



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.

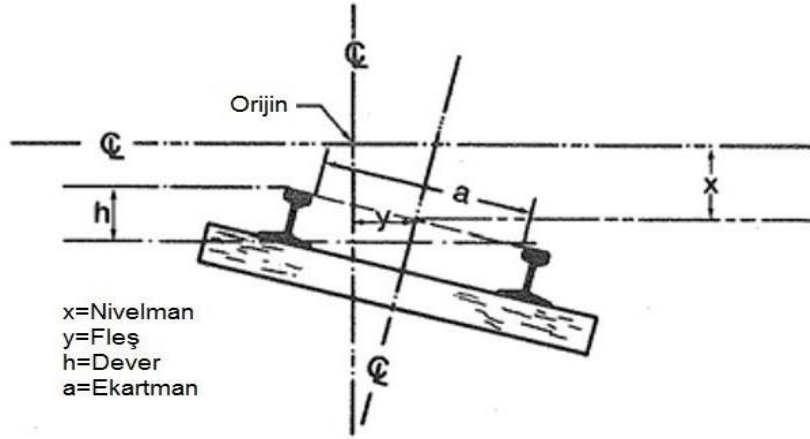
Keywords: Track geometry, Fractal analysis, Quality index, Roughness

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-araç 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 düzensiz ve dalgalı görünümünün nicelenmesine dayanan bu çalışmada, Hyslip düşey hat geometrisinin fraktal boyutlarını hesaplamıştır. Elde edilen sonuçlara göre fraktal analiz, hat geometrisi verilerinin düzensizliğini 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 düzensizliğini 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 düzensizlikleri grafikte daha görünür hale gelir ve farklı dalga boylarındaki düzensizlikler fark edilebilir. Karşılaştırmalı sonuçlara göre, demiryolu hattında görülen geometrik düzensizlikler önerilen fraktal boyut ile sayısal olarak ifade edilebilir.

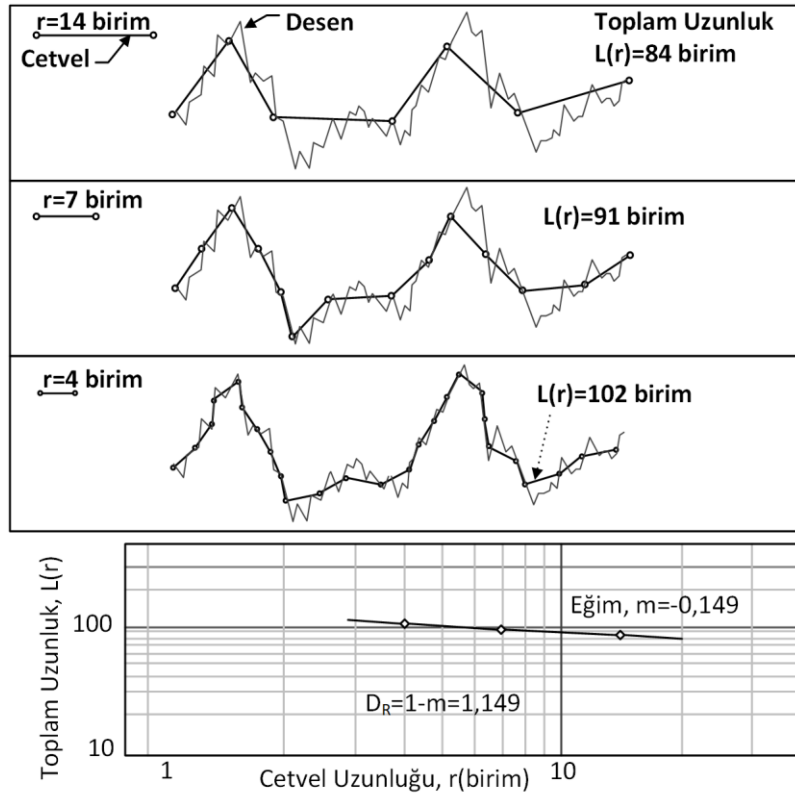
2. Metot

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 düzensizliğini ifade eden ondalıklı sayısal bir değerdir. Bir desenin fraktal boyutu, desenin düzensizlik 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]

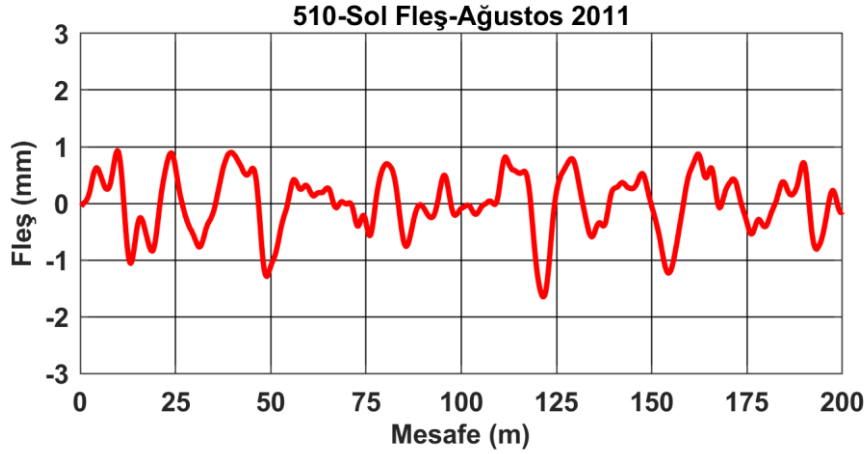
Gerçek fraktallar, ölçek ne kadar büyütülürse büyütülsün aynı örüntüyü gösteren ve bir fraktal boyutu olan kendine benzer yapılardır. Doğal fraktallar ise belirli bir sınır değer içinde benzer özelliklere sahip yapılardır. Doğal fraktal desenler büyütüldükçe, farklı desenler ortaya çıkar veya fark edilir 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.

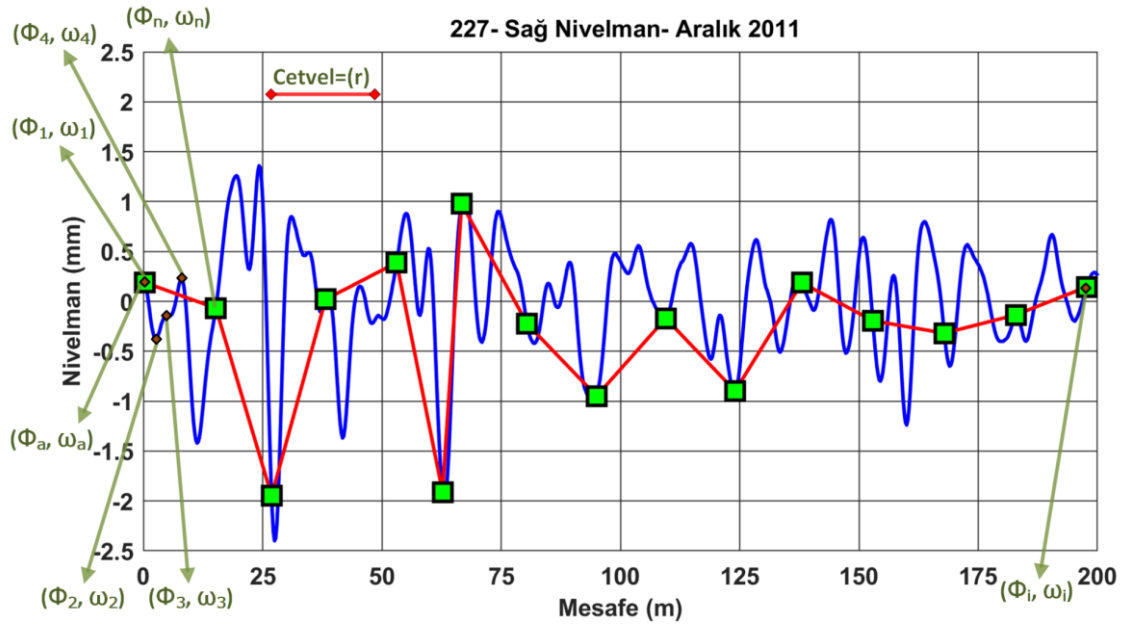
Hat geometrisi ölçüm verilerinin fraktal analizini yapmak için ilk olarak dikkate alınan alt kesime ait geometri grafiğinin çizilmesi gerekti. Her ne kadar ölçüm treninin yaptığı kontroller sonucunda hat geometrisi grafikleri çizilse de bu çalışmada yapılacak hesaplar için noktasal ölçüm verileri kullanılarak 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.

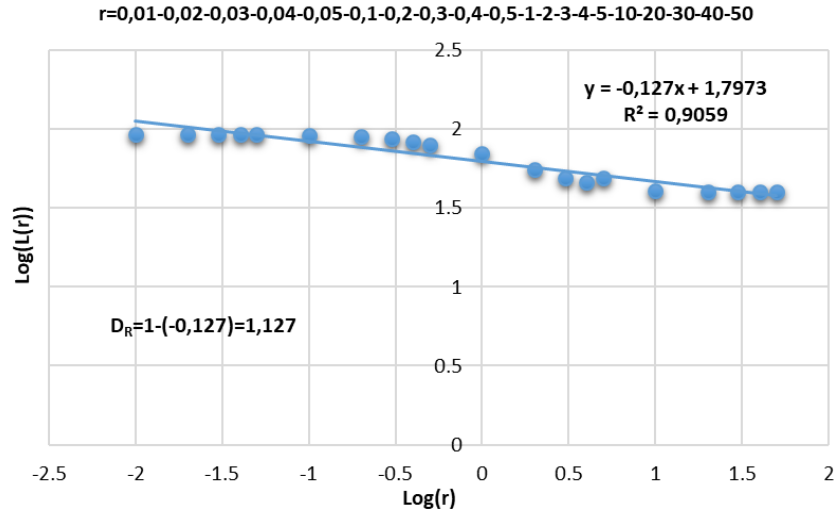
$$D_R = - \frac{\sum(\text{Log}_{10}(N)\text{Log}_{10}(L)) - (\sum \text{Log}_{10}(N) \sum \text{Log}_{10}(L))/J}{\sum(\text{Log}_{10}(L))^2 - (\sum(\text{Log}_{10}(L))^2)/J} \quad (10)$$

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

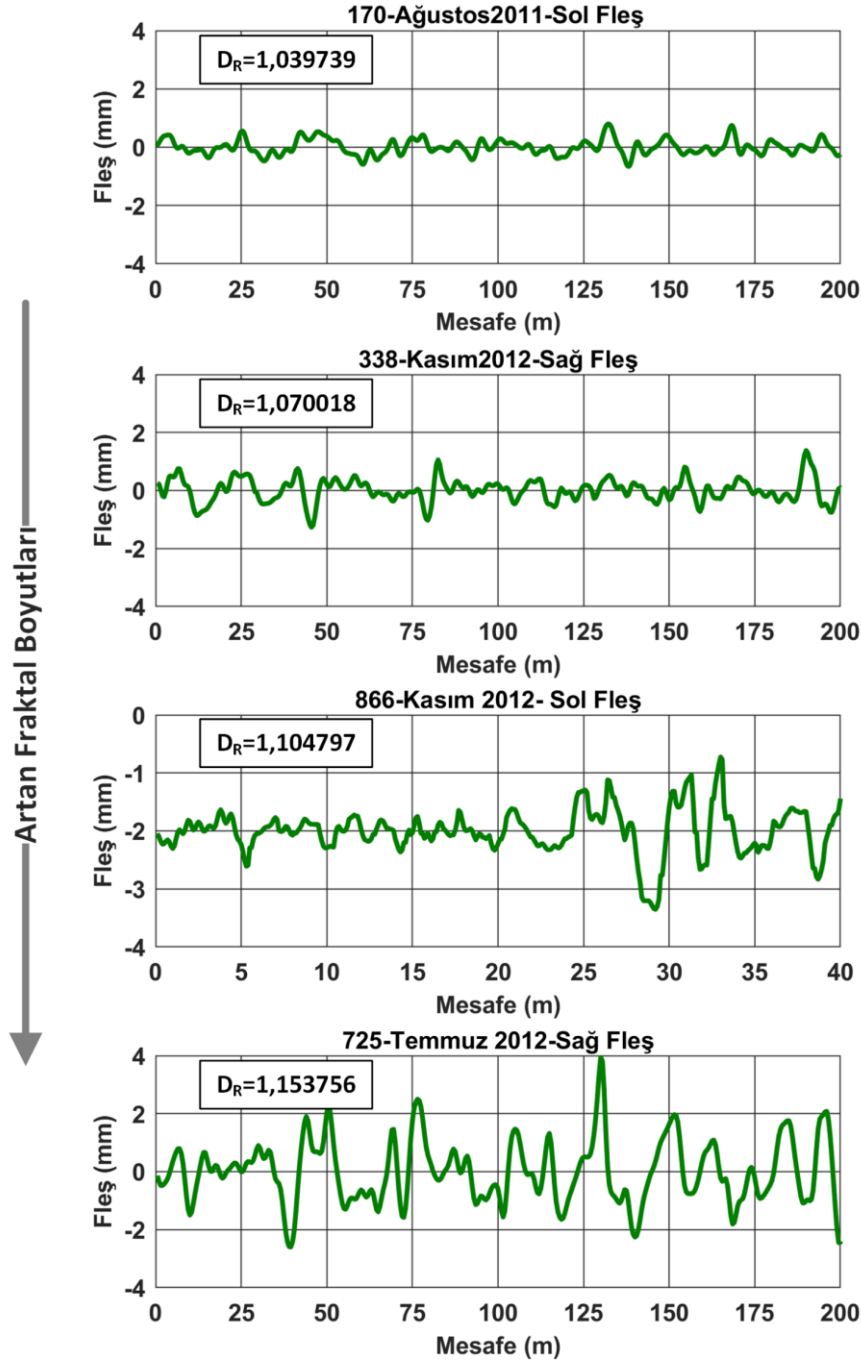
3. Bulgular

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 dizilerinde 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

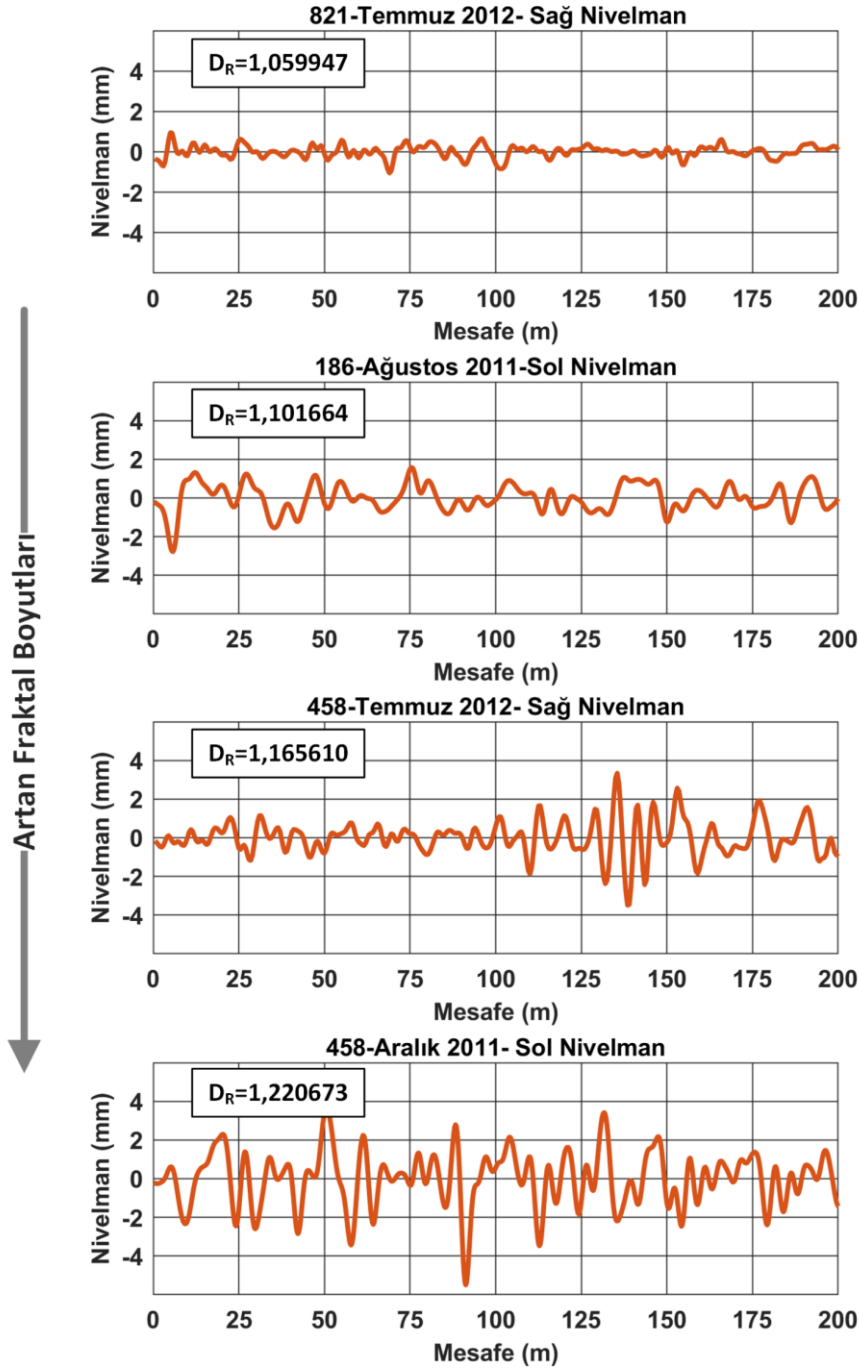
Şekil 6 fleş parametresi için fraktal boyutlar artış yönünde değiştikçe hat kesimi grafiklerinin nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi fraktal boyut büyüdükçe hat geometrisi deseni daha dalgalı, düzensüz bir hal almaktadır. Fraktal boyutların küçük değerleri için kısa boylu, 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.



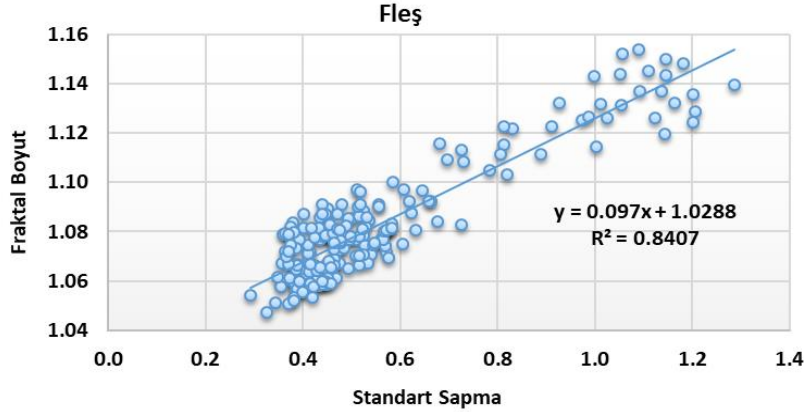
Şekil 7. Nivelman parametresi için artan fraktal boyutlarla hat geometrisi grafiklerinin değişimi

Şekil 7’de ki grafiklerde oluşan değişimlerde fleş grafiklerine benzer şekildedir. Fraktal boyut değerleri arttıkça oluşan geometri deseni daha düzensüz 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.

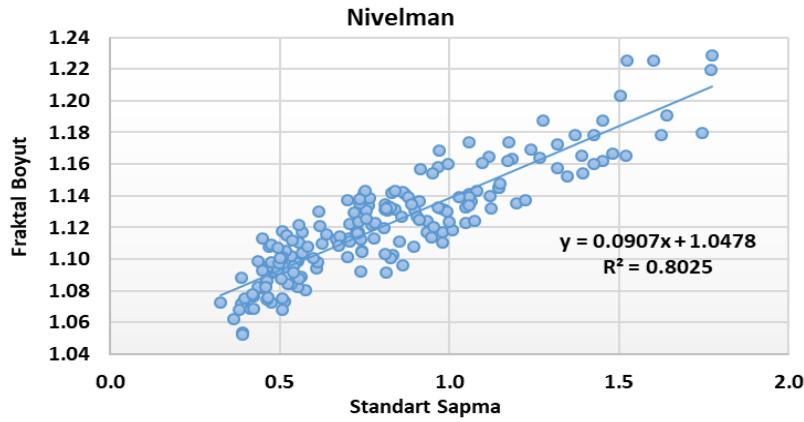
Hesaplanan Fraktal boyut ile demiryolu hat geometrisi grafiklerindeki geometri değişimlerinin oluşturduğu dalgaların boyları, genlikleri, oluşan dalgaların tepelerinin yuvarlaklığı ve geometri

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. Grabożyk, "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 KARASHAHİN

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 TACİROĞLU: 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.