplanmış ve Python ortamında analiz edilmiştir. Ölçümler, Adana Beledemik–Pozantı hattında bir drezin ve bir yolcu treni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zaman uyumsuzluğu nedeniyle GNSS ve açısal hız verileri interpolasyon yoluyla senkronize edilmiş; Z eksenine ait açısal hız ve hız verileri kullanılarak kurp yarıçapları hesaplanmıştır. Veriler, farklı alçak geçiren filtre (AG) kesim frekanslarıyla işlenmiş ve bu parametrelerin ölçüm doğruluğu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. En uygun sonuçlar, drezin için 0,2 Hz ve yolcu treni için 0,4 Hz frekanslarında elde edilmiştir. Yirmi farklı kurpta yapılan analizlerde, referans ölçümlere göre ortalama sapma drezin için %2,6; yolcu treni için %2,2 olarak hesaplanmıştır. En yüksek sapma %12,5'e ulaşırken, bazı kurplarda sapma %0,01 düzeyine kadar düşmüştür. Geçiş eğrisi ve gelişim uzunluğu sınırlı olan kurplarda, mobil cihaz verileri ile referans ölçümler arasında sapmaların nispeten arttığı; geçiş sürekliliği bulunan ve daha uzun geometrik gelişime sahip kurplarda ise daha yüksek düzeyde örtüşme sağlandığı gözlenmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin demiryolu hat geometrisinin gerçek zamanlı izlenmesinde düşük maliyetli, erişilebilir ve uygulanabilir bir teknik çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu geometrisi, Kurp yarıçapı, Mobil cihazlar, Python kodlama, Açısal hız

Railway Curve Detection and Radius Estimation Using Mobile Device-Based Inertial Measurements

Abstract: This study presents a low-cost and practical method for determining railway curve radii using portable sensor-equipped devices. Time-synchronized GNSS and gyroscope data were collected from mobile sensors and analyzed using Python. Measurements were conducted on the Adana Beledemik–Pozantı railway segment using both a track inspection vehicle and a passenger train. Due to differences in sampling rates, GNSS and angular velocity data were synchronized via interpolation, and curve radii were calculated using Z-axis angular velocity and speed data. The raw data were processed using various low-pass filter cutoff frequencies to assess their influence on measurement accuracy. The most accurate results were obtained at 0.2 Hz for the inspection vehicle and 0.4 Hz for the passenger train. Across 20 different curves, the average deviation from reference measurements was calculated as 2.6% for the inspection vehicle and 2.2% for the passenger train. While the highest deviation reached 12.5%, some curves yielded deviations as low as 0.01%. In curves with limited transition curves and development length, relatively higher deviations were observed between mobile device data and reference measurements; whereas in curves with continuous transitions and longer geometric development, a higher level of agreement was achieved. These findings demonstrate that the proposed method can serve as a cost-effective, accessible, and field-applicable solution for real-time monitoring of railway track geometry using mobile devices.

Keywords: Railway geometry, Curve radius, Portable devices, Python coding, Angular velocity

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, E. Melemez, B. Aktaş, R.K. Kıyıldı, M. Saltan “Mobil cihaz tabanlı atalet ölçümleriyle demiryolu kurp tespiti ve yarıçap belirleme,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 22, ss. 46-57, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1699940

1. Giriş

Demiryollarında yatay kurp (viraj) yarıçapının doğru şekilde belirlenmesi; güvenlik, bakım, konfor ve işletme ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır. Gereğinden küçük yarıçaplara sahip keskin kurplar, yüksek merkezkaç kuvvetleri ve tekerlek-ray etkileşimlerine yol açarak [1], ray ve tekerleklerde daha fazla aşınmaya neden olmaktadır [2]. Bu durum ise hem işletme maliyetlerini artırmakta hem de yolcu konforunu olumsuz etkilemektedir [3]. Öte yandan, kurp yarıçapları hattın ilk inşası sırasında optimum değerlerde tasarlanmış olsa bile, bu değerlerin zamanla korunması her zaman mümkün olmayabilmektedir. Özellikle balastlı hatlarda, uzun süreli tekrarlı yüklemeler ile termal genleşme ve büzülme yan al hat kaçmalarına neden olabilmektedir. Ayrıca, bakım ve revizyon işlemleri sonrasında da kurp geometrisinde proje değerlerinden sapmalar meydana gelebilmektedir. Günümüzdeki yüksek işletim kapasiteleri göz önüne alındığında, kurp yarıçaplarının periyodik ya da gerçek zamanlı olarak izlenmesi; güvenlik, bakım planlaması ve hız/değer optimizasyonu açısından kritik bir gereklilik hâline gelmiştir [4].

Demiryollarında kurp yarıçaplarının ölçülmesi veya belirlenmesi sırasında çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin başında, geleneksel fleş (Fransızca flèche), bir diğer deyişle versin (İngilizce versine) ölçümü gelmektedir. Bu yöntemde, belirli uzunlukta bir kiriş, kurptaki dış rayın iç tarafına yerleştirilmekte ve kirişin orta noktasının raydan olan uzaklığı ölçülmektedir [5]. Dairesel bir kurpta fleş değeri (f), kiriş uzunluğu (L) ve kurp yarıçapı (R) arasında yaklaşık olarak Denklem 1 ile verilen bir ilişki bulunmaktadır [6, 7]. Fleş yöntemiyle kurp yarıçapının belirlenmesi düşük ekipman gereksinimi açısından avantajlı olmakla birlikte; insan hatasına açıklığı, yoğun iş gücü gereksinimi ve ölçüm sırasında tren seferlerinin durdurulması gerekebileceği gibi önemli dezavantajlara da sahiptir [8].

$$f = \frac{L^2}{8R} \quad (1)$$

Bir diğer geleneksel yöntem ise jeodezik ölçümlerdir. Bu yöntemde, teodolit veya total station gibi cihazlar kullanılarak kurp boyunca defleksiyon açıları ve mesafe ölçümleri yapılmakta, ardından kurp yarıçapı hesaplanmaktadır. Günümüzde bu tür ölçümler, Amberg GRP1000 veya Trimble GEDO gibi otomatik sistemlerle milimetrik hassasiyette gerçekleştirilebilmekte olup, pek çok kuruluş tarafından mutlak referans yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajı yüksek doğruluk düzeyidir; ancak uygulamada yüksek maliyet, eğitilmiş personel gereksinimi, işlem süresinin uzunluğu ve tren trafiğinin durdurulma zorunluluğu gibi önemli sınırlamalar da bulunmaktadır [5, 8].

Demiryollarında kurp yarıçapı ölçümüne yönelik son yıllarda öne çıkan modern alternatiflerden biri, seyir halindeki trenler üzerinden yapılan ölçümlerdir. Bu ölçümler temelde iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki, GNSS (Global Navigation Satellite System – Küresel Konumlama Uydu Sistemi) tabanlı analizlerdir. Bu yöntemde, trenin güzergâhı boyunca elde edilen ardışık konum koordinatlarından eğrilik türevlenmekte ve her nokta için kurp yarıçapı hesaplanmaktadır. İkinci yöntem ise IMU (Inertial Measurement Unit – Ataletsel Ölçüm Birimi) tabanlıdır. Bu yöntemde, tren gövdesine entegre edilen jiroskoplardan alınan açısal hız verileri ile hız ölçümleri birlikte değerlendirilerek gerçek zamanlı yarıçap hesaplaması yapılmaktadır [7]. Literatürde bu iki yöntem hem deneysel hem de simülasyon temelli çalışmalarla karşılaştırılmıştır [9]. Özellikle karmaşık hat kesimlerinde, gyro tabanlı yöntemin daha kararlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir; söz konusu çalışmada bu iki yöntem arasındaki maksimum fark %13,7 olarak rapor edilmiştir.

Son dönemde, kişisel taşınabilir cihazların (akıllı telefonlar ve tabletler), ray kırığı gibi önemli hat kusurlarının ya da kurp yarıçapı gibi geometrik parametrelerin ölçümünde kullanılıp kullanılamayacağına yönelik çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [10]. Örneğin, Macaristan'da

Samsung Galaxy S serisi akıllı telefonlar (Galaxy S6 – 200 Hz ve Galaxy S10 – 500 Hz örnekleme hızlarıyla), resmi Hat Ölçüm Treni (Track Recording Vehicle) üzerine yerleştirilerek demiryolu hat geometrisi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Budapeşte–Esztergom hattı üzerindeki Pilisvörösvár İstasyonu yakınında bulunan iki kısa yarıçaplı kurpta uygulanmıştır. Telefonların jiroskop verileri, 0.005–2 Hz frekans aralığında bir Cauer (eliptik) bant geçiren filtre ile işlenmiş; bu verilerden elde edilen kurp yarıçapları ile referans ölçümler arasında %0,8 ila %4,3 arasında değişen sapmalar rapor edilmiştir [11]. Elde edilen sonuçlar, bu mobil cihazların düşük maliyetli ve yaygın erişilebilir olmaları sayesinde raylı sistemlerde yardımcı tanılama araçları olarak önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir [11]. Özellikle gerçek zamanlı işleme yeteneklerinin ön plana çıktığı bu uygulamalarda; sensör kalibrasyonu, cihaz modeli farklılıkları ve GPS sinyal zayıflığı gibi etkenler ölçüm tutarlılığını ve tekrarlanabilirliğini etkilemektedir. Ancak literatürde bu sorunlara yönelik çeşitli iyileştirme önerileri sunulmakta olup, yeni çözümler geliştirilmeye devam edilmektedir [12].

Bu çalışmada, akıllı taşınabilir cihazlarla toplanan veriler standart bir analiz sürecine tabi tutularak demiryolu hatlarında kurp yarıçapının belirlenmesine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Türkçe demiryolu literatüründe bu konudaki ilk uygulamalardan biri olma niteliği taşıyan çalışmada, Python tabanlı bir algoritma kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem, hem mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek nitelikte sonuçlar üretmekte hem de ileride yapılacak araştırmalar için bir temel teşkil etmektedir.

2. Metot

Bu çalışmada veri toplama sürecinde, iOS işletim sistemine sahip ve çift frekanslı (dual frequency) hassas nokta konumlandırma özellikli GNSS çipi barındıran bir iPhone 14 Pro cihazı kullanılmıştır. Sensör verilerinin zaman senkronlu biçimde kaydedilmesini sağlayan ve RWTH Aachen Üniversitesi tarafından geliştirilen açık kaynaklı Phyphox uygulaması [10] ölçüm aracı olarak tercih edilmiştir. Uygulama ayarlarında örnekleme frekansı, cihazın desteklediği en yüksek düzeyde veri toplanmasını sağlamak amacıyla “0” değeri girilerek yapılandırılmıştır. Bu konfigürasyonla, jiroskop sensörü saniyede yaklaşık 100 örnek (100 Hz), GNSS çipi ise saniyede bir örnek (1 Hz) konum ve hız verisi sağlamaktadır. Ölçümler, Adana Belediyek ve Pozantı İstasyonları arasında; TCDD Pozantı 621 Yol Bakım Onarım Şefliği envanterinde kayıtlı bir oto drezin ile ve aynı hat kesiminde seyir halindeki Erciyes Ekspresi yolcu treni ile gerçekleştirilmiştir. Mobil cihaz, Şekil 1’de görüldüğü üzere, oto drezinde kontrol panelinin pencereye yakın bir konumuna; yolcu treninde ise 1. vagonun 12 numaralı koltuğunda, pencere kenarındaki kol dayanağı üzerine sabitlenmiştir. Sabitleme işlemi, titreşimleri absorbe etmeyen ve kolay uygulanabilen bir yapıştırıcı kullanılarak yapılmıştır. İki farklı demiryolu taşıtıyla veri toplanmasının amacı, farklı süspansiyon sistemlerinin (oto drezin: klasik makaslı süspansiyon; yolcu treni: pnömatik veya helezon yaylı modern sistemler) atalet verilerine ve hesaplanan kurp parametrelerine etkisini karşılaştırmak ve geliştirilen yazılımın tekrarlanabilirliğini değerlendirmektir.



Şekil 1. Ölçüm sırasında cihaz yerleşimi: oto drezin dış görünüşü, kontrol paneli üzerindeki konum ve yolcu trenindeki sabitleme

Ölçümler, 02.04.2025 tarihinde, yağmurlu ve yoğun bulut örtüsüne sahip bir günde gerçekleştirilmiştir; böylece GNSS verilerinin zorlu hava koşullarındaki performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen iki veri seti, aynı analiz parametreleriyle Python ortamında, Jupyter Notebook arayüzü kullanılarak işlenmiş; kurplar otomatik olarak belirlenmiş ve açılal hız-zaman grafiklerinden yararlanılarak kurp yarıçapları hesaplanmıştır. İzleyen alt bölümlerde, geliştirilen kod yapısının işleyişine ilişkin teknik ayrıntılara yer verilmiştir.

2.1. Mobil cihaz montaj açısı telafisi

Mobil cihazın demiryolu düzlemine tam dik (ray düzlemiyle ortonormal) şekilde monte edilmemesi, ivme ve jiroskop verilerinde yönse hatalara yol açmaktadır. Ancak ölçüm alınan taşıtlar bu tür cihazlarla veri toplamak amacıyla tasarlanmadığı için, mobil cihazların ray düzlemine tam dik yerleştirilmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu durum özellikle yanıl ivme ve açılal hız ölçümlerinde fiziksel gerçeklikten sapmalara neden olabilmekte; dolayısıyla bu verilerin global koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir.

Hazırlanan kod yapısı, veri kaydının ilk 5 saniyesindeki ölçümleri analiz ederek trenin hareketsiz olduğunu doğrulamakta ($\text{hız} < 0.5 \text{ m/s}$ ve ≥ 20 örnek koşuluyla), bu aralıktaki ortalama ivme vektörünü yerçekimi yönü olarak kabul etmektedir. Elde edilen bu vektör, dünya koordinat sisteminde $[0, 0, 1]$ yönü ile hizalanmakta ve jiroskop verilerine bu doğrultuda bir dönüş matrisi uygulanmaktadır. Bu yöntem, literatürde özellikle giyilebilir sensörler ve atalet navigasyonu çalışmalarında yaygın olarak kullanılmakta olup [13], mobil cihaz tabanlı demiryolu hat geometrisi ölçümlerinde ise ilk kez bu çalışmada uygulanmıştır. Montaj açısına bağlı hataların doğru biçimde telafi edilebilmesi için, veri kaydı tren hareket etmeden en az 5 saniye önce başlatılmıştır.

2.2. Jiroskop kalibrasyonu

Literatürde de vurgulandığı üzere, özellikle uzun süreli açılal hız ölçümlerinde sıfır kayması (bias) ve çarpan hataları (scale factor errors) meydana gelebilmektedir [9]. Bu nedenle, kurp yarıçapı hesaplamalarında kullanılan jiroskop verilerinin bu tür sistematik hatalardan arındırılması kritik öneme sahiptir. Aksi takdirde, açılal hızlar yanlış tahmin edilecek ve kurp tespiti sağlıklı şekilde gerçekleştirilemeyecektir. Bu çalışmada, Z eksenine ait açılal hız verisinde (gyro_z) bias düzeltilmesi uygulanmıştır. Bu işlem için, trenin düşük hızda ve düz hat boyunca ilerlediği anlara ait veriler arasından ($|\text{gyro_z}| < 0.002 \text{ rad/s}$, $\text{hız} < 3 \text{ m/s}$) ortanca değeri alınmakta ve bu değeri bias olarak tüm verilerden çıkarılmaktadır. Çarpan düzeltilmesi için ise, GNSS tabanlı yön bilgisi (direction) 0.2 Hz kesim frekanslı bir alçak geçiren filtre ile süzölmekte, ardından faz sarma düzeltilmesi (unwrap) uygulanmakta ve türev alınarak GNSS yönelme hızı (yaw_rate) elde edilmektedir. Bu veri ile jiroskop verileri doğrusal regresyon analizine tabi tutularak bir ölçek çarpanı hesaplanmaktadır. Söz konusu yöntem; mobil robotlar, taşıt dinamiği ve atalet navigasyonu çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmakta olup, bu tür bir kalibrasyon ilk olarak Foxlin (1996) tarafından önerilmiştir [14].

2.3. Kurp tespiti

Hazırlanan kod yapısı, Z eksenine ait açılal hız verisini (gyro_z) analiz ederek, bu verideki değışimlere dayanarak kurp bölgelerini zaman serisi içerisinde otomatik olarak tespit etmektedir. Analiz sürecinde, açılal hız verisine düşük geçişli bir filtre uygulanmakta ve bu amaçla çeşitli kesim frekansları denenerek en tutarlı sonuçları veren değeri tercih edilmiştir. Filtrelenmiş sinyal üzerinden, ilk olarak 0.020 rad/s'lik yüksek bir eşik değeri kullanılarak ön segmentler belirlenmekte; ardından bu segmentler, 0.0005 rad/s'lik düşük eşik değeriyle genişletilmektedir. Eşik değeri, çeşitli ön denemeler sonucunda bu çalışmanın veri yapısına özgü olarak belirlenmiş olup, farklı cihaz veya ölçüm koşulları için benzer ön analizlerle kolaylıkla

güncellenebilir. Bu tür sinyal tabanlı eğri tespiti yaklaşımı, literatürde araçların şerit değiştirme ve viraj alma analizlerinde de yaygın şekilde kullanılmaktadır [15].

2.4. Kurp yarıçapı hesaplamaları

Mobil cihazlarla toplanan ham GNSS verileri ile açısal hız verilerinin doğrudan senkronize edilmesi mümkün değildir. Bunun temel nedeni, en modern mobil cihazlarda dahi GNSS çiplerinin genellikle 1 Hz'in üzerinde veri sağlayamamasıdır. Buna karşılık, açısal hız verileri bu çalışmada olduğu gibi 100 Hz gibi yüksek bir örnekleme hızıyla elde edilmektedir. Bu nedenle, her iki veri türünün senkronize edilebilmesi için örnekleme hızlarının eşitlenmesi gerekmektedir. Bu noktada iki farklı yaklaşım mümkündür: açısal hız verilerinin örnekleme azaltma (down-sampling) yöntemiyle 1 Hz düzeyine düşürülmesi ya da GNSS verilerinin örnekleme artırma (up-sampling) yöntemiyle 100 Hz düzeyine çıkarılması. Bu çalışmada, veri kaybını önlemek amacıyla ikinci yöntem tercih edilmiştir.

Senkronize edilen GNSS hız verileri (m/s) ile Z eksenine ait açısal hız verileri (rad/s) kullanılarak kurp yarıçapları hesaplanmıştır. Kod yapısında, her bir kurp segmenti için en yüksek açısal hız değerinin mutlak değeri belirlenmekte; bu andaki GNSS hız verisi (v), Z eksen açısal hızının mutlak değerine ($|w_z|$) bölünerek kurp yarıçapı (R) otomatik olarak hesaplanmaktadır (Denklem 2 [16]).

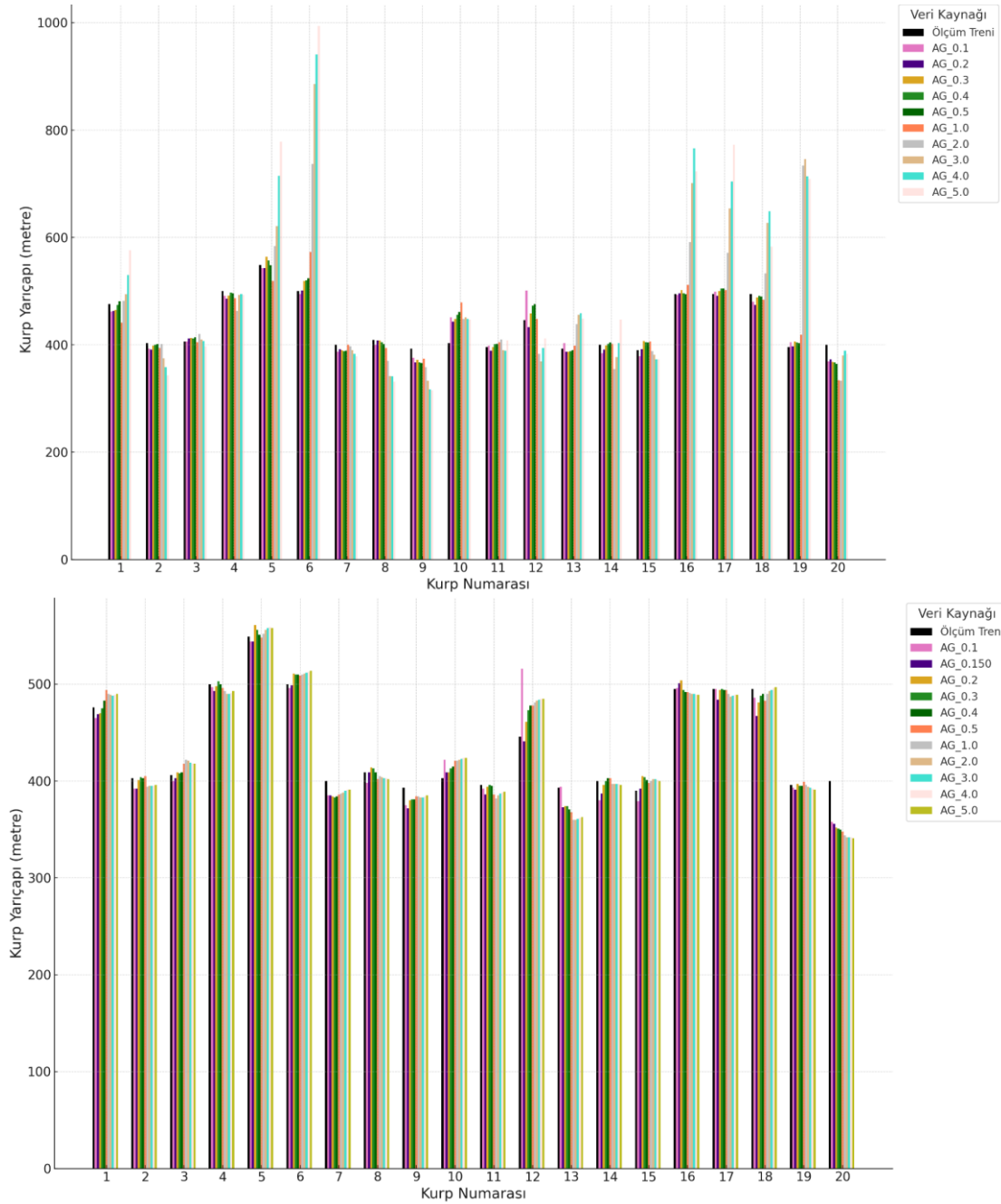
$$R = \frac{v}{|w_z|} \quad (2)$$

Geliştirilen hesaplama algoritması, Python ortamında Jupyter Notebook üzerinden iki farklı veri seti için uygulanmış ve elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca, TCDD envanterine kayıtlı bir ölçüm treninden aynı hat kesiminde elde edilen veriler referans alınarak doğrulama yapılmış; önerilen yöntemin doğruluğu ve sınırlılıkları ölçüm koşulları bağlamında tartışılmıştır.

3. Bulgular

Şekil 2'de, üstte oto drezine, altta ise yolcu trenine ait veriler üzerinde uygulanan farklı alçak geçiren (AG) filtre kesim frekansları değerlerine göre hesaplanan kurp yarıçapları sunulmaktadır. Uygulanan filtre frekansları 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 ve 5.0 Hz olmak üzere toplam 10 farklı değeri kapsamaktadır. Her bir AG değeri için hesaplanan kurp yarıçapları, ölçüm treni ile elde edilen referans yarıçaplarla karşılaştırılmış ve sonuçlar, her biri 20 kurba karşılık gelen sütun grafikler şeklinde, farklı renklerle görselleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, AG filtresinin doğru seçilmesinin kurp yarıçapı hesaplamalarının doğruluğu açısından kritik olduğunu göstermektedir. Filtre frekansı optimum aralıktan uzaklaştıkça, özellikle oto drezin verilerinde referans değerlerden sapma belirgin şekilde artmaktadır. Bu fark tüm kurplarda sabit olmayıp, kısa süreli yanal salınımların arttığı bazı eğrilerde daha yüksek sapmalar gözlemlenmektedir.

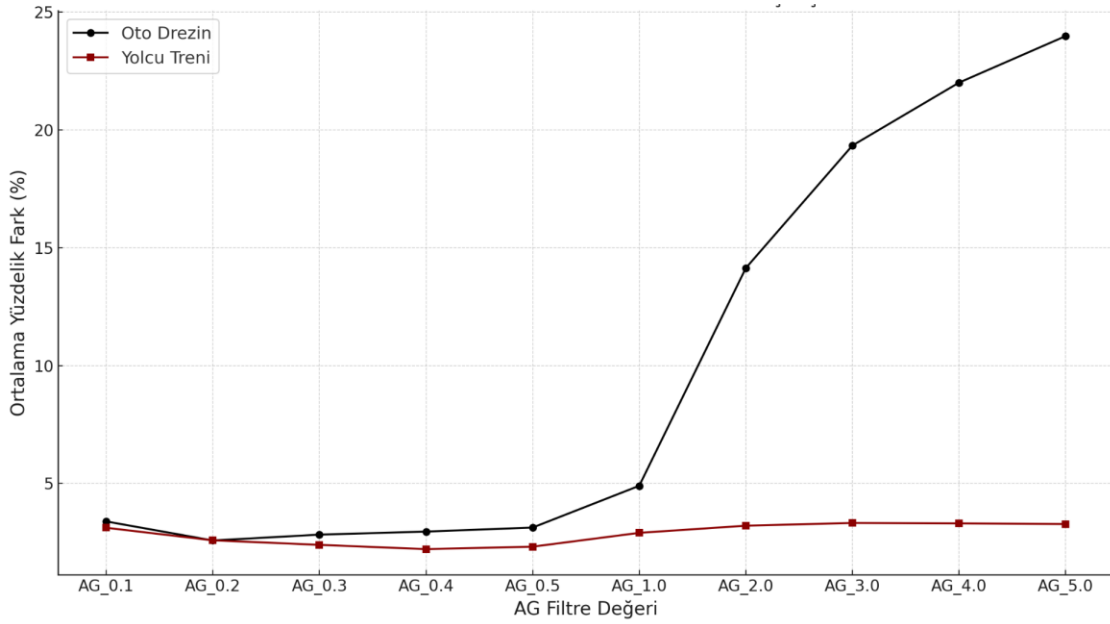
Şekil 3'te sunulan grafik, farklı alçak geçiren (AG) filtre kesim frekanslarının, her iki veri seti için hesaplanan kurp yarıçaplarının referans değerlerden ortalama yüzdelik farkı üzerindeki etkisini göstermektedir. Yüksek AG frekanslarında, özellikle oto drezin verilerinde hata oranı belirgin şekilde artmakta; 5 Hz'lik AG filtresi kullanıldığında yaklaşık %25 oranında sapma meydana gelmektedir. Bu durumun temel nedeni, oto drezinin yolcu trenlerine kıyasla daha düşük sönümlenme kapasitesine sahip aks sistemidir. Ancak uygun bir AG frekansının seçilmesiyle bu fark büyük ölçüde azaltılabilmekte ve yolcu trenine benzer doğrulukta sonuçlar elde edilebilmektedir. Her iki taşıt için minimum ortalama sapmayı sağlayan AG değerleri yakın olmakla birlikte, oto drezin için bu değer 0.2 Hz, yolcu treni için ise 0.4 Hz olarak belirlenmiştir.



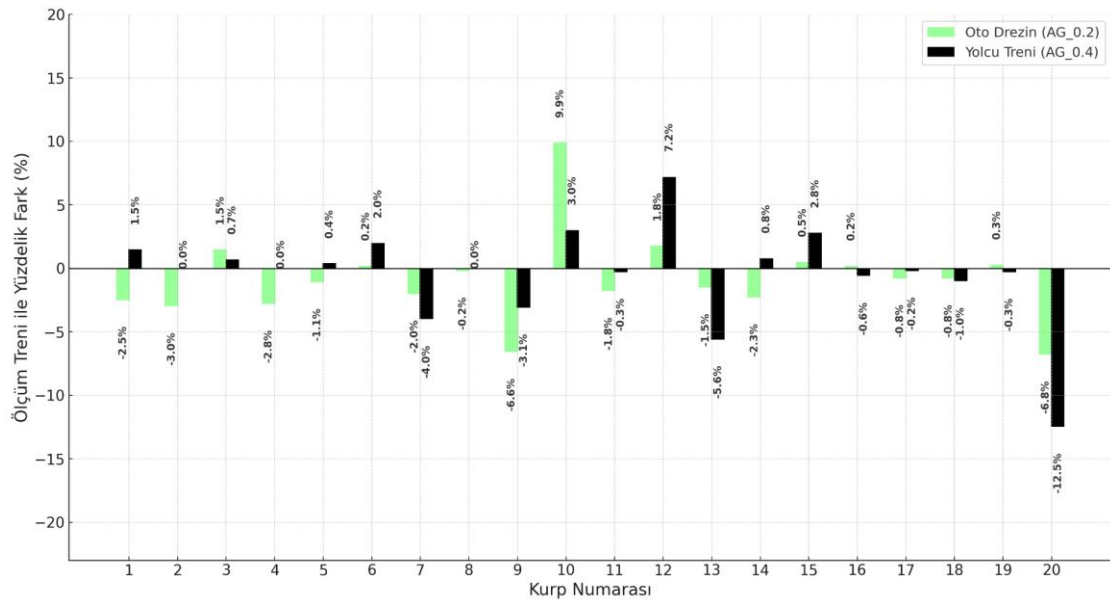
Şekil 2. Farklı alçak geçiren filtre kesim frekansları ile hesaplanan kurp yarıçaplarının karşılaştırılması (üst: oto drezin, alt yolcu treni verileri kullanılarak hazırlanmıştır)

Dikkat çeken bir diğer bulgu ise, her iki veri setinde de belirli bir optimum AG frekansının altına veya üstüne çıkıldığında sapma oranlarının yeniden artmasıdır. Bu durum, çok düşük AG frekanslarının da hatayı artırabileceğini göstermektedir. Nitekim 0.1 Hz'lik AG filtresi her iki veri setinde de sapma oranını artırmıştır. Yapılan bu ön analizler doğrultusunda, oto drezin verilerinin 0.2 Hz, yolcu treni verilerinin ise 0.4 Hz AG filtresi ile işlenmesinin, gerçek değerlere daha yakın sonuçlar ürettiği tespit edilmiş ve ilgili Python kod yapıları bu doğrultuda güncellenmiştir. Şekil 4'te sunulan grafik, filtreleme işleminde belirlenen optimum AG frekansları kullanılarak elde edilen kurp yarıçapı değerlerinin, kurplar bazında referans değerlere göre sapmalarını görselleştirmek amacıyla hazırlanmıştır. Grafik, her bir kurptaki sapma düzeylerinin önemli ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bazı kurplarda yolcu treni verileri daha düşük

sapma üretirken, bazı kurplarda oto drezin verileri daha isabetli sonuçlar sağlamıştır. Bununla birlikte, birkaç karp dışında tüm sapmalar %6–7 aralığının altında kalmıştır.



Şekil 3. Farklı AG filtre frekanslarında ortalama karp yarıçapı sapmalarının karşılaştırılması



Şekil 4. Kurplar bazında referansla karşılaştırılan karp yarıçapı sapmaları (filtrelenmiş verilerle)

Tüm kurplar ortalaması alındığında, oto drezinle ölçülen karp yarıçaplarının referans değerlere göre ortalama %2,6, yolcu treni ile ise %2,2 oranında sapma gösterdiği hesaplanmıştır. Bazı kurplarda sapma oranı %0'a yakın çıkmış, örneğin 16. kurpta her iki taşıtta da en düşük sapma elde edilirken; en yüksek sapma 10. kurpta gözlemlenmiştir. İlgili kurpların harita üzerindeki konumları, geliştirilen Python kodu aracılığıyla otomatik olarak oluşturulmuş ve Şekil 5'te sunulmuştur. Ayrıca, bu kurplara ait ayrıntılı açısal hız–zaman grafiklerine, oto drezin ve yolcu treni verilerine karşılık gelen versiyonlarıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de yer verilmiştir.

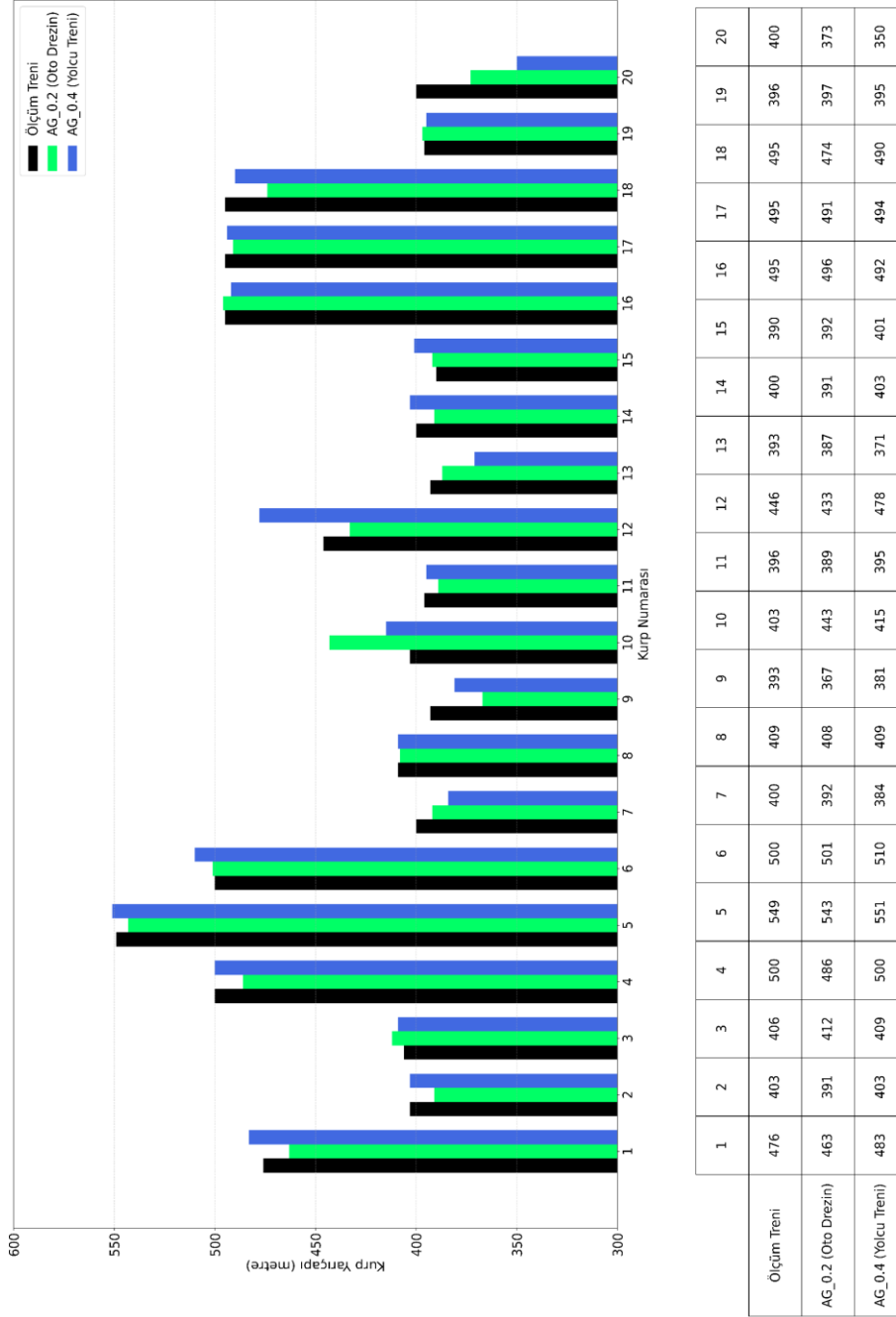
elde edilen 16. kurpta ise, geçiş eğrisi sürekliliği ve yeterli gelişim uzunluğu sayesinde mobil cihaz tabanlı hesaplamalar ile referans veriler arasında yüksek düzeyde örtüşme sağlandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, mobil ölçüm yöntemiyle yalnızca kurp yarıçapı bilgisinin değil, aynı zamanda geçiş eğrilerinin varlığı, düzgünlük ve geometrik süreklilik gibi kurp karakteristiklerinin de saniye düzeyinde izlenebildiğini ortaya koymaktadır. Bu da yöntemin hat geometrisine ilişkin daha kapsamlı bir analiz olanağı sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Şekil 8’de, ölçüm treni ile en iyi uyumu sağlayan alçak geçiren filtre kesim frekansları uygulanmış veri setleri kullanılarak hesaplanan kurp yarıçapları referans değerlerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu kapsamda, oto drezin verileri 0.2 Hz, yolcu treni verileri ise 0.4 Hz’lik alçak geçiren filtre kesim frekansı ile işlenmiş; her iki veri seti için elde edilen kurp yarıçapları, referans ölçüm treni verileriyle bar grafikler biçiminde görselleştirilmiştir. Analiz edilen toplam 20 kurp verisine ilişkin sonuçlar göstermektedir ki, ön testler ile uygun analiz parametreleri belirlendiği takdirde, mobil cihazlarla yapılan kurp yarıçapı ölçümleri referans verilere oldukça yakın ve karşılaştırılabilir sonuçlar sunabilmektedir. Bu yönüyle yöntem, demiryolu hat geometrisinin izlenmesi ve değerlendirilmesinde tamamlayıcı nitelikte, ekonomik ve pratik bir ölçüm yaklaşımı sunmaktadır. Elde edilen sapma değerleri, literatürde modern GNSS ve IMU tabanlı sistemlerle kaydedilen %13,7’ye kadar ulaşan hata oranları [9] ve mobil cihazlarla yapılan önceki çalışmalarda bildirilen %0,8–%4,3 aralığındaki sapmalar [10] ile kıyaslandığında, başarılı bir doğruluk düzeyine işaret etmektedir. Bu çalışmada, tüm kurplar ortalaması alındığında, oto drezinle elde edilen kurp yarıçaplarının referans değerlere göre ortalama %2,6; yolcu treni verilerinde ise %2,2 oranında sapma gösterdiği hesaplanmıştır. Bazı kurplarda sapma oranı %0’a yaklaşırken, en yüksek sapma %12,5 olarak kaydedilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, mobil cihazlardan elde edilen atalet verileri (IMU) ve küresel konumlama sistemi (GNSS) ölçümleri, demiryolu kurplarının tespiti ve yarıçaplarının hesaplanmasında alternatif bir yöntem olarak kullanılmıştır. GNSS örnekleme hızının düşük olması nedeniyle, jiroskop verileriyle zaman senkronizasyonu sağlamak için interpolasyon tabanlı bir örnekleme artırma (up-sampling) tekniği uygulanmıştır. Z eksenine ait açısal hız verisi (gyro_z), düşük geçişli filtreleme (low-pass filtering) sonrasında değerlendirilmiştir; kurp segmentasyonu ise eşik tabanlı sinyal ayırtma algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Ardından, GNSS hız verisinin mutlak açısal hıza bölünmesiyle kurp yarıçapları gerçek zamanlı olarak tahmin edilmiştir. Veriler, Adana Belediyek-Pozantı demiryolu kesiminde, farklı süspansiyon sistemlerine sahip iki taşıt (drezin ve yolcu treni) kullanılarak toplanmış, Python programlama dili aracılığıyla Jupyter Notebook ortamında analiz edilmiştir. Alçak geçiren filtrenin kesim frekansı üzerine yapılan parametrik analizlerde, drezin verileri için en uygun frekans 0.2 Hz, yolcu treni için ise 0.4 Hz olarak belirlenmiştir. Bu değerler referans ölçüm treni verileriyle yapılan karşılaştırmalarla doğrulanmıştır. Yirmi farklı kurpta gerçekleştirilen analizler sonucunda, ortalama sapma oranı drezin verisinde %2,6; yolcu treninde ise %2,2 olarak hesaplanmıştır. Kurpların büyük çoğunluğunda sapma oranları %6’nın altında kalmıştır. Ancak, geçiş eğrisi (transition curve) ve gelişim uzunluğu (curve development length) kısa olan kurplarda, mobil cihaz tabanlı hesaplamalarda hata oranlarının nispeten arttığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, geçiş eğrisi uzunluğu ve gelişim mesafesi daha yüksek olan kurplarda, mobil cihaz verilerinin referans sistemlerle daha yüksek düzeyde örtüştüğü belirlenmiştir. Ayrıca açısal hız-zaman grafikleri üzerinden, yalnızca yarıçap değil, aynı zamanda geçiş eğrisi varlığı, yön değişim karakteristiği ve kurp profili sürekliliği gibi geometrik detaylara da erişilebilmiştir. Elde edilen bulgular, taşınabilir cihazlarla gerçekleştirilen bu yöntemin, demiryolu hat geometrisinin düşük maliyetli, erişilebilir ve tren trafiğini aksatmadan, normal işletim koşulları altında uygulanmasına olanak tanıyan bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, sensör kalibrasyon gereksinimi ile sinyal zayıflamasının yaşandığı güzergâh kesimlerinde veri tutarlılığının azalması, yöntemin mevcut sınırlılıkları arasında yer almaktadır.

Gelecekte, daha yüksek frekanslı GNSS modülleri, çok eksenli filtreleme algoritmaları, eğri tespiti için makine öğrenmesi temelli sınıflandırıcılar ve sensör füzyonuna dayalı sistemlerle bu yöntemin doğruluğu ve yaygınlığı artırılabilir. Ayrıca, mobil cihaz tabanlı gerçek zamanlı hat izleme uygulamalarının geliştirilmesiyle, bu tür düşük maliyetli çözümler sahada mühendislik kararlarını destekleyici bir bileşen haline gelebilecektir.



Şekil 8. Mobil cihaz verileriyle hesaplanan kırp yarıçaplarının referans değerlerle karşılaştırılması

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ile Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından 1001 – UDAP Programı kapsamında, 124M618 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, sağlanan bu değerli destek için ilgili kurumlara ve yetkililerine teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] W. M. Zhai ve K. Y. Wang, “Lateral interactions of trains and tracks on small-radius curves: Simulation and experiment,” *Vehicle Syst. Dyn.*, cilt 44, sayı Suppl. 1, ss. 520–530, 2006, doi: 10.1080/00423110600875260.
- [2] H. Li, J. Sun ve G. Zhao, “Research on rail wear of small radius curve in EMU depot,” *Railway Sci.*, sayı 1, ss. 16–39, 2022, doi: 10.1108/rs-04-2022-0014.
- [3] A. Çoşkun, “Demiryollarında geçiş eğrileri ve dever uygulamaları,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı 5, ss. 57–59, Haz. 2017.
- [4] C. Esveld, *Modern railway track*, 2. baskı. Zaltbommel, Hollanda: MRT-Productions, 2001.
- [5] Wikipedia, “Hallade method,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://en.wikipedia.org/wiki/Hallade_method. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2025.
- [6] PWayBlog, “The versine formulae,” 2016. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://pwayblog.com/2016/05/09/the-versine-formulae/>. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2025.
- [7] Trackopedia, “Versine measurement,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.trackopedia.com/en/encyclopedia/maintenance-of-way/track-measurements/versine-measurement>. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2025.
- [8] Q. Chen, X. Niu, L. Zuo, T. Zhang, F. Xiao, Y. Liu ve J. Liu, “A railway track geometry measuring trolley system based on aided INS,” *Sensors*, cilt 18, sayı 2, s. 538, Şub. 2018, doi: 10.3390/s18020538.
- [9] Y. Zhou, Y. Yang, Z. Ren ve M. Hecht, “Estimating railway track curvature using gyroscope and GPS sensors,” *Sci. Rep.*, cilt 15, makale no. 8037, 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91255-x>.
- [10] F. Çeçen, “Demiryollarında ray kırılmalarının, ani rijitlik değişimlerinin ve geometrik süreksizliklerin akıllı telefonlarla, seyir hâlinde ölçümler alınarak, sürekli takibi,” *Demiryolu Dergisi*, sayı 20, ss. 54–66, Tem. 2024, doi: 10.47072/demiryolu.1464183.
- [11] Á. Vinkó, T. Simonek, C. Ágh, A. Csikós ve B. Figura, “Feasibility of onboard smartphones for railway track geometry estimation: Sensing capabilities and characterization,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, cilt 67, sayı 1, ss. 200–210, 2023, doi: 10.3311/PPci.20187.
- [12] J. S. Wood ve S. Zhang, “Identification and calculation of horizontal curves for low-volume roadways using smartphone sensors,” *Transp. Res. Rec.*, cilt 2672, sayı 39, ss. 1–9, Nis. 2018, doi: 10.1177/0361198118759005.
- [13] A. M. Sabatini, “Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, cilt 53, sayı 7, ss. 1346–1356, Tem. 2006, doi: 10.1109/TBME.2006.875664.
- [14] E. Foxlin, “Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter,” in *Proc. Virtual Reality Annu. Int. Symp.*, Santa Clara, CA, USA, 1996, pp. 185–194.
- [15] C. Roberts vd., “Curve negotiation monitoring for railway vehicles using onboard inertial sensors,” *Vehicle Syst. Dyn.*, cilt 48, sayı S1, ss. 529–544, 2010.
- [16] J. Pombo vd., “Onboard measurement of railway vehicle dynamic behaviour,” *Measurement*, cilt 44, sayı 6, ss. 1044–1057, 2011.

Özgeçmiş

**Ferhat ÇEÇEN**

TCDD’de geçen 16 yıllık hizmeti akabinde, Süleyman Demirel Üniversitesinde Dr. Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Demiryollarında vibro-termal analizlerle yenilikçi çözümler geliştirilmesi, depreme dayanıklılığının artırılması ve milli demiryolu traversleri geliştirilmesi konulu araştırmaları devam etmektedir. E-Posta: cecenferhat@sdu.edu.tr

**Erdal MELEMEZ**

Meslek yaşamına 1999 yılında TCDD’de başlayan yazar, lisans eğitimini 2021 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2025 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Ulaştırma Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamış olup, halen TCDD Pozantı 62 Demiryolu Bakım Müdürlüğü’nde Yol Bakım Şefi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: erdalmelemez@tcdd.gov.tr

**Bekir AKTAŞ**

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde görev yapan yazarın, Ulaştırma mühendisliği, karayolu ve demiryolu üstyapısı ile ilgili çalışmaları bulunmaktadır. Akademik kariyeri boyunca birçok ulusal ve uluslararası bilimsel çalışma yapmış olup ayrıca tescillenmiş 2 adet patenti bulunmaktadır. Dirençli ve sürdürülebilir ulaştırma üstyapısı geliştirilmesi konularında araştırmaları devam etmektedir.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr

**Recep Koray KIYILDI**

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 1991 yılında mezun olmuş, yüksek lisans ve doktora derecelerini Süleyman Demirel Üniversitesi’nde sırasıyla 1996 ve 2005 yıllarında tamamlamıştır. 2010 yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı’nda öğretim üyesi olarak görev yapmakta; ulaştırma mühendisliği, trafik analizi ve altyapı performansı konularında çeşitli ulusal ve uluslararası çalışmalarda yer almaktadır.

E-Posta: rkoray@ohu.edu.tr

**Mehmet SALTAN**

1992 yılında Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun olan yazar, 1994 yılında başladığı akademik kariyeri boyunca ulaştırma ve yol mühendisliği alanlarında çok sayıda ulusal ve uluslararası çalışmaya imza atmıştır. Halihazırda Süleyman Demirel Üniversitesi Rektörü olarak görev yapan yazar, akademik yaşamı süresince birçok TÜBİTAK projesinde yer almış, mühendislik alanına önemli katkılar sunmuş ve çalışmalarına aktif olarak devam etmektedir.

E-Posta: mehmetsaltan@sdu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ferhat ÇEÇEN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Yazma – orijinal taslak hazırlama. Erdal MELEMEZ: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma – orijinal taslak hazırlama. Bekir AKTAŞ: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol. Recep Koray KIYILDI: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol. Mehmet SALTAN: Yazma – gözden geçirme ve düzenleme.