



Demiryolu Taban Zemini Su İçeriğinin TDR Yöntemi ile Ölçümü için Dielektrik Karışım Modeli Yardımıyla Kalibrasyon Geliştirilmesi

Mehmet ÖZGÜR

ÇOMÜ, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

mehmetozgur@comu.edu.tr

(Alınış/Received: 26.09.2023, Kabul/Accepted: 15.11.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Demiryollarında hat performansını değerlendirmek için en sık başvuru parametrelerden birisi hat modülüdür. Altyapı ve üst yapı elemanlarından etkilenmekle birlikte hat modülü büyük oranda taban zemini esneklik modülüne bağlıdır. Esneklik modülü ise tüm zeminlerde su içeriğinin bir fonksiyonudur. Bu sebeple hat modülü yağış rejimine bağlı olarak mevsimsel farklılıklar gösterebilir. Bu durumun hat performansı değerlendirilirken göz önünde bulundurulabilmesi için taban zemini su içeriğinin periyodik ölçümleri yapılmalıdır. Zemin su içeriğinin ölçülmesi için kullanılan yöntemlerin başında etüvde kurutma gelmektedir. Taban zemininden örnek almanın zor olmasının yanı sıra deney prosedürünün 24 saat kurutmaya dayalı olması nedeniyle etüvde kurutma yavaş bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Alternatif olarak Zaman Tanım Alanında Yansıma Yöntemi (Time Domain Reflectometry, TDR), gerçek zamanlı ve uzaktan ölçüm alabilmeyi sağlayan bir elektromanyetik ölçüm yöntemidir. TDR ile ölçülen zeminin dielektrik iletkenliği ile kurulan kalibrasyon denklemi yardımıyla su içeriği belirlenir. Bu çalışmada taban zemini malzemesi olabilecek ve ince dane içeriği en fazla %15 olan 7 farklı zemin sınıfında yapılmış olan TDR ölçümleri literatürden elde edilmiştir. Kalibrasyon denklemi için diğer çalışmalardan farklı olarak regresyon yöntemleri yerine dielektrik karışım modeli kullanılmıştır. Önerilen kalibrasyon, sınama setinde seçilen performans göstergeleri ile değerlendirilmiştir. Yine diğer çalışmalardan farklı olarak bir zemin sınıfı yerine zemin grubuna özgü olan kalibrasyon, geniş bir su içeriği aralığında %2,0 hata bandında kalmak koşuluyla %93 tahmin başarısı sağlamıştır. Ayrıca tahmin hatası dağılımının yeterince dar ve sifra yakın merkezlenmiş olduğu görülmüştür. Bu bağlamda demiryolu hatlarında taban zemini su içeriğinin periyodik ölçümleri için Türkiye’de kullanımı son derece sınırlı olan TDR, yüksek doğruluk sağlayan hızlı bir ölçüm yöntemi olarak önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Hat modülü, Taban zemini, Su içeriği, TDR, Kalibrasyon

Calibration Development Based on Dielectric Mixture Model for Measurement of Subgrade Water Content with TDR Method

Abstract: One of the most frequently used parameters to evaluate track performance in railways is the track modulus. Although it is affected by substructure and superstructure elements, the track modulus mainly depends on the subgrade resilient modulus. The resilient modulus is a function of water content in all soils. Consequently, the track modulus may show seasonal variations depending on the rainfall regime. Periodic measurements of the subgrade water content should be made in order to consider this situation when evaluating track performance. Oven drying is one of the primary methods used to measure soil water content. In addition to the difficulty of taking samples from the subgrade, oven drying can be considered as time consuming since the procedure is based on 24-hour drying. Alternatively, Time Domain Reflectometry (TDR) is an electromagnetic measurement method that enables real-time and remote measurement. Water content is determined with the help of the calibration equation established with the dielectric permittivity of the soil measured by TDR. In this study, TDR measurements made on 7 different soil classes, which can be considered as subgrade material and whose fine content is maximum 15%, were obtained from the literature. For the calibration equation, unlike other studies, dielectric mixture model was used instead of regression methods. The proposed calibration was evaluated with the performance metrics selected in the test set. Again, unlike other studies, the calibration, which is specific to a soil group rather than a soil class, provided 93% prediction success within a wide water content range, provided that it remains within the 2.0% error band. Additionally, it was observed that the prediction error distribution was

Atıf için/Cite as: M. Özgür, “Demiryolu taban zemini su içeriğinin TDR yöntemi ile ölçümü için dielektrik karışım modeli yardımıyla kalibrasyon geliştirilmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 67-82, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1366737

adequately narrow and centered close to zero. In this context, TDR, whose use is extremely limited in Türkiye is recommended as a rapid method for periodic measurements of subgrade water content on railway tracks that provides high accuracy.

Keywords: Track modulus, Subgrade, Water content, TDR, Calibration

1. Giriş

Yeşil büyüme ve sürdürülebilir kalkınma iklim değişikliğinin sınırlandırılması amacıyla küresel ortak rota haline gelmiştir. Her iki kavram da ekonomik büyüme sağlanırken sera gazı salımının sınırlandırılması esasına dayanmaktadır. Sera gazı salımının sınırlandırılmaması halinde küresel ortalama yüzey sıcaklığında gözlemlenmesi beklenen artışın kuraklık, aşırı yağış, taşkın ve biyoçeşitliliğin kaybı gibi felaketlerin sıklığında bir artışı beraberinde getireceği konusunda görüş birliği söz konusudur. Küresel sera gazı salımının %15'i ulaştırma sektöründe gerçekleşmektedir. Bu oran içinde demiryolu taşımacılığının payı %0,4'tür [1]. Avrupa Birliği (AB) üye ülkelerinde 2014-2018 yılları arasında yolcu taşımacılığında demiryollarında ortalama salım 33,0 gCO₂/km olurken aynı değer karayolu ve havayolu için sırasıyla 143,0 ve 160,1 gCO₂/km olmuştur. Yine AB üye ülkelerinde 2019 yılında yolcu taşımacılığının %8'i ve yük taşımacılığının %17'si demiryolu ile gerçekleştirilirken, ulaştırma için kullanılan toplam enerjinin sadece %1,7'si demiryollarında tüketilmiştir [2].

Söz konusu istatistikler demiryolu taşımacılığının yeşil büyüme ve sürdürülebilir kalkınma açısından vazgeçilmez bir unsur haline geldiğini göstermektedir. Demiryolu taşımacılığı, iklim değişikliği üzerindeki daha az etkisine (diğer ulaşım biçimleriyle karşılaştırıldığında) ilaveten maliyet etkinliği, kısa seyahat süresi ve güvenlik gibi avantajları nedeniyle en etkileyici ulaşım araçlarından biridir [3]. Bu sebeple dünya genelinde demiryolu taşımacılığına yönelik sürekli artan bir talep söz konusudur. Bu durum yük taşımacılığında daha büyük teker yükü ve yolcu taşımacılığında daha yüksek hızları beraberinde getirmiştir [4]. Teker yükü ve hızın artması ile özellikle eski olup yeterli mühendislik hizmeti almamış hatlarda yıpranma ve stabilite sorunları nedeniyle yüksek bakım maliyetleri ile karşılaşmaktadır [5]. Avrupa genelinde yaklaşık 300.000 km'lik demiryolu hattının yenilenmesi ve bakımı için yıllık harcama 15 ile 25 milyar Avro arasında gerçekleşmektedir [6].

Yenileme ve bakım çalışmalarının uygun planlanması için demiryolu hatlarında mevcut performansın en doğru şekilde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple demiryolu hatlarında üstyapı ve altyapı elemanlarının durumunun belirlenmesine yönelik gözleme dayalı inceleme dışında çok sayıda tahribatlı ve tahribatsız inceleme yöntemi kullanılmaktadır. Altyapı elemanları için kullanılan tahribatlı yöntemler çeşitli penetrometre testleri ve inceleme sondajlarıdır. Bu yöntemlerde altyapının incelenen katmanında gerçekleştirilen penetrasyon ve delgi işlemleri katman yapısında hasara yol açarlar. Sismik yansıma ve kırılma, gravite yöntemi, manyetik yöntem, öz direnç yöntemi, sürekli yüzey dalgası yöntemi, elektromanyetik yöntem, yer radarı ve benzeri tahribatsız yöntemlerin ise en büyük avantajı ölçüm noktasında bir hasar oluşturmuyor olmalarıdır [7].

Hat performansını değerlendirmek üzere en sık başvurulan parametrelerden birisi hat modülüdür. Hat modülü teker yükü etkisinde hat temelinde gelişen reaksiyon kuvvetinin bir göstergesidir. Başka bir deyişle hat modülünün optimum düzeyin altında kalması rayda tekrarlı yükler altında daha fazla sehim olacağı anlamına gelir. Hat modülü farklı üstyapı ve altyapı elemanlarından etkileniyor olsa da taban zemini esneklik modülü en etkin faktördür. Zeminin elastik deformasyon yapabilme yeteneğinin bir ölçüsü olan esneklik modülü, zemin su içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde azalır. Yağış rejimine bağlı olarak hat boyunca taban zemini esneklik modülünde ve beraberinde hat modülünde mevsimsel farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Hat performansının değerlendirilmesinde bu durumu göz önünde bulundurabilmek için taban zemin malzemesinin

esneklik modülünün su içeriği ile ilişkisi ortaya çıkarılıp, hat boyunca taban zemini su içeriğinin periyodik olarak ölçülmesi uygun bir yaklaşım olacaktır.

Zeminlerin su içeriğinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerin içinde en yaygın bilinen ve en doğru sonucu veren etüvde kurutma (oven drying) yöntemidir. Sahadan alınan zemin örneği içinden hazırlanan numunelerin 24 saat boyunca bir etüvde kurutulması, ardından ıslak ve kuru numune kütlelerinin karşılaştırılması esasına dayanan yöntem yavaş ve emek yoğun bir prosedür olarak değerlendirilebilir [8]. Nötron saçılımı (neutron scattering) ve gama ışını azalımı (gamma ray attenuation) gibi radyoaktif yöntemler ise ancak uzman personelin gerçekleştirebileceği ve potansiyel sağlık problemleri barındıran yöntemlerdir [9]. Ayrıca söz konusu tahribatlı yöntemlerin mevcut demiryolu hatlarında erişimi pek mümkün olmayan taban zemininde kullanılması son derece güçtür. Bu yöntemlere alternatif olarak Zaman Tanım Alanında Yansıma Yöntemi (Time Domain Reflectometry, TDR) çok kanaldan gerçek zamanlı ve uzaktan ölçüm yapabilmeye olanaklarıyla demiryolu hatlarında taban zemininde su içeriğinin tahribatsız periyodik ölçümleri için büyük potansiyel barındırmaktadır [10]. Curioni vd. [11] TDR yöntemi ile tüm zemin tiplerinde su içeriği ve kuru yoğunluk gibi mühendislik parametrelerinin uygun bir kalibrasyonla elde edilebildiğini, böylelikle TDR yönteminin gerek tek başına gerekse diğer sığ jeofizik yöntemlerle birlikte kullanılması ile kritik jeoteknik yapıların çevresinde zemin koşullarının uzun dönemli izlenebilir olduğunu ifade etmiştir. TDR yönteminin demiryolu hatlarında kullanımı, yapısal katmanlarda su içeriğinin ölçülmesi ve balast kirlenmesinin belirlenmesi gibi son derece güncel konuları kapsamaktadır.

Pies ve Mocova [12] demiryolu hat yatağının farklı yapısal katmanlarında kullanılabilen iri daneli zeminlerde su içeriğinin belirlenmesi için TDR yöntemini kullanmıştır. Çalışmada kullanılan TDR cihazının ince daneli zeminler için önceden tanımlanmış kalibrasyonlar içermesi nedeniyle iri daneli zeminler için kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Farklı zeminler için sadece 2 su içeriği değerinde yapılan ölçümler yardımıyla kalibrasyon kurulmuş ve sınama çok az sayıda numune ile gerçekleştirilmiş olsa da TDR, demiryolu hatlarında su içeriğinin ölçülmesi için uygun bir yöntem olarak değerlendirilmiştir. Izvolt vd. [13] benzer bir çalışma ile TDR yönteminin demiryolu hatlarında su içeriği ölçümü için kullanılabilirliğini irdelemiştir. Kalibrasyon 3 farklı zeminle ve her zemin için 5 farklı su içeriğinde yapılan ölçümler ile kurulmuş fakat sınama her zeminde sadece 1 su içeriğinde gerçekleştirilmiştir. Yöntemin ince ve iri daneli zeminlerde kullanılabilir olduğu vurgulanmıştır. Izvolt vd. [14], TDR yöntemi ile demiryolu hattında istenilen katmanda su içeriğinin ölçülebileceğini ve böylelikle hattın termal rejiminin modellenmesine katkı sağlanabileceğini göstermiştir. Alsabhan vd. [15], demiryolu altyapısının taşıma kapasitesini düşüren, drenaj yeteneğini azaltan ve hat deformasyonunu artıran balast kirlenmesinin belirlenmesi için kullanılan yer radarı yönteminde, kirlenme derinliği ve tipi konularında ortaya çıkan belirsizliğin eş zamanlı TDR ölçümleri ile giderilmesini önermiştir.

Bu çalışmada ilk olarak taban zemini olarak kullanılabilen ve ince dane içeriği en fazla %15 olan 7 farklı zemin sınıfında yapılmış olan TDR ölçümleri literatürden elde edilmiştir. Sonrasında, kalibrasyon mevcut çalışmalardan farklı olarak dielektrik karışım modeli yardımıyla oluşturulmuştur. Son aşamada ise önerilen kalibrasyon, bağımsız ve yeterli büyüklükte bir veri seti üzerinde yine mevcut çalışmalara göre çok daha geniş bir su içeriği aralığında sınanmış ve belirlenen performans göstergeleri ile değerlendirilmiştir.

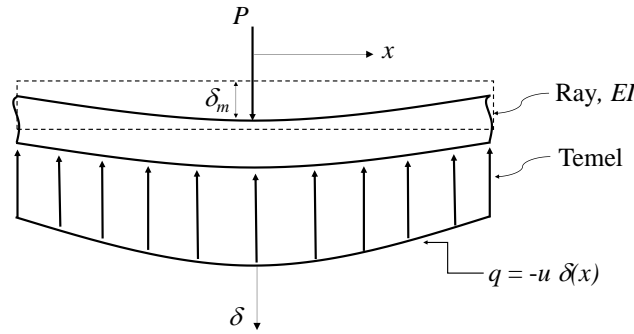
2. Metot

Bu bölümde hat modülü ve taban zemini esneme modülü kavramları açıklandıktan sonra, TDR yönteminin çalışma prensibine ve kalibrasyon aşamasında kullanılan dielektrik karışım modeline yer verilmiştir.

2.1. Hat modülü

Demiryolu hattı üstyapı ve altyapı olmak üzere iki bölümden oluşur. Üstyapı ray, travers, bağlantı elemanları ve balasttan oluşurken altyapı subbalast ve taban zeminini içerir. Tekrarlı trafik yükleri altında hattın mekanik davranışı üstyapı-altyapı etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu davranışı belirleyen en önemli parametreler hat esneme direnci (track stiffness) ve hat modülüdür (track modulus). Bu sebeple esneme direnci ve hat modülü yenileme ve bakım çalışmalarında hat performansını değerlendirmek üzere en sık başvurulan parametrelerdir. Hat esneme direnci hattı oluşturan tüm üstyapı ve altyapı elemanlarının katkı verdiği düşey esneme direncini ifade eder. Hat modülü ise ray hariç yine tüm elemanların etkisini kapsar ve hat temelini birim uzunluğunun esneme direncini ifade eder. Her iki parametre de hat performansını belirlediği için optimum bir seviyede olmaları üstyapı ve altyapı elemanlarının korunması açısından önemlidir.

Daha büyük teker yükü ve hız, tren ile demiryolu arasındaki titreşimi ve etkileşimi yoğunlaştırarak hat üzerinde büyüklüğü ve frekansı artan dinamik gerilmelerin gelişmesine yol açmaktadır [16]. Dinamik gerilmelerin artmasıyla hatta elastik sınır aşılarak plastik deformasyonlar gelişmekte ve hat geometrisi bozulmaktadır. Plastik deformasyonların mertebesi hat esneme direnci ve hat modülü ile doğrudan ilişkilidir. Eğer ray Şekil 1.'de görüldüğü gibi elastik temele oturan sürekli bir kiriş gibi modellenirse, tekerlek yükünü temsil eden P noktasal kuvveti altındaki maksimum sehim (δ_m) yardımı ile hat esneme direnci (k), Denklem 1. ile hesaplanabilir.



Şekil 1. Elastik temele oturan kiriş modeli [17]

$$k = \frac{P}{\delta_m} \quad (1)$$

Hat modülü (u) ise birim hat uzunluğunun birim sehimine karşı hattın gösterdiği reaksiyon kuvveti olarak tanımlanabilir ve Denklem 2. ile hesaplanabilir.

$$u = -\frac{q}{\delta} \quad (2)$$

Denklem 2.'de q , birim hat uzunluğunda teker yüküne karşı gelişen reaksiyon kuvvetidir. Şekil 1.'de görülen modelin diferansiyel denklemi Denklem 3. ile verilmiştir.

$$EI \frac{d^4 \delta}{dx^4} = q = -u \delta \quad (3)$$

Denklem 3.'te E ray malzemesinin elastisite modülünü, I rayın geometrisine bağlı olan atalet momentini, x ise yük uygulama noktasına olan yatay uzaklığı ifade etmektedir. Sınır şartları yardımıyla Denklem 3. çözüldüğünde δ_m Denklem 4. yardımıyla elde edilir.

$$\delta_m = \frac{P\beta}{2u} \quad (4)$$

Denklem 4.'te yer alan β ifadesi ise hat modülü ve rayın eğilme rijitliği (EI) kullanılarak Denklem 5. yardımıyla hesaplanır.

$$\beta = \left(\frac{u}{4EI} \right)^{1/4} \quad (5)$$

Denklem 1. ve Denklem 5. birlikte Denklem 4.'te değerlendirilir ve yeniden düzenlenirse hat esneme direnci ve hat modülü arasındaki ilişki Denklem 6.'da verildiği şekilde elde edilir.

$$u = \frac{(k)^{4/3}}{(64EI)^{1/3}} \quad (6)$$

Denklem 2. göz önüne alındığında daha düşük bir hat modülünün daha büyük bir sehim oluşumu anlamına geleceği görülebilir. Balcı ve Bezgin [18] düşük hat modülünün daha büyük sehim oluşturmanın yanı sıra sehim çukurunun daha geniş bir hat segmentine yayılmasına neden olduğunu göstermişlerdir. Aynı çalışmada aralarında doğrusal bir ilişki olmamakla beraber hat modülünün 10 MPa'dan 100 MPa'ya çıkmasıyla birlikte maksimum sehimin 10 mm'den 1 mm'ye düştüğü de görülmektedir.

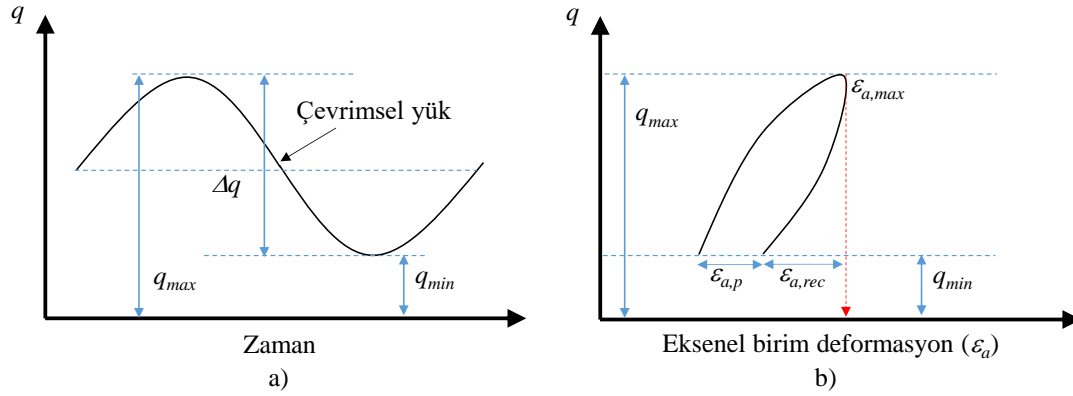
Denklem 6. hat modülünü artırmak için hat esneme direncinin artırılması gerekliliğine işaret etmektedir. Fakat optimum düzeyin üzerinde bir esneme direnci tekerlek-ray ara yüzeyine ilaveten travers ve balast tabakasında daha büyük dinamik kuvvetlerin gelişmesine neden olarak hat üstyapısında ve altyapısında yıpranma ve yorulma davranışlarına yol açar. Ayrıca eşit olmayan sehimler nedeni ile hat geometrisinde bozulma görülebilir [19]. Hat geometrisinin bozulması dinamik kuvvetlerin daha da artmasına neden olarak hat performansını, tren stabilitesini ve yolcu konforunu olumsuz yönde etkiler. Düşük esneme direnci ise daha büyük eğilme momenti ve sehim oluşması nedeniyle rayda yorulma hasarı oluşumunu hızlandırır. Sehim çukurunun daha geniş olması, dinamik yüklerin daha fazla traverse yayılması ve neticesinde balast ile taban zemini tabakalarında daha düşük dinamik gerilmeler meydana getirmekle birlikte balast tabakasında oluşan kayma birim deformasyonları ciddi hat oturmalarına yol açmaktadır [20].

Hat modülü, ray hariç üstyapı ve altyapı bileşenlerinin tamamının katkıda bulunduğu bir parametredir. Fakat bağlantı elemanlarının rijitliği, travers malzemesi ve aralığı gibi faktörlerin hat modülü üzerindeki etkisi son derece sınırlıdır. Balast ve subbalast tabakaları, kalınlıkları görece düşük olduğundan ve elastisite modülleri düşük bir aralıkta değiştiğinden hat modülünü fazla değiştirmemektedir. Hat modülünü en çok etkileyen faktör taban zemini esneklik modülü (M_R) olarak kabul edilmektedir [21].

2.2. Taban zemini esneklik modülü

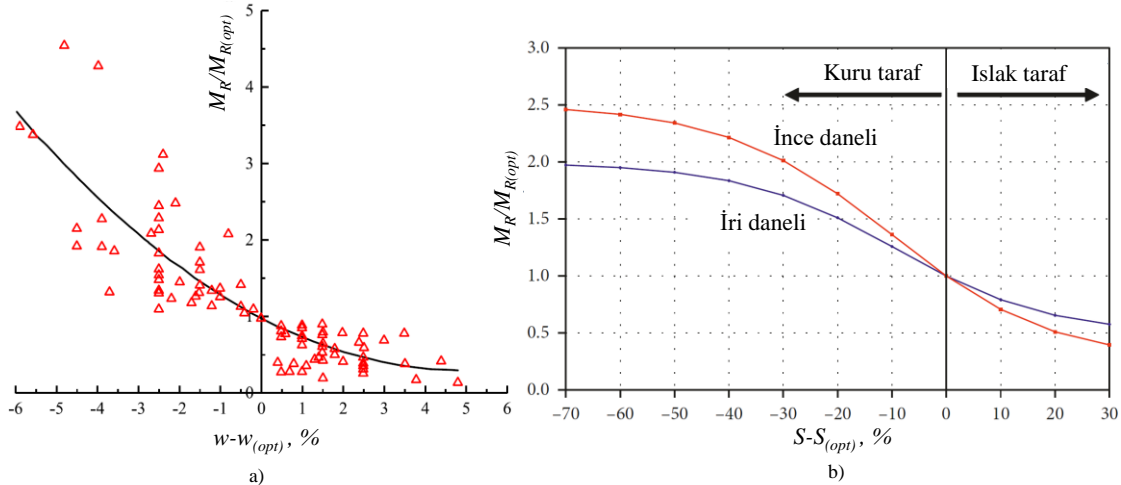
M_R zeminin çevrimsel bir yük altında davranışını şekillendiren en önemli parametredir. Bir çevrim içinde maksimum ve minimum deviatorik gerilmelerin (sırasıyla q_{max} ve q_{min}) farkı uygulanan gerilmenin büyüklüğünü (Δq) gösterir. Gerilme büyüklüğünün, maksimum birim deformasyonun ($\varepsilon_{a,max}$) elastik kısmına ($\varepsilon_{a,rec}$) oranı M_R olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.) ve Denklem 7. ile hesaplanır. Şekil 2.'de $\varepsilon_{a,p}$ plastik (kalıcı) birim deformasyondur.

$$M_R = \frac{\Delta q}{\varepsilon_{a,rec}} = \frac{q_{max} - q_{min}}{\varepsilon_{a,rec}} \quad (7)$$



Şekil 2. Zemin esneme modülünün tanımı a) Çevrimsel yük b) Eksenel birim deformasyon [22]

Hat altyapısının bir bölümü olarak taban zemini maksimum kuru yoğunluğa ulaşabilmek için optimum su içeriğinde sıkıştırılmış durumdadır. Sıkıştırma işlemi sonucunda bir miktar havanın zemin içinde mutlaka hapsediği bilindiğinden taban zemininin doymun olmadığı sonucuna varılabilir. Taban zemini olarak %5'in altında ince dane (silt ve kil) içeren iri daneli (kum ve çakıl) zeminler en az problem oluşturan grup olarak kabul edilir. Drenajı sağlanmış ve uygun sıkıştırılmış iri daneli zeminlerin taban zemini olarak performansı çoğu zaman yeterlidir. Fakat drenaj sisteminde problem bulunan hatlarda taban zemini özellikle aşırı yağışlarla doymun hale gelebilir. Ayrıca aşırı yağışla birlikte yeraltı su seviyesinin yükselmesi de taban zeminini doymun hale getirebilir. Yüzeğe yakın ve doymun iri daneli zeminlerin çevrimsel yükler altında sıvılaşması ve stabilitesini kaybetmesi olasılığı hat performansı açısından ciddi bir risktir [23]. Şekil 3a.'da ve Şekil 3b.'de sırasıyla, optimum su içeriği (w_{opt}) ve bu su içeriğine karşılık gelen optimum suya doymunluk derecesi (S_{opt}) değerlerinden uzaklaşıldıkça esneklik modülünün büyük bir aralıkta değiştiği görülmektedir. M_R , w_{opt} değerinde ölçülen optimum esneklik modülü $M_{r,opt}$ ile karşılaştırıldığında (M_R/M_{Ropt}) su içeriğinin (w) ve beraberinde suya doymunluk derecesinin (S) artmasıyla önemli ölçüde azalmaktadır. w_{opt} ile sıkıştırılan taban zemininde su içeriğinin %3 kadar artması ile esneklik modülünün yarıya düştüğü Şekil 3a.'dan görülebilir. Esneme modülünde bu oranda bir azalış ile hat modülünün de yaklaşık olarak yarı değerine geleceği ve beraberinde ray, travers ve taban zemini yüzeyinde sehimin 2,5 katına çıkabileceği gösterilmiştir [17].



Şekil 3. Zemin esneme modülünün değişimi a) Su içeriğine göre [24] b) Doymunluğa göre [25]

2.3. TDR yöntemi ve dielektrik karışım modeli

Kapalı devre çalışan bir radar devresine benzetilebilecek olan TDR, ilk olarak elektronik sistemlerde empedans süreksizliklerini belirlemek ve konumlandırmak için kullanılmıştır [26].

Tipik bir TDR cihazı yüksek frekanslı sinyal üretici, sinyalin örneklenmesi ve izlenmesi için osiloskop ve sinyalin iletiildiği iletim hattından oluşur [27]. Bazı ticari modellerde çok kanaldan ölçüm alımını, kablosuz iletişimi ve veri depolamayı mümkün kılan bileşenler de mevcuttur. Sinyal üreticiden iletim hattına ve sonrasında kılavuz (waveguide) üzerinden ölçüm alınan ortama aktarılan test sinyali ilerlerken empedans süreksizliği ile karşılaşırsa sinyalin bir bölümü o noktadan cihaza geri yansır. Yansıyan sinyaller ve yansıma süreleri sürekli olarak kaydedilir. Ölçüm tamamlandığında sinyalin ortamda ilerleme süresi (Δt) belirlenmiş olur. Bu süre yardımıyla ortamın dielektrik iletkenliği (ϵ_c) Denklem 8. ile elde edilir.

$$\epsilon_c = \left(\frac{c\Delta t}{2L} \right)^2 \quad (8)$$

Denklem 8.'de c ışık hızı ($2,998 \times 10^8$ m/s), L ise kılavuz uzunluğudur. Zemin ortamı dane, su ve hava bileşenlerini içeren kompozit bir yapıdır. Danelerin dielektrik iletkenliği mineralojik kökene göre 2 ile 6 arasında değişirken, hava için bu değer 1'dir. Suyun dielektrik iletkenliğinin 80 olması zeminin dielektrik iletkenliğinin büyük ölçüde su içeriğine bağlı olduğu anlamına gelir. Bu sebeple zeminin dielektrik iletkenliği ile hacimsel su içeriği (θ) arasında çok sayıda kalibrasyon denklemi elde edilmiştir. TDR ile zemin su içeriğinin belirlenmesi için kullanılan sistemin şematik gösterimi Şekil 4.'te verilmiştir.

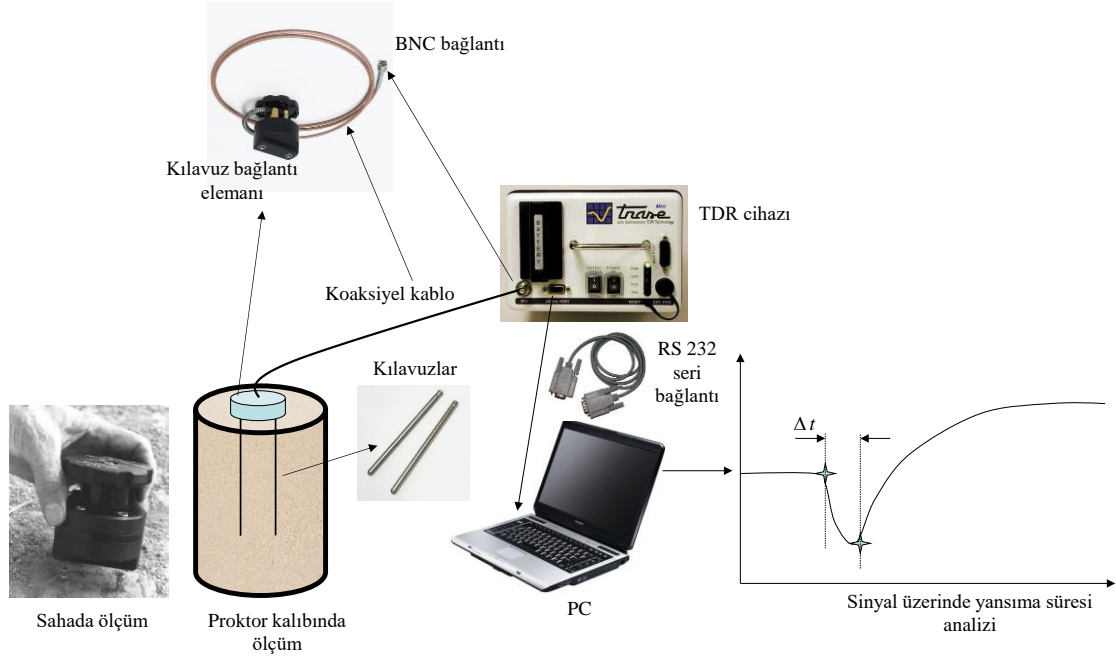
Kalibrasyon denklemleri içinde en yaygın olarak bilineni Topp vd. [28] tarafından geliştirilen ve Denklem 9. ile verilen denklemdir.

$$\theta = -0,053 + 0,0292\epsilon_c - 5,5 \times 10^{-4}\epsilon_c^2 + 4,3 \times 10^{-6}\epsilon_c^3 \quad (9)$$

Bir diğer kalibrasyon eşitliği Ledieu vd. [29] tarafından önerilmiş ve Denklem 10. ile verilmiştir.

$$\theta = 0,114\epsilon_c^{0,5} - 0,176 \quad (10)$$

Zeminin dielektrik iletkenliği su içeriğinin yanı sıra ikincil olarak kuru yoğunluk ve ince dane içeriğinden de etkilenmektedir. Literatürde kalibrasyon denkleminde kuru yoğunluğun ve ince dane içeriğinin (alternatif olarak adsorbe su içeriğinin) de yer aldığı çalışmalar mevcuttur. Fakat bir demiryolu hattında taban zemini su içeriği ölçümleri için her noktada bu parametrelerin belirlenmesi TDR yönteminin geleneksel yöntemlere oranla çok daha hızlı olma potansiyelini ortadan kaldıracaktır. Bu sebeple çalışmada dielektrik karışım modeli yardımıyla elde edilen kalibrasyon denkleminde sadece zeminin dielektrik iletkenliğine yer verilmiştir. Bu amaçla zemin kuru yoğunluğu ve danelerin özgül ağırlığı için veri setine dayandırılan nominal değerler kullanılmıştır.



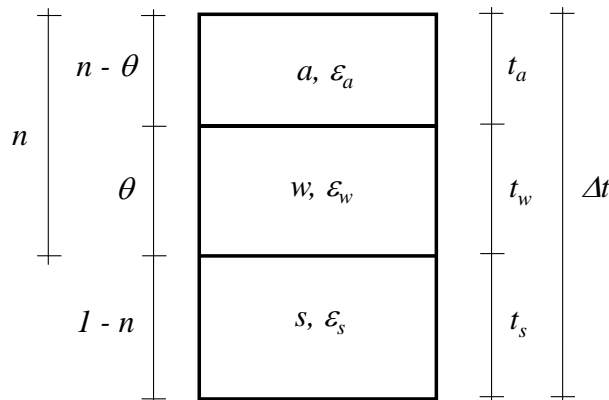
Şekil 4. Sahada ve laboratuvarında TDR ile su içeriği ölçümünün şematik gösterimi [10]

Dielektrik karışım modeli ile çok bileşenli malzemelerin dielektrik iletkenliği, her bir bileşenin hacimsel oranı ve dielektrik iletkenlikleri kullanılarak elde edilir. Üç bileşenli mükemmel tabakalanmış bir malzemenin dielektrik iletkenliği (ϵ_m) Denklem 11. ile hesaplanır.

$$\epsilon_m^\alpha = v_1 \epsilon_1^\alpha + v_2 \epsilon_2^\alpha + v_3 \epsilon_3^\alpha \quad (11)$$

Denklem 11.'de v_i bileşenlerin hacimsel oranını, ϵ_i bileşenlerin dielektrik iletkenliğini ifade eder. α ise uygulanan manyetik alana göre tabaka geometrisini yansıtan bir değişken olup -1 ile 1 arasında değişir [30]. Karışım modelini zemine uygulamadan önce Şekil 5.'te gösterilen ve toplam hacmin 1 birim kabul edildiği zemin faz diyagramını açıklamak faydalı olacaktır. Faz diyagramında porozite (n) ve θ sırasıyla boşluk ve su hacimlerinin toplam hacme oranıdır. Bu durumda hava ve dane hacimleri sırasıyla $(n-\theta)$ ve $(1-n)$ olmaktadır. t_a , t_w ve t_s sinyalin sırasıyla hava, su ve dane hacimlerinde geçirdiği sürelerdir.

Hava, su ve dane bileşenlerinin dielektrik iletkenlikleri (sırasıyla ϵ_a , ϵ_w ve ϵ_s) ve hacimsel oranları yardımıyla t_a , t_w , t_s ve Δt Denklem 12., Denklem 13., Denklem 14. ve Denklem 15. ile hesaplanabilir.



Şekil 5. Zemin faz diyagramı [10]

$$t_a = \frac{2(n - \theta)\sqrt{\varepsilon_a}}{c} \quad (12)$$

$$t_w = \frac{2\theta\sqrt{\varepsilon_w}}{c} \quad (13)$$

$$t_s = \frac{2(1 - n)\sqrt{\varepsilon_s}}{c} \quad (14)$$

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{\varepsilon_c}}{c} \quad (15)$$

Δt süresinin sinyalin tüm bileşenlerde ilerlediği toplam süre olduğu hatırlanacak olursa (Denklem 16.) üç bileşenli karışım modeline dayalı olarak zeminin dielektrik iletkenliği Denklem 17. ile verildiği şekilde elde edilmiş olunur.

$$t = t_a + t_w + t_s \quad (16)$$

$$\varepsilon_c^{0.5} = (n - \theta)\varepsilon_a^{0.5} + \theta\varepsilon_w^{0.5} + (1 - n)\varepsilon_s^{0.5} \quad (17)$$

Denklem 17.'den görülebileceği üzere α katsayısı zemin bileşenlerinin mükemmel tabakalanmış olduğu kabulü ile 0,5 alınabilir. Denklem 17. bilinen hacim ilişkileri yardımıyla yeniden düzenlendiğinde bu çalışmada önerilen kalibrasyon için Denklem 18. elde edilmiş olunur.

$$\varepsilon_c^{0.5} = (\varepsilon_s^{0.5} - \varepsilon_a^{0.5})\frac{\rho_d}{\rho_s} + (\varepsilon_w^{0.5} - \varepsilon_a^{0.5})\theta + \varepsilon_a^{0.5} \quad (18)$$

Denklem 18.'de ρ_s ve ρ_d sırasıyla danelerin yoğunluğu ve zeminin kuru yoğunluğudur. Dielektrik karışım modeli TDR ile zemin su içeriğinin belirlenmesi konusu dışında yer radarı ile demiryollarında balast kirlenmesinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda da kullanılmıştır. Artagan ve Borecky [31] çakıl, kum ve çakıl-kum karışımı ile kirlenmiş granit balastın dielektrik iletkenliğini 3 farklı deneysel yöntemle elde edip karışım modeli ile hesaplanan teorik değerlerle doğrulamışlardır. Çalışmada kirlenme derecesi ile dielektrik iletkenlik arasında anlamlı bir ilişki olduğu gösterilmiştir.

2.4. Veri seti ve performans göstergeleri

Arsoy vd. [32] TDR ile su içeriğinin belirlenmesinde yapay sinir ağlarının kullanılabilirliğini inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada 7 zemin sınıfı, 3 farklı enerji seviyesi ve 5 farklı hedef su içeriği ile toplam 105 numune sıkıştırılarak TDR ölçümleri yapılmıştır. Zeminlerin sınıflandırılması ASTM [33] prosedürü ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin referans su içeriği değerleri etüvde kurutma yöntemi ile belirlenmiştir. Önerilen kalibrasyon denkleminin kurulması ve sınanması için Arsoy vd. [32] tarafından gerçekleştirilen çalışmada elde edilen ve Tablo 1.'de özetlenen veriler kullanılmıştır. Her zemin sınıfında numunelerin yarısı raslantısal olarak kalibrasyon setine, diğer yarısı ise sınama setine ayrılmıştır.

Tablo 1. Kalibrasyon ve sınaama için kullanılan verilerin özeti [32]

Zemin sınıfı	ρ_s (g/cm ³)	İnce dane (%)	ρ_d (g/cm ³)	θ (%)	ε_c	ε_s [9]
SW	2,64	0,10	1,52-1,69	0,35-20,95	3,30-13,00	5,49
SP	2,44	2,30	1,66-1,87	0,80-24,42	4,10-15,60	5,17
SM	2,60	15,00	1,56-1,90	0,68-24,40	3,80-15,30	5,28
SC	2,62	15,00	1,60-1,75	0,81-20,82	3,60-12,80	5,17
SW-SC	2,67	7,00	1,65-1,84	0,94-22,94	3,80-12,70	5,32
SW-SM	2,62	10,00	1,61-1,80	0,41-21,86	3,60-13,90	5,41
SP-SC	2,62	7,00	1,72-1,95	0,86-24,47	4,20-15,50	5,11

Tablo 1.'de yer alan ε_s değerleri Denklem 18. ile geri hesaplama yardımıyla elde edilmiş ortalama değerlerdir. Geri hesaplamada ε_a ve ε_w sırasıyla 1 ve 80 kabul edilmiştir. Tablo 1.'de özetlenen veriler ışığında ortalama ρ_s , ρ_d ve ε_s değerleri sırasıyla 2,61 g/cm³, 1,73 g/cm³ ve 5,28 olarak hesaplanmış ve Denklem 18.'de bu değerler yerlerine konularak Denklem 19. elde edilmiş ve veri setine özel kalibrasyon denklemi olarak kullanılmıştır.

$$\theta = 0,126\varepsilon_c^{0,5} - 0,234 \quad (19)$$

Ayrıca Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] tarafından önerilen, sırasıyla Denklem 9. ve Denklem 10.'da verilen kalibrasyon denklemleri de kullanılan veri setine özgü olarak güncellenerek kullanılmıştır. Güncellenmiş kalibrasyon denklemleri "Topp vd. özel kalibrasyon" ve "Ledieu vd. özel kalibrasyon" olarak adlandırılarak sırasıyla Denklem 20. ve Denklem 21. ile verilmiştir.

$$\theta = -0,1553 + 0,0528\varepsilon_c - 2,6 \times 10^{-3}\varepsilon_c^2 + 5,0 \times 10^{-5}\varepsilon_c^3 \quad (20)$$

$$\theta = 0,112\varepsilon_c^{0,5} - 0,216 \quad (21)$$

Elde edilen kalibrasyon eşitliğinin sınaama setinde başarısını irdelemek için bazı performans göstergeleri kullanılmıştır. Ortalama hata kareleri karekökü (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve p2- indeks seçilen göstergelerdir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (22)$$

$$MAE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|} \quad (23)$$

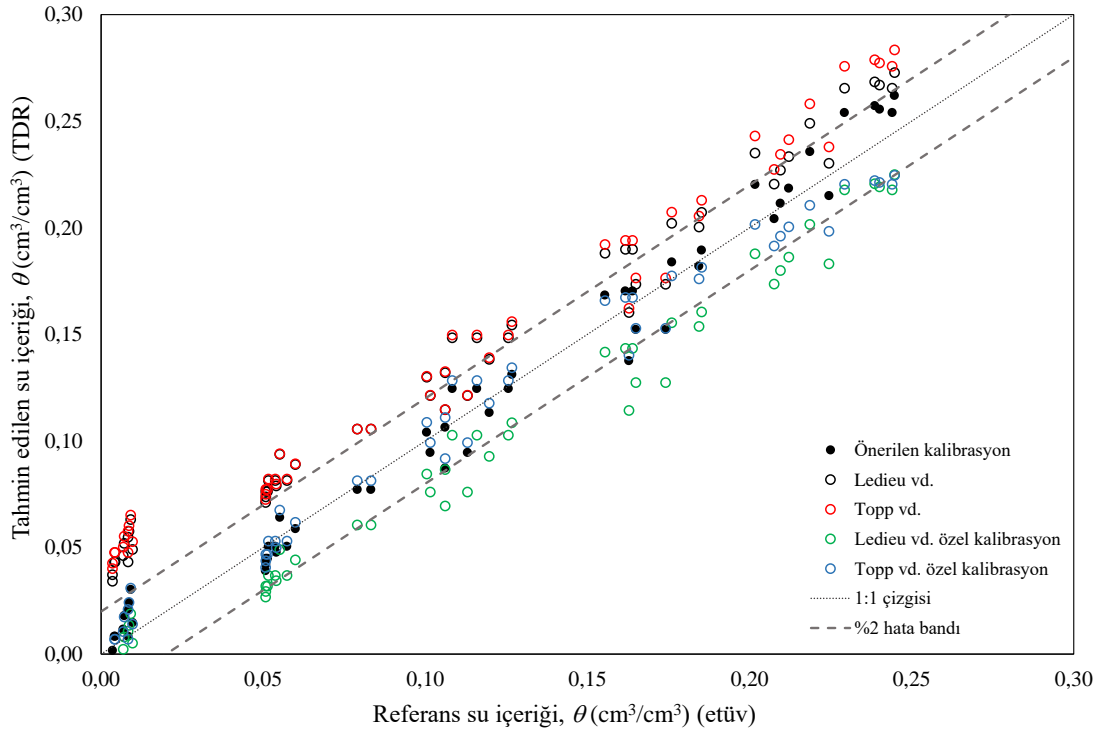
$$p2 - indeks = \frac{n2}{N} \quad (24)$$

N sınaama setindeki numunelerin sayısı, y_i etüvde kurutma ile elde edilen referans değer, \bar{y}_i ortalama y_i ve \hat{y}_i kalibrasyonla tahmin edilen değerdir. $n2$ ise tahmin edilen ile referans değer

arasındaki farkın $-0,02$ ile $+0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ arasında kaldığı numunelerin sayısıdır. 105 numunenin 52'si kalibrasyonda kullanıldığından N sınama seti için 53 olmuştur.

3. Bulgular

Şekil 6.'da farklı kalibrasyonlarla tahmin edilen su içeriği değerleri etüvden elde edilen referans değerlerle karşılaştırılmıştır. 1:1 çizgisi mükemmel eşleşmeyi temsil ederken %2 hata bandı, tahmin hatasının $-0,02$ ile $+0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ aralığında kaldığı alanı göstermektedir. Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] tarafından önerilen kalibrasyonların (sırasıyla Denklem 9. ve Denklem 10.) referans değerlerin oldukça üzerinde tahminler ürettiği görülmektedir. Bu denklemler kalibrasyon verisi ile yeniden düzenlendiğinde elde edilen özel kalibrasyon denklemleri tahminlerin başarısını önemli ölçüde artırmıştır. Dielektrik karışım modeline dayanan ve bu çalışmada önerilen kalibrasyon ise çok büyük oranda %2 hata bandı içinde kalarak RMSE, MAE ve $p2$ -indeks değerleri açısından en başarılı kalibrasyon olmuştur. Karşılaştırılan kalibrasyonların performans göstergeleri Tablo 2.'de özetlenmiştir.



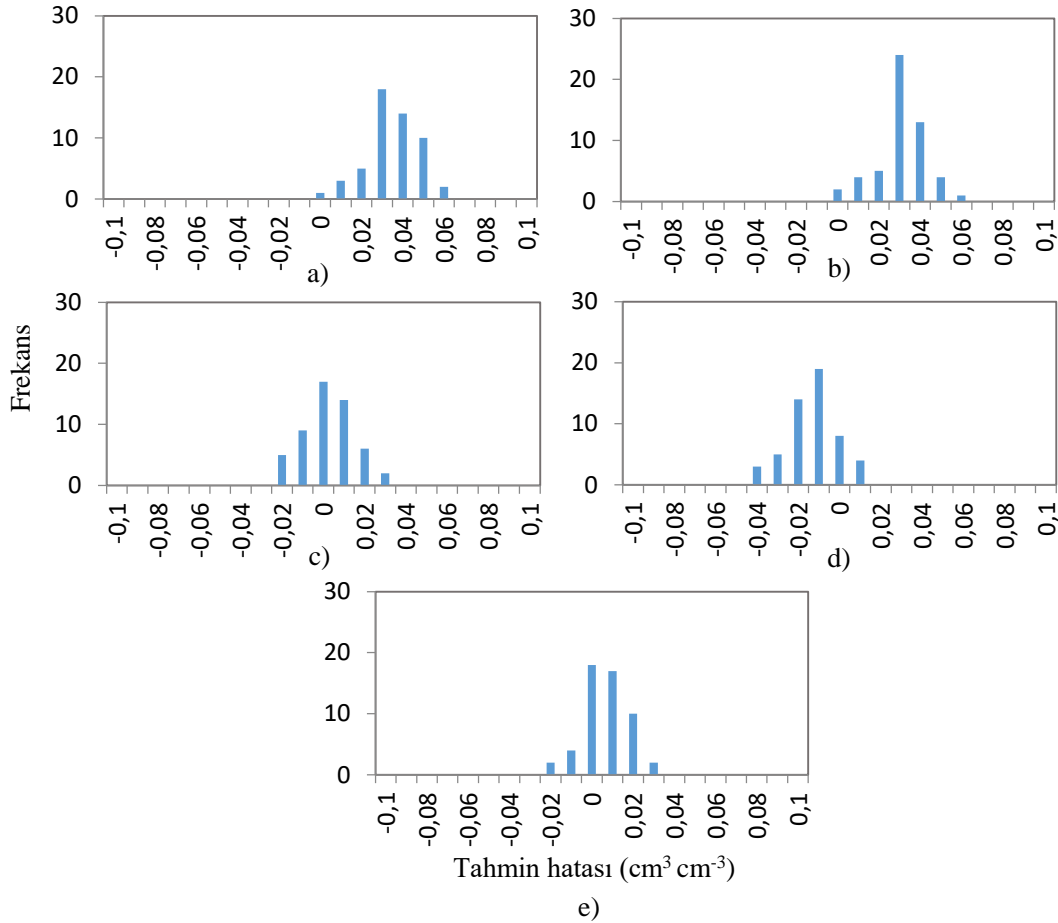
Şekil 6. Farklı kalibrasyonlar ile tahmin edilen değerlerin referans su içeriği ile karşılaştırılması

Tablo 2.'den görülebileceği üzere zemin grubuna özel bir kalibrasyon uygulanmadığı sürece Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] kalibrasyonlarının TDR ile su içeriği tahmininde kullanılması mümkün değildir. Hatta Ledieu vd. özel kalibrasyon modeli de yeterli doğruluğu sağlamamaktadır. $p2$ -indeks yardımıyla bir değerlendirme yapılacak olursa Topp vd. özel kalibrasyonu ve bu çalışmada önerilen kalibrasyon diğer kalibrasyonlara göre çok daha başarılı olmuştur. Önerilen kalibrasyon çok geniş bir su içeriği aralığında %2 hata bandında kalacak şekilde numunelerin %93'ünde başarılı olmuştur.

Tablo 2. Farklı kalibrasyonlar için performans göstergeleri

Kalibrasyon	RMSE (cm^3/cm^3)	MAE (cm^3/cm^3)	<i>p2</i> -indeks
Topp vd. [28] (Denklem 9.)	0,033	0,031	0,17
Ledieu vd. [29] (Denklem 10.)	0,029	0,027	0,21
Topp vd. özel kalibrasyon (Denklem 20.)	0,012	0,010	0,86
Ledieu vd. özel kalibrasyon (Denklem 21.)	0,022	0,019	0,58
Önerilen kalibrasyon (Denklem 19.)	0,011	0,009	0,93

Şekil 7.'de değerlendirilen kalibrasyonların tahmin hatası histogramları yer almaktadır. Frekans değeri bir tahmin hatası aralığında kalan numune sayısını ifade etmektedir. Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] kalibrasyonlarının su içeriğini tüm numunelerde referans değer üzerinde tahmin ettiği sırasıyla Şekil 7a. ve Şekil 7b.'de görülmektedir. Şekil 7c.'de verilen Topp vd. özel kalibrasyonunun hata dağılımı, uygun görünmekle birlikte %2 hata bandının dışında kalan numune sayısı 7 olmuştur. Ledieu vd. özel kalibrasyonu Şekil 7d.'den görülebileceği üzere büyük ölçüde referans değer altında tahmin vermektedir. Son olarak Şekil 7e.'de bu çalışmada önerilen kalibrasyonun hata dağılımının yeterli ölçüde dar ve sifıra oldukça yakın merkezlendiği görülmektedir. %2 hata bandının dışında kalan numune sayısı sadece 4 olmuştur.



Şekil 7. Tahmin hatası histogramları a) Topp vd. [28] b) Ledieu vd. [29] c) Topp vd. özel kalibrasyon d) Ledieu vd. özel kalibrasyon e) Önerilen kalibrasyon

4. Sonuç

Demiryollarında yenileme ve bakım çalışmalarının uygun planlanması için hat performansının en doğru şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirmede en sık başvurulan parametrelerden birisi hat modülüdür. Hat modülü farklı üstyapı ve altyapı elemanlarının etkilediği bir parametre olmakla birlikte taban zemini esneklik modülü en etkin faktör olarak öne çıkmaktadır. Zeminin esneklik modülü ise su içeriğinin bir fonksiyonudur. Bu sebeple hat modülü yağış rejimine bağlı olarak mevsimsel farklılıklar gösterebilir. Hat performansının değerlendirilmesinde bu durumu göz önünde bulundurabilmek için taban zemini malzemesinin esneklik modülünün su içeriği ile ilişkisi ortaya çıkarılıp, hat boyunca taban zemini su içeriğinin periyodik olarak ölçülmesi uygun bir yaklaşımdır.

Zaman Tanım Alanında Yansıma Yöntemi (Time Domain Reflectometry, TDR) çok kanaldan gerçek zamanlı ve uzaktan ölçüm (real-time and remote monitoring) yapabilme olanaklarıyla demiryolu hatlarında taban zemininde periyodik su içeriği ölçümleri için büyük potansiyel barındırmaktadır. Bu çalışmada TDR ile ölçülen zemin dielektrik iletkenliğinin kullanıldığı ve diğer çalışmalardan farklı olarak dielektrik karışım modeline dayandırılan bir kalibrasyon önerilmiştir. Önerilen kalibrasyon yine diğer çalışmalardan farklı olarak bir zemin sınıfını değil, taban zemini olarak kullanılabilir 7 farklı zemin sınıfını kapsamaktadır. Kalibrasyonun tahmin yeteneği etüvden elde edilen referans su içeriği değerleri kullanılarak RMSE, MAE, $p2$ -indeks ve tahmin hatası dağılımı gibi performans göstergeleri yardımıyla farklı kalibrasyonlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yardımıyla elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] kalibrasyonları çalışmada kullanılan zeminlerde referans değer için çok üstünde tahminler vermiştir. Söz konusu kalibrasyonların ortalama RMSE ve MAE değerleri sırasıyla 0,031 ve 0,029 cm^3/cm^3 olurken $p2$ -indeks 0,19 gibi düşük bir değer almıştır. Bu durum TDR ile zemin su içeriğinin ölçülmesi için mutlaka özel kalibrasyona ihtiyaç duyulduğuna işaret etmektedir. Fakat bir demiryolu hattında taban zemini malzemesinin hat boyunca aynı dane çapı dağılımına sahip olması mümkün olmadığından zemine özel kalibrasyon yerine benzer dane çapı dağılımı gösteren zeminleri kapsayan bir kalibrasyon elde etmek daha uygulanabilir bir yaklaşımdır.
- Topp vd. [28] ve Ledieu vd. [29] tarafından önerilen kalibrasyonların bu çalışmada kullanılan zemin grubu için sırasıyla polinom ve doğrusal regresyon ile güncellenmesi kalibrasyonların tahmin başarısını artırmıştır. Topp vd. özel kalibrasyonu ile RMSE ve MAE sırasıyla 0,012 ve 0,010 cm^3/cm^3 olurken $p2$ -indeks 0,86'ya yükselmiştir.
- Bu çalışmada önerilen kalibrasyon regresyon modelleri yerine dielektrik karışım modeli ile elde edilmiştir. Önerilen kalibrasyon tüm performans göstergelerinde daha üstün olmuştur. Önerilen kalibrasyonun RMSE ve MAE değerleri sırasıyla 0,011 ve 0,009 cm^3/cm^3 olurken $p2$ -indeks 0,93 gibi oldukça yüksek bir değer almıştır. Ayrıca tahmin hatası dağılımının oldukça dar ve sifıra yakın merkezlenmiş olduğu görülmektedir.
- Geoteknik mühendisliği penceresinden bakıldığında zemin su içeriğinin yaklaşık %1,0 ortalama sapma ile gerçek zamanlı ve uzaktan ölçülebiliyor olması oldukça yeterli bir performanstır. Bu bağlamda Türkiye'de kullanımı son derece sınırlı olan TDR, demiryolu hatlarında taban zemini su içeriğinin periyodik ölçümleri için yüksek doğruluk sağlayan hızlı ve tahribatsız bir ölçüm yöntemi olarak önerilmektedir.
- Bu çalışmada önerilen kalibrasyon literatürden elde edilen ve iri daneli (ince dane oranı en fazla %15) olarak sınıflandırılabilir zeminler üzerinde gerçekleştirilen TDR

ölçümlerine dayanmaktadır. Bu nedenle farklı zeminler için yeni bir kalibrasyon çalışması önerilmektedir.

- Zeminlerin su içeriğinin ölçülmesi için TDR yöntemini kullanan çok sayıda marka ve modelde cihaz mevcuttur. Bu cihazların elektronik altyapısı çözünürlüğü belirlemektedir. Bu sebeple her marka ve modelle aynı tahmin yeteneği beklenmemelidir. Su içeriğinin yanı sıra kuru yoğunluğun da belirlenmek istendiği çalışmalarda yansıyan dalga formunu kaydedebilen cihazlar tercih edilmelidir.
- TDR ile demiryolu taban zemininde su içeriğinin belirlenmesi konusunda karşılaşılabilecek en önemli zorluk, ölçüm kılavuzlarının gerekli derinliğe önceden yerleştirilmiş olması gerekliliğidir. Yerleştirme işlemi demiryolu hattının yapım ya da bakım aşamalarından birinde yapılırsa bu zorluk ortadan kalkmış olur.

Kaynakça

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022
- [2] Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER), “Activity Report 2021,” 2022. [Online]. Available: https://www.cer.be/images/publications/positions/CER_Activity_Report_2021.pdf [Accessed August 12, 2023]
- [3] M. J. Roshan, A. S. A. Rashid, N. A. Wahab, S. Tamassoki, S. N. Jusoh, M. A. Hezmi, N. N. N. Daud, N. M. Apandi, M. Azmi, “Improved methods to prevent railway embankment failure and subgrade degradation: A review,” *Transportation Geotechnics*, vol. 37, no. 100834, 2022, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100834
- [4] J. Campos, G. Rus, “Some stylized facts about high-speed rail: a review of HSR experiences around the World,” *Transport Policy*, vol. 16, no. 1, pp. 19–28, 2009, doi: 10.1016/j.tranpol.2009.02.008
- [5] B. Indraratna, S. Nimbalkar, “Stress-strain degradation response of railway ballast stabilized with geosynthetics,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 684–700, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000758.
- [6] Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER), “Track Maintenance and Renewal,” 2012. [Online]. Available: https://www.cer.be/images/publications/positions/CER_Activity_Report_2021.pdf [Accessed August 14, 2023]
- [7] S. S. Artagan, L. B. Ciampoli, F. D’Amico, A. Calvi, F. Tosti, “Non-destructive assessment and health monitoring of railway infrastructures,” *Surveys in Geophysics*, vol. 41, pp. 447–483, 2020, doi:10.1007/s10712-019-09544-w
- [8] S. Arsoy, M. Ozgur, E. Keskin, C. Yilmaz, “Usability of calcium carbide gas pressure method in hydrological sciences,” *Journal of Hydrology*, vol. 503, pp. 67–76, 2013, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.08.044
- [9] K. Noborio, “Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 31, no. 3, pp. 213–237, 2001, doi: 10.1016/S0168-1699(00)00184-8
- [10] M. Ozgur, “Development and validation of a degree of saturation prediction model using time domain reflectometry for compaction control,” *Transportation Geotechnics*, vol. 42, no. 101062, 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2023.101062
- [11] G. Curioni, D. N. Chapman, A. C. Royal, N. Metje, B. Dashwood, D. A. Gunn, C. M. Inauen, J. E. Chambers, P. I. Meldrum, P. B. Wilkinson, R. T. Swift, H. J. Reeves, “Time domain reflectometry (TDR) potential for soil condition monitoring of geotechnical assets,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 56, no. 7, pp. 942–955, 2019, doi: 10.1139/cgj-2017-0618
- [12] J. Pies, L. Mocova, “Application of TDR test probe for determination of moisture changes of railway substructure materials,” *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 74–81, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.013
- [13] L. Izvolt, P. Dobes, M. Mear, “Calibration of TDR test probes for measuring moisture changes in the construction layers of the railway line,” *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 1057–1063, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.848

- [14] L. Izvolt, P. Dobes, “Monitoring of moisture changes in the construction layers of the railway substructure body and its subgrade,” *Procedia Engineering*, vol.161, pp. 1049–1056, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.847
- [15] A. Alsabhan, D. Fratta, B. J. Warren, J. M. Tinjum, T. B. Edil, “Using Time Domain Reflectometry to determine depth of fouling and fouling type in railway track substructure,” *Geotechnical Testing Journal*, vol. 42, no. 1, pp. 156–179, 2019, doi:10.1520/GTJ20170305
- [16] J. Liu, J. Xiao, “Experimental study on the stability of railroad silt subgrade with increasing train speed,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.136, no. 6, pp. 833–841, 2009, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.00002
- [17] E. T. Selig, D. Li, “Track modulus: Its meaning and factors influencing it,” *Transportation Research Record*, vol. 1470, pp. 47–54, 1994.
- [18] E. Balcı, N. Bezgin, “Hat esneme direncinin hat performansı üzerindeki etkileri,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 11, pp. 75–85, 2020.
- [19] Y. Tong, G. Liu, K. Yousefian, G. Jing, “Track vertical stiffness–value, measurement methods, effective parameters and challenges: A review,” *Transportation Geotechnics*, vol. 37, no. 100833, 2022, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100833
- [20] C. Shi, Y. Zhou, L. Xu, X. Zhang, Y. Guo, “A critical review on the vertical stiffness irregularity of railway ballasted track,” *Construction and Building Materials*, vol. 400, no. 132715, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132715
- [21] E. T. Selig, J. M. Waters. *Track Geotechnology and Substructure Management*. London, UK: Thomas Telford, 1994.
- [22] B. Indraratna, D. J. Armaghani, A. G. Correia, H. Hunt, T. Ngo, “Prediction of resilient modulus of ballast under cyclic loading using machine learning techniques,” *Transportation Geotechnics*, vol. 38, no. 100895, 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100895
- [23] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann, S. Chrismer. *Substructure from: Railway Geotechnics*. Florida, USA: CRC Press, 2016.
- [24] L. Zhang, X. Jiang, Z. Li, Z. Yang, G. Liu, Z. Dong, Y. Qiu, “Influence of the attenuation of subgrade elastic modulus caused by precipitation on ballasted track structure,” *Construction and Building Materials*, vol. 352, no. 128971, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128971
- [25] K. Gaspard, Z. Zhang, G. Gautreau, K. Hanifa, C. E. Zapata, M. Abufarsakh, “Modeling the resilient modulus variation of in situ soils due to seasonal moisture content variations,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, no. 1793601, 2019, doi: 10.1155/2019/1793601
- [26] M. Ozgur, S. Arsoy, “A practical modification to coaxial cables as damage sensor with TDR in obscured structural members and RC piles,” *Structural Monitoring and Maintenance*, vol. 10, no. 2, pp. 133–154, 2023, doi: 10.12989/smm.2023.10.2.133
- [27] M. W. Lin, J. Thaduri, “Structural deflection monitoring using an embedded ETDR distributed strain sensor,” *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, vol. 17, no. 5, pp. 423–430, 2006, doi: 10.1177/1045389X06058631
- [28] G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan, “Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines,” *Water Resources Research*, vol. 16, no. 3, pp. 574–582, 1980, doi: 10.1029/WR016i003p00574
- [29] J. Ledieu, P. D. Ridder, P. D. Clerck, S. Dautrebande, “A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry,” *Journal of Hydrology*, vol. 88, no. 3–4, pp.319–328, 1986, doi: 10.1016/0022-1694(86)90097-1
- [30] M. Ansoult, L. W. D. Backer, M. Declercq, “Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 49, no. 1, pp. 47–50, 1985, doi: 10.2136/SSSAJ1985.03615995004900010009X
- [31] S. S. Artagan, V. Borecky, “Advances in the nondestructive condition assessment of railway ballast: A focus on GPR,” *NDT & E International*, vol. 115, no. 102290, 2020, doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102290
- [32] S. Arsoy, M. Ozgur, E. Keskin, C. Yilmaz, “Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils,” *Geoderma*, vol. 195–196, pp. 133–144, 2013, doi: 10.1016/j.geoderma.2012.11.019
- [33] *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM D2487, 2017

Özgeçmiş**Mehmet ÖZGÜR**

1978 yılında Antakya'da doğdu. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 2001, 2003 ve 2013 yıllarında tamamladı. Halen Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında, zemin dinamiği, zemin-yapı etkileşimi, kazık hasarları ile zemin su içeriğinin TDR yöntemiyle belirlenmesi ve yapay sınırları bulunmaktadır.

E-Posta: mehmetozgur@comu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.