



6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Demiryolu Üstyapısına Etkilerinin Saha Gözlemleri ve Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN

TCDD 4. Bölge Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 09.05.2023, Kabul/Accepted: 22.05.2023, Yayınlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Tünel, köprü, viyadük gibi çeşitli demiryolu altyapı elemanlarının depreme dayanıklı tasarımı günümüze kadar geniş ölçekte araştırılmıştır. Ancak demiryolu traverslerinin “hattın depreme dayanıklılığının artırılması” açısından sağlayabileceği potansiyel faydalar, standartlarda yer edinmemiş ve literatürde yeterli düzeyde araştırılmamıştır. Bu çalışmada, dünyadaki diğer örneklerinde olduğu gibi, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri ardından da gözlemlenen “S-tipi üstyapı hatalarının” esas nedenleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, Gölbaşı-Kapıdere İstasyonları arasındaki yaklaşık 5140 metrelik demiryolu güzergâhında gözle muayeneler gerçekleştirilmiş ve bu hattın ANSYS® sonlu eleman modeli hazırlanarak modal analizlere tabi tutulmuştur. Gözlem ve analiz sonuçlarına göre, yekpare traversler kullanılan balastlı demiryolu üstyapılarının, standartlara tam olarak uygun olsa dahi, depreme karşı nispeten düşük dayanıklılığa sahip olduğu ve S-tipi hatalara sebebiyet verebildiği belirlenmiştir. Bu bağlamda, ülkemizde son yıllarda geliştirmeye alınan H-tipi traverslerin alternatif bir çözüm sunabileceği düşünüldüğü için, bu yeni travers modelinin karşılaştırmalı modal analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda, H-tipi traversler içeren modelin, depreme ait yanıl ivme kayıtlarının spektrum şiddetlerinin yoğun olduğu 2-15 Hz frekans bandından uzaklaşmakta fayda sağladığı ve ilk üç yatay rezonans frekansının; yekpare traversli konvansiyonel hatta göre sırasıyla %109, %89 ve %72 daha yüksek sonuçlandığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Türkiye depremleri, Türkiye-Suriye depremleri, S-tipi demiryolu hataları, Termal burulmalar, Depreme dayanıklı demiryolu üstyapısı tasarımı

Investigation of the Effects of the 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes on the Railway Superstructure by Field Observations and Finite Element Analysis

Abstract: The earthquake-resistant design of various railway infrastructure elements, such as tunnels, bridges and viaducts, has been extensively investigated. However, standards have not included the potential benefits of railway sleepers in terms of "increasing the earthquake resistance of the railways", and this issue has not been investigated enough in the literature. Therefore, this study investigated the main causes of typical "S-shaped" railway faults observed after several earthquakes in the world and similarly after the 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquakes. In this context, approximately 5140 meters of field investigation between the Gölbaşı and Kapıdere Train Stations was carried out. After this, the ANSYS® finite element model of the investigated track was prepared and subjected to modal analysis. As a result, it has been determined that ballasted railway superstructures using mono-block sleepers have lower resistance to earthquakes, even if completely conforming to standards, and can cause S-shaped railway faults. As an alternative, the H-type sleepers, recently developed in Türkiye, can offer a solution. Therefore comparative modal analyzes of this new sleeper model have been made. At the end of the study, it was concluded that the model with H-type sleepers was beneficial in shifting the track resonances away from the 2-15 Hz frequency band, where the spectrum magnitudes of the lateral acceleration records of the earthquake were intense. This new model's first three lateral resonance frequencies were 109%, 89% and 72% higher, respectively.

Keywords: 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquakes, Turkey-Syria earthquakes, S-shaped railway faults, Sun kinks, Earthquake-resistant railway superstructure design

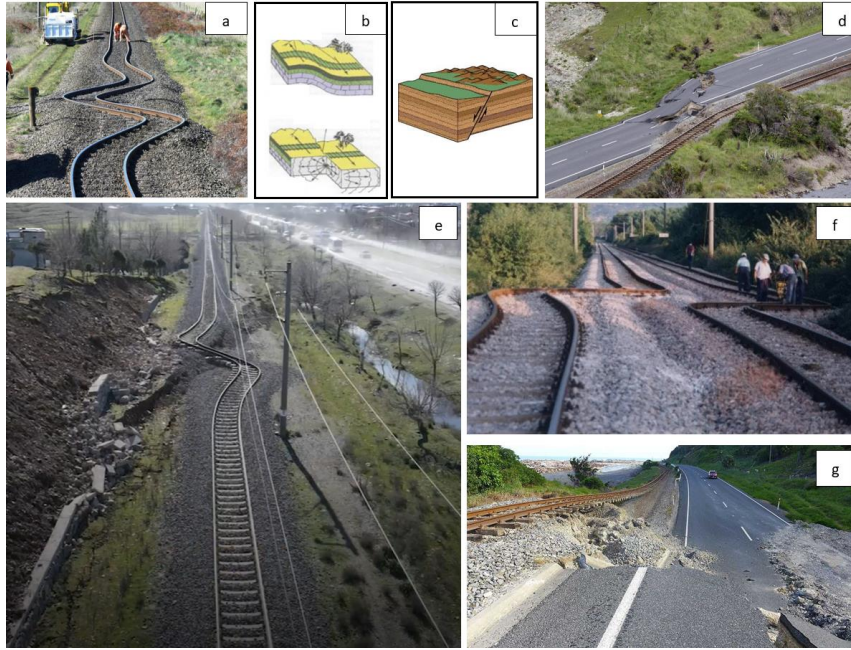
Atıf için/Cite as: F. Çeçen, “6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin demiryolu üstyapısına etkilerinin saha gözlemleri ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 59-72, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1294730

1. Giriş

Demiryollarında, rayları mesnetlemek, tren yüklerini göğüsleyip sönümleyerek diğer bileşenlere güvenli bir şekilde aktarmak ve hattın geometrik formunu sağlayıp milimetrik toleranslar dâhilinde korumak gibi önemli görevleri üstlenen ve demiryollarının “omurgasını” oluşturan çeşitli yapı elemanları kullanılmaktadır. Bu yapı elemanları; geçmişten günümüze ahşap, çelik, betonarme, öngerilmeli beton ve fiber takviyeli polimerler gibi çeşitli hammaddelerden üretildikleri gibi, birçok farklı geometrik formları da geliştirilmiş ve hâlen geliştirilmeye devam etmektedir. Bunun gibi, söz konusu yapı elemanları, demiryollarına monte edilirken, çoğunlukla raylara dik vaziyette ve aralıklı olarak kullanılmış, ancak modern demiryollarının artan ihtiyaçlarını karşılamak üzere kesintisiz tabakalar halinde veya farklı açılardaki çoklu parçaların inovatif birleşimleriyle de kullanım sahası bulmuştur. Tüm bu varyasyonların farklı avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte, esas itibarıyla kendilerinden demiryollarının omurgasını oluşturmaları beklenilmektedir ve bu kritik yapı elemanlarına Türkçe demiryolu literatüründe ortak olarak “travers” ismi verilmektedir [1, 2].

Demiryolu traverslerinin görevleri ve tren yükleri altında servis ömrü müddetince göstermesi istenilen performans kriterleri literatürde geniş ölçekte incelenmiştir [1-3]. Bu çalışmada, traverslerin yaygın olarak bilinen bu görevlerinin haricinde, farklı bir açıdan araştırması yapılacaktır. Bu kritik konu, traverslerin demiryolu hattının “depreme dayanıklılığına” sağlayabileceği potansiyel katkıdır. Demiryolları ulaştırmada stratejik bir role sahip olup, demiryollarının depremlerden sonra işletmeye açık kalabilmesi için hattın tüm bileşenleriyle (hem alt, hem de üstyapısı) depreme dayanıklı olması gerekmektedir. Demiryolu “altyapı” elemanlarının (köprü, tünel, viyadük vb.) depreme dayanıklı tasarımı, standartlarda ve şartnamelerde geniş ölçekte yer almıştır. Öte taraftan, sıkça depremler yaşanan bazı ülkelerde, depremlerin erken tespiti ve seyir halindeki trenlerin emniyetli bir şekilde durdurulması gibi kritik konular için özel birimler görevlendirilmiştir. Örneğin Japonya’da deprem mühendisliği branşında çalışmalar yapmak üzere, Demiryolu Teknik Araştırma Enstitüsü bünyesinde ayrı bir merkez kurulmuştur [4]. Ancak demiryolu “üstyapı” elemanlarının ve özelinde “demiryolu traverslerinin” hattın depreme dayanıklılığını artıracak şekilde tasarımı konusu oldukça bâkir kalmıştır. Bu konuda, standartlarda (EN 13230 serisi vb.) herhangi bir kriter veya öneri mevcut olmadığı gibi, literatürde yayımlanmış herhangi bir çalışmaya da ulaşamamıştır. Oysaki depreme dayanıklı demiryolu hatlarının tasarımında, demiryollarının omurgasını oluşturan bu kritik yapı elemanlarının da önemli roller üstlenmesi mümkündür. Bu konunun günümüze değin, yeterli düzeyde araştırılmamış olmasında çeşitli yanlış kanı ve açıklamalar da etkili olmuştur. Bunlardan ilki, deprem sonrası, özellikle yekpare traversler kullanılan balastlı demiryolu üstyapılarında sıkça görülen “S” şeklindeki salınımların “önlenemez” veya “kaçınılmaz” olduğu yönündeki yanıltıcı bilgilendirmelerdir. Şekil 1.a’da buna dair bir örnek sunulmuştur. Bu fotoğraf, Yeni Zelanda’da meydana gelen bir deprem sonrasında çekilmiştir. Fotoğrafın alındığı referansta [5] geçen açıklamada, söz konusu demiryolunda; termal gerilme alım işlemlerinin yapılmış olduğu, iyi bir balast tabakasıyla travers omuz desteklenmesi sağlandığı, beton traversler ve Pandrol tipi bağlantı sistemiyle güçlü bir çerçeve teşkil edildiği ifade edilmektedir. Nitekim termal gerilmeler altında da benzer hataların (sun kinks) meydana geldiği bilinmektedir. Bu açıklamalar ardından, alınabilecek tüm önlemler alınmasına rağmen, depremler sonrasında meydana gelen bu hataların “kaçınılmaz” olduğu çıkarımında bulunulmuştur. Oysaki bu demiryolu hattında kullanılan konvansiyonel yekpare beton traverslerin depreme dayanıklılık bakımından yetersiz kalabileceği konusu irdelenmemiştir. Buna benzer yanlış/eksik bir bilgilendirme, jeoloji ve jeofizik alanındaki bazı araştırmacılar tarafından dile getirilmektedir. Bu araştırmacılar, söz konusu tipik deformasyonların neredeyse tümünü “fay atımları ve kayaçların deforme olmalarıyla” ilişkilendirmektedir. Şekil 1.b’de [6] bu tezi savunanların, konuyu açıklamakta kullandığı örnek bir tasvir sunulmaktadır. Demiryolu güzergâhının aktif fay hatları üzerinden geçmesi hâlinde, bu tezin geçerli olduğu durumlar -yalnızca bu fay hatları ile ilişkili kısımlarda- söz konusu olabilir. Ancak bu gerçek, her S-tipi deformasyon için geçerli değildir.

Örneğin Şekil 1.a'da örneği verilen ve depremler sonrasında üstyapıda sıkça görülen S-tipi bozulmaların, Şekil 1.b'de tasvir edildiği şekilde meydana gelmediği düşünülmektedir. Çünkü böyle bir durumda, fay tipine bağlı olarak (doğrultu atımlı (Şekil 1.b), normal atımlı (Şekil 1.c) vb.) yalnız hat çerçevesi değil, balast tabakasının ve platformun da (yatay/dikey/verev) hareket etmesi gerekecektir. Nitekim Şekil 1.d-g'de buna dair örnekler sunulmuştur. Örneğin Şekil 1.e'de, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş, Şekil 1.f'de ise 17 Ağustos 1999 Marmara depreminden sonra bölgedeki demiryollarından alınan ve balast tabakası dâhil tüm zeminin yanal (Şekil 1.b'dekine benzer) ve/veya dikey (Şekil 1.c'dekine benzer) hareket ettiği örnekler sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, Şekil 1.a'daki gibi, fay hattı geçmeyen demiryolu kesimlerinde sıkça görülen S-tipi hatalar; yalnızca ray-travers-bağlantı malzemelerinden müteşekkil üstyapı çerçevesinde tezahür etmekte, Şekil 1.d-g'deki gibi –fay hatları/kayaç deformasyonları kaynaklı- S-tipi hatalarda ise üstyapı dâhil tüm platform ve yakın çevre etkilenmektedir.



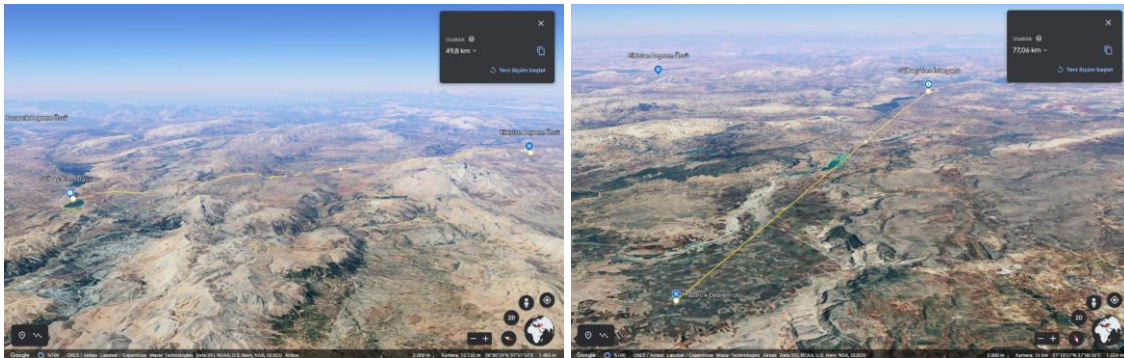
Şekil 1. a) Deprem sonrası yekpare traversli balastlı üstyapılarda sıkça görülen S-tipi hata [5], b) Doğrultu atımlı fayların demiryoluna etkisi [6], c) Normal atımlı fay mekanizması [7], d) Normal/verev fay atımının demiryoluna etkisi [7], e) Normal/verev fay atımının demiryoluna etkisi [8], f) Doğrultu tipi fay atımının demiryoluna etkisi [9], g) Normal/verev fay atımının demiryoluna etkisi [7]

Sonuç olarak, bu çalışma, çeşitli yayın organlarında ve bilimsel araştırmalarda yer edinen bu ve benzeri yanlış kanıların önüne geçilmesi ve depreme dayanıklı, yenilikçi üstyapı elemanları tasarımlarına önayak olunabilmesi için ele alınmıştır. Çalışmada, deprem kaynaklı S-tipi üstyapı salınımlarının esas nedenleri, deprem sonrası saha gözlemleri ve sonlu eleman analizleriyle araştırılmıştır. Çalışma sonunda ise, yekpare traversler kullanılan balastlı demiryolu üstyapılarının depreme karşı düşük dayanıklılığı ve sıkça S-tipi hatalara sebebiyet verebilmesi nedeniyle, alternatif bir travers modelinin (H-tipi) karşılaştırmalı modal analizleri yapılarak, demiryollarının depreme dayanıklılığında traverslerin de aktif rol alabileceği ortaya konulmuştur.

2. Deprem Sonrası Saha Araştırması Yapılan Demiryolu Hat Güzergâhı

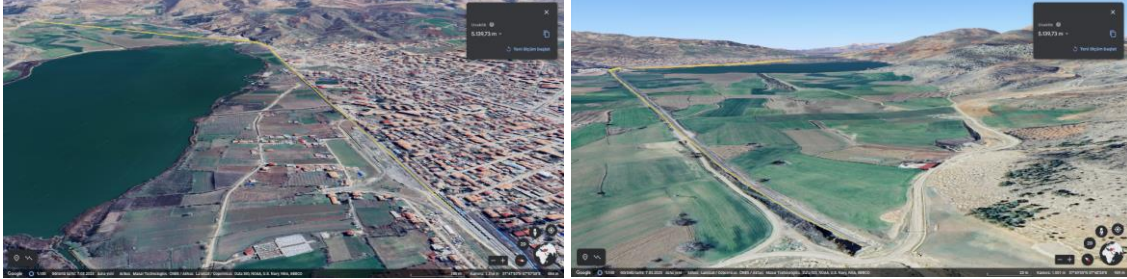
Ülkemizde, demiryollarına yakın lokasyonlarda geçmişten günümüze birçok deprem kayda geçmiştir. Bunun en son örnekleri, 06.02.2023 tarihinden itibaren başlamak üzere günlerce devam eden ve en şiddetlileri Kahramanmaraş ili Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde, yaklaşık 9 saat arayla kayda geçen ve tüm ülkemizi hüzne boğan deprem silsilesidir. AFAD kayıtlarına göre bölgedeki ilk deprem (Pazarcık), Türkiye saati ile (TSİ) saat 04:17:34'te, merkez üssü enlem olarak 37,288

(N), boylam olarak 37,043 (E) koordinatlarında, yüzeyden 8,60 km derinlikte ve 7,7 Mw büyüklüğünde meydana gelmiştir. İkinci en şiddetli deprem ise (Elbistan), saat 13:24:47'de (TSİ), merkez üssü enlem olarak 38.089 (N), boylam olarak 37.239 (E) koordinatlarında, yüzeyden 7.00 km derinlikte ve 7.6 Mw büyüklüğündedir. Söz konusu iki büyük deprem haricinde, ilk şoktan itibaren çeşitli şiddetlerde çok sayıda artçı/münferit deprem de kayda geçmiştir [10]. Meydana gelen bu depremlerin birçoğunun yüzeye oldukça yakın (sığ odaklı) olması nedeniyle, yıkıcı etkileri oldukça yüksek olmuş ve bazı bölgelerde, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018) geçen en yüksek tasarım spektrum şiddetleri dahi aşılmıştır [11]. Örneğin, ilk deprem esnasında, Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesi sınırları içerisinde bulunan 4614 kodlu AFAD istasyonunda ölçülen zemin ivme kaydının Doğu-Batı bileşeninin zirve değeri 2.005 g olup, düşey ivme kaydının zirve değeri ise 1.379 g'dir. Söz konusu ivme kayıtlarının spektrum analizleri incelendiğinde, spektrum şiddetlerinin, özellikle 0,1-0,5 saniye periyodunda (2-10 Hz frekans aralığında), TBDY-2018 yönetmeliğinde esas alınan Deprem Yer Hareketi Düzeylerinin tümünü (DD1/DD2/DD3/DD4) önemli ölçüde geçtiği raporlanmıştır [11]. Ancak analizde kullanılan değerlerin, depremin merkez üssüne yakın bir istasyona ait olduğu ve belirli bir yapısal sönümlenme oranı ($\xi = \%5$) baz alınarak hesaplandığı unutulmamalıdır. Bilindiği üzere, herhangi bir yer hareketi sonrasında, ana kayadan yüzeye doğru hareket eden sismik dalgaların frekans ve genlikleri, içerisinden geçtiği zemin tabakalarının özelliklerine göre değişime uğramaktadır. Dolayısıyla sismik dalgaların zemin içerisindeki ilerleme durumuna ve nihai olarak tesir ettiği yapının sönümlenme düzeyine bağlı olarak, frekans içeriği ve şiddeti değişmekte ve artış azalabilmektedir. (Deprem üssünde açığa çıkan enerji yayıldıkça sönümlenmesine rağmen, yapı-zemin ilişkisine de bağlı olarak, çeşitli frekans bantlarında daha yoğun/zayıf hâle gelebilmektedir.) Örneğin, 6 Şubat 2023 Pazarcık depremi esnasında, Adıyaman ili Merkez sınırlarında bulunan 0201 kodlu AFAD istasyonundan ölçülen kayıtlar incelendiğinde; depremin yatay spektral ivme değerlerinin (daha önce belirtilen 4614 kodlu AFAD istasyonu kayıtlarının aksine), TBDY-2018 yönetmeliğinde DD-1 için verilen değerleri aşmadığı raporlanmıştır. Bu durumun tersi de (depremin zararlı etkilerinin yapı-zemin ilişkisine bağlı artması da) mümkündür. Örneğin, 17 Ağustos 1999 Marmara depreminin merkez üssü Kocaeli Gölçük'te olmasına rağmen yapısal anlamda en çok hasarın alüvyon zemin üzerine kurulu olan Sakarya'nın Adapazarı ilçesinde meydana geldiği ifade edilmektedir [11]. Buna benzer olarak, 6 Şubat 2023 ve devamında meydana gelen deprem silsilesinin en büyük yıkıma neden olduğu yerleşim yerlerinden biri de, Adıyaman ilinin Gölbaşı ilçesidir. Nitekim bölgenin zemininde, göl çökeli yumuşak killerin hâkim olduğu belirtilmektedir [11]. Şekil 2'de Gölbaşı Tren İstasyonunun söz konusu iki büyük depremin kaynak koordinatlarına uzaklıkları, Google Earth® yazılımı üzerinden hesaplanarak verilmiştir. Görüldüğü üzere, bölgenin zemin olarak dezavantajlı olmasının yanı sıra, bölgedeki demiryolu hattı ilk deprem üssüne (Pazarcık, MW 7,7) yaklaşık 77 kilometre, ikinci en büyük depremin kaynağına (Elbistan, MW 7,6) ise yaklaşık 49,8 kilometre mesafededir. Öte yandan AFAD ve İTÜ tarafından, meydana gelen depremler sonucunda, Gölbaşı'nın güneyindeki zemin segmentinin kırıldığı da tespit ve rapor edilmiştir [11, 12].



Şekil 2. Gölbaşı Tren İstasyonunun Pazarcık ve Elbistan deprem üsslerine mesafesi

Bu bağlamda, Gölbaşı ilçesinin daha önce Şekil 1.a'da örneği verilen S-tipi üstyapı salınım örneklerinin incelenmesi açısından uygun olacağı düşünülmüş ve Şekil 3'te Google Earth® yazılımında sarı dolgulu çizgi ile işaretlenen güzergâhta yaya turne yapılmıştır. Gözle muayenesi yapılan bu güzergâh, Gölbaşı Tren İstasyonundan (TCDD Kilometre: 137+800) başlamakta ve kilometre artış istikametinde (Kapıdere İstasyonu yönünde) devam ederek, deprem sonrasında hasar gören demiryolu tüneline kadar yaklaşık 5140 metrelik bir hat kesimini kapsamaktadır.



Şekil 3. Yaya turne hâlinde gözle muayenesi yapılan yaklaşık 5140 metrelik hat güzergâhı

3. Saha Gözlemleri ve Tespit Edilen S-Tipi Üstyapı Hatası Örnekleri

Saha çalışması esnasında belirtilen yaklaşık 5140 metrelik hat güzergâhında, Şekil 1.a'dakine benzer birçok S-tipi salınım örneği tespit edilmiş olup, bazı örnekler, Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Saha gözlemleri esnasında tespit edilen çeşitli S-tipi yanıl üstyapı salınımları

Şekil 4'teki örnekler dikkatle incelenirse, meydana gelen salınımların ray-travers-bağlantı malzemelerinden müteşekkil "hat çerçevesinde" gerçekleştiği ve geriye kalan demiryolu yapı elemanlarında (balast, formasyon vb.), katener direklerinde ve bitişik karayolu platformunda herhangi bir yanal/dikey/verev atılım (fay kırığı veya kayaç deformasyonu kaynaklı) söz konusu olmadığı görülecektir. Şekil 4'te görülen bu hat deformasyonları nedeniyle hat çerçevesinin S-tipi salınımlarla belirli bir noktada birikmesi sonucu, rayların iki taraftan merkeze çekildiği ve sonuçta Şekil 5'te örnekleri verilen zayıf noktalarda (ray kaynağı/cebire birleşimlerinde) bölgesel ayrışmalar olduğu tespit edilmiştir. Saha gözlemleri esnasında tespit edilen bir diğer husus, Şekil 4'te normal hat kesimleri için örnekleri verilen S-tipi salınımların, Şekil 6'da örnekleri sunulduğu üzere, birçok menfezde de sıkça görülmüş olmasıdır. Bu duruma, menfez bölgelerinde, alüvyon akıntısı kaynaklı zemin kalitesinin düşmesi ve/veya menfez üstünde zamanla balast omuz genişliğinin azalması ve/veya deprem dalgalarının bu bölgelerde yığılmalara uğraması neden olarak gösterilebilir. Şekil 7'de ise Gölbaşı İstasyonunda park halindeki bazı kömür vagonlarının hat çerçevesinin yanal atılımları ve ani silkeleme hareketleri sonucu, oldukları yerde devrilmelerine dair görseller sunulmaktadır. Nitekim vagonların bulunduğu yola paralel hattaki raylarda, Şekil 4'tekilere benzer, S-tipi hata örnekleri görülmektedir.



Şekil 5. Saha gözlemleri esnasında tespit edilen cebire bulunu ve ray kaynağı kırılmaları



Şekil 6. Menfez bölgelerinde sıkça rastlanılan S-tipi yanal atılım örnekleri

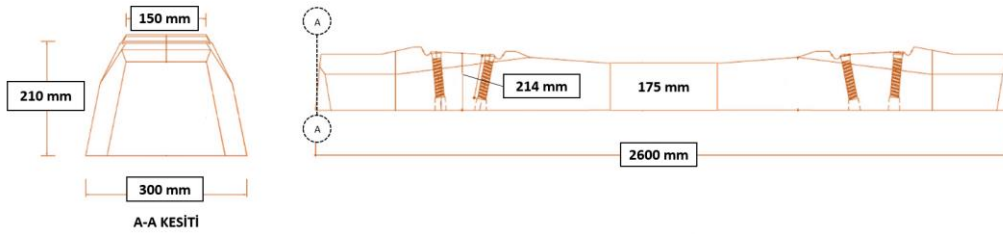


Şekil 7. Gölbaşı İstasyonu yollarındaki yanal atılımlar ve deprem etkisiyle devrilen vagonlar

4. Deprem Etkisindeki Demiryolu Üstyapısının Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi

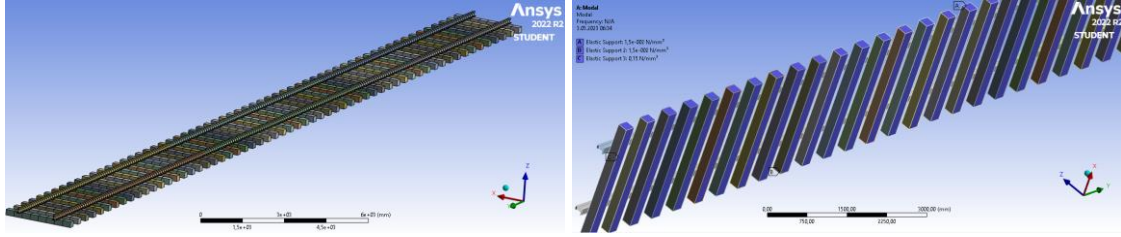
Saha çalışmaları esnasında tespit edilen S-tipi hataların (Şekil 4-7), daha önce Şekil 1.d-g'de örnekleri verilen fay hattı/kayaç deformasyonu kaynaklı veya termal gerilmeler kaynaklı (sun kinks) S-tipi hatalardan farklı olduğu buraya kadar sunulan açıklamalardan anlaşılmaktadır. Bu

hataların, diğerlerinden farklı olarak, dinamik etkiye sahip deprem dalgaları (P, S, Rayleigh, Love vb.) etkisinde meydana geldiği düşünülmektedir. Dinamik yükler altındaki yapı elemanlarının farklı frekanslarda nasıl salınımlar (mode shape) sergileyeceği ise modal analizlerle kolayca tespit edilebilmektedir. Bu bağlamda, bölgedeki demiryolu üstyapısının ANSYS® yazılımının 2022 R2 sürümü kullanılarak sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Bu şekilde deprem etkisiyle meydana gelen S-tipi hatalar, modal analizlerle belirlenecek salınım şablonlarıyla karşılaştırılacaktır. Bölgede kullanılan raylar UIC 60E1 sınıfı olup, ilk etapta 36 metre boyunda imal edilmiştir. Söz konusu rayların, demiryolu hattına döşenmesi (ferşiyatı) esnasında/öncesinde ise çeşitli aralıklarla (≤ 108 metre) kaynaklanması yapılmış (Uzun Kaynaklı Ray, UKR), bu şekilde sahada hem kaynaklı hem de cebireli bağlantı söz konusu olmuştur. Nitekim saha gözlemleri esnasında deprem etkisiyle hem kaynak, hem de cebire noktalarında kırılmalar tespit edilmiştir (Şekil 5). Bölgede kullanılan travers tipi ise yaklaşık 290 kg ağırlığa ve konvansiyonel yekpare geometriye sahip B70-tipi öngerilmeli beton traverslerdir. 1970 yılında Almanya'da geliştirilen [17] bu traverslerin (SpannBetonSchwellen Typ B70) kesit boyunca değişen, ortaya doğru daralan, grift trapez geometrisine ait bazı detaylar Şekil 8'de sunulmuştur. Günümüze kadar, birçok çalışmada incelenen bu traverslerin diğer teknik detaylarına ise literatürden ulaşılabilir [1-3, 13-16].



Şekil 8. B70-tipi öngerilmeli beton traverslerin çeşitli geometrik detayları

Bu çalışmada, bölgedeki hat çerçevesinin karakteristik salınım şablonlarını belirlemek için, Şekil 9'da görülen, 36 metrelik raylardan ve 60 adet traverssten müteşekkil, aliymandaki bir hat modeli kullanılmıştır. Modelde raylar, birbirine paralel ve 1435 mm aralıktadır. Traversler modellenirken ise, Şekil 8'deki grift geometri yerine, büyük ölçekli sonlu eleman modellemelerinde, literatürde sıklıkla uygulandığı üzere, sadeleştirilmiş bir geometri kullanılmıştır. Bu amaçla, Şekil 9'da görülen dikdörtgen prizmalar (207 mm yükseklik, 2600 mm uzunluk, 225 mm genişlik) kullanılmıştır. Bu şekilde, sahadaki traverslerle yaklaşık eşit kütle (290 kg), hacim ($0,12 \text{ m}^3$) ve ray mesnedi altı en kesit alanı ($4,7 \times 10^{-2} \text{ m}^2$) sağlanmıştır. Öte yandan, traverslerin öz frekansları ($> 80 \text{ Hz}$), bu çalışma kapsamında analiz edilen deprem kayıtlarına ait frekans bandının ($< 30 \text{ Hz}$) dışındadır. Neticede sonlu eleman modellemesinde kullanılan bu sadeleştirilmiş geometri, B70-tipi traversler gibi Karosel metoduyla üretilen grift geometrili yekpare traverslerle eşdeğer ve uzun hat (long-line) yöntemiyle üretilen sade, dikdörtgen kesitli diğer yekpare traverslerle de benzerdir. Bu bakımdan, demiryolu hattının yanal salınımlarının ön incelemesinin yapıldığı bu çalışma için yeterli görülmüştür. Modelde, traversler, sahadaki gibi, merkez eksenleri arasında 60'ar cm'lik mesafelerle konumlandırılmıştır. Traversler ve rayların, sahadakine benzer bağlantısının sağlanması için ise, her bir traversin 2'ser ray mesnedi göz önünde bulundurularak 60 adet travers için toplamda 120 sabit mesnet (bonded/ fixed contact) tanımlaması yapılmıştır. Modelde sonlu eleman boyutu (mesh element size) 150 mm olarak uygulanmıştır. Hazırlanan modelin duyarlılık (sensivity) analizlerine göre, analize tabi tutulan hat uzunluğu-travers aralığı (eker)-travers betonu birim hacim ağırlığı-travers betonu elastisite modülü arttıkça veya sonlu eleman boyutu-yanal balast mesnetleme rijitliği azaldıkça analizler sonucunda ulaşılan rezonans frekansları düşmektedir. Ancak hat çerçevesinin analiz edilecek karakteristik modal salınım şablonları aynı kalmaktadır. Dolayısıyla, ileride uygulanacak karşılaştırmalı analizlerde de aynı parametreler kullanılacağından, modeldeki hat uzunluğu ve diğer parametreler, bu ön-çalışma için yeterli görülmüştür. Hazırlanan modelin sonlu eleman kalitesi, literatür doğrultusunda [13, 14], Skewness kriteri bakımından analize tabi tutulmuş ve elde edilen 0,54 (ortalama) ve 0,95 (en fazla) değerlerinin uygun olduğu da belirlenerek analizlere bu şekilde devam edilmiştir.

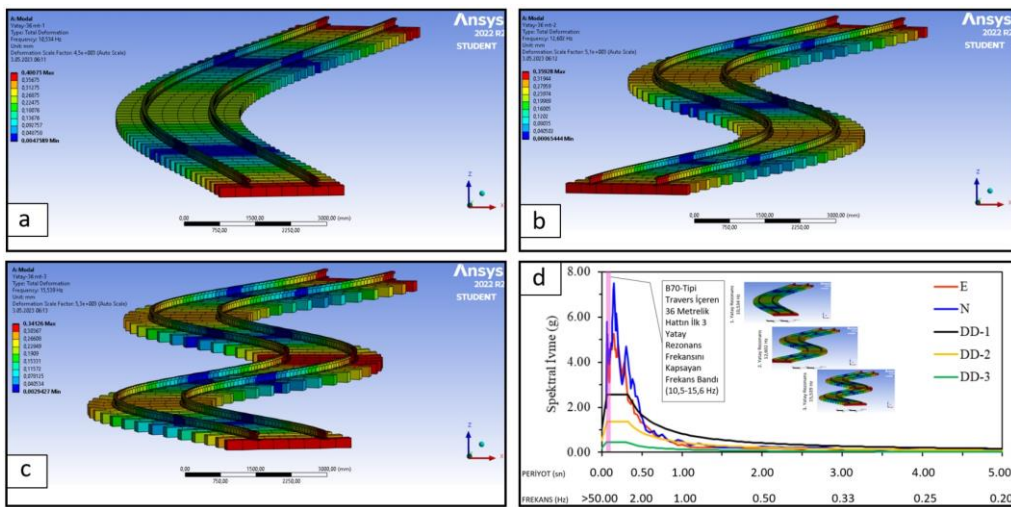


Şekil 9. Gölbaşı mücavirindeki demiryolu hattının ANSYS® sonlu eleman modeli

Hazırlanan modelde, travers betonarme malzeme parametreleri; birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 , elastisite modülü 37 GPa ve Poisson oranı $0,20$ olarak tanımlanmıştır. Rayların modellemesinde ise 7800 kg/m^3 birim hacim ağırlığı, 210 GPa elastisite modülü ve $0,30$ Poisson oranı değerleri kullanılmıştır. Şekil 9'da (sağda) ayrıca bölgedeki balastlı hattın modellemesi esnasında kullanılan elastik mesnet tanımlamaları görülmektedir. Bu modellemede, literatür doğrultusunda [14], travers alt yüzeyi ile temas eden kısımlarda $0,15 \text{ N/mm}^3$, yan yüzeyleriyle temas eden kısımda ise $0,015 \text{ N/mm}^3$ balast rijitliği (elastic support stiffness) değerleri kullanılmıştır. Deneysel olarak elde edilmeyen bu yaklaşık değerler, ileride uygulanacak karşılaştırmalı analizlerde de aynı parametreler kullanılacağından, bu çalışma için yeterli görülmüştür. Tüm bu ayarlamalar ardından, ANSYS® Modal Analysis modülü kullanılarak, söz konusu demiryolu hattının ilk 3 yatay rezonansına ait frekans değerleri belirlenerek Tablo 1'de, ilgili modal salınım şablonları ise Şekil 10.a-c'de sunulmuştur. Şekil 10.d'de ise, 1. Giriş kısmında değinilen, Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesi sınırları içerisinde bulunan 4614 kodlu AFAD istasyonunda ölçülen zemin ivme kaydının yanal (Doğu-Batı (E) ve Kuzey-Güney (N)) bileşenlerinin spektral ivme analizleri, referanstaki [11] grafiğin yatay eksenine frekans bilgileri eklenerek verilmiştir. Bu grafikte ayrıca, Şekil 10.a-c'deki demiryolu rezonans frekanslarının denk geldiği bölge, pembe dolgulu alanla işaretlenerek, örnek bir karşılaştırma yöntemi sunulmuştur.

Tablo 1. Konvansiyonel yekpare (B70-tipi) ve yeni nesil H-tipi geometrili traversler içeren hat kesimlerin ANSYS® modal analizleri sonucunda elde edilen yatay rezonans frekanslarının karşılaştırılması

Parametre	B70-Tipi Yekpare Travers İçeren Model	Yeni Nesil H-tipi Travers İçeren Model	Artış Yüzdesi
1. Yatay Rezonans	10,534 Hz	22,017 Hz	% 109
2. Yatay Rezonans	12,602 Hz	23,815 Hz	% 89
3. Yatay Rezonans	15,539 Hz	26,653 Hz	% 72

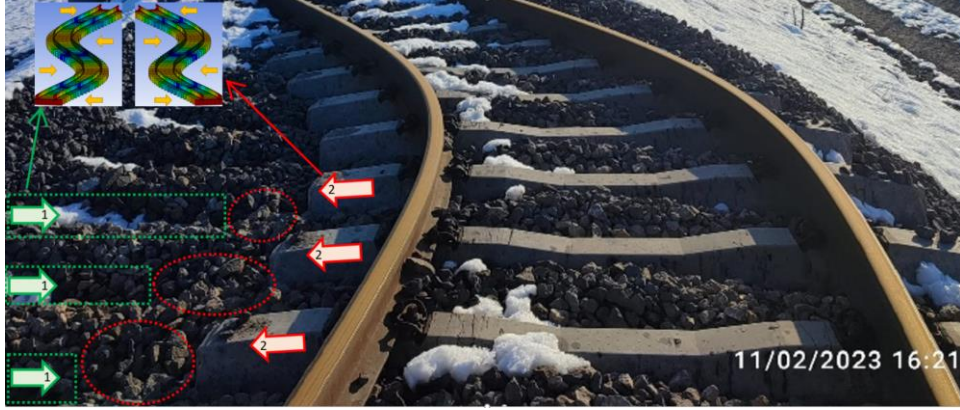


Şekil 10. Gölbaşı mücavirindeki demiryolu hattının simülasyonu için hazırlanan 36 metrelik sonlu eleman modelinin; a) Birinci yatay rezonansına ait salınım şablonu, b) İkinci yatay rezonansına ait salınım şablonu, c) Üçüncü yatay rezonansına ait salınım şablonu, d) Belirlenen ilk 3 rezonansın, 4614 kodlu AFAD istasyonu kaydının spektrum analizinde denk geldiği bölge (pembe dolgulu alan)

Şekil 10.d’de sunulan analiz, meydana gelen dinamik deprem yükünün, hattın rezonans frekanslarını güçlü bir şekilde barındırdığını “örnekleme” adına sunulmuştur. Ancak bu örnek, daha önce 1. Giriş kısmında sunulan açıklamalar doğrultusunda, zemin-yapı ilişkisinin değişkenliği nedeniyle, bölgedeki tüm demiryolu hattı için geçerli değildir. Bununla birlikte, literatürdeki birçok AFAD İstasyonu kayıt analizinde [11] de, benzer şekilde, 2-15 Hz aralığında ve yerine göre TBDY-2018 tasarım depremi spektrum şiddeti değerlerini aşan spektral şiddet değerleri söz konusudur ve bölgedeki demiryolu hattının yatay rezonans frekanslarının önemli bir kısmını kapsamaktadır. Bir diğer husus, bölgedeki demiryolu hattının analiz edilen ilk 3 yatay rezonansı dışında başka birçok rezonanslarının da bulunmasıdır (4., 5., 6. vb.). Ancak bu rezonanslar, söz konusu pembe dolgulu alanının sol kısmına (frekans artış yönüne) denk gelmektedir. Dolayısıyla hazırlanan 36 metrelik model için, analiz edilen depremlerin yüksek derecede etkili olduğu frekans bandı dışında kalan bu rezonanslar, bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Buna göre; deprem sonrası demiryolu üstyapısında görülen her “S-tipi” bozulmanın yalnızca fay atımları ve deforme olmuş kayalarla ilişkilendirmesinin doğru olmadığı, buna dair bir emare (Şekil 1.d-g’dekine benzer) söz konusu olmadığında ise Şekil 10.a-c’de örnekleri verilen modal salınımların etkin olduğu düşünülmektedir. Nitekim saha analizi yapılan demiryolu hat kesiminin herhangi bir noktasında balast tabakasının, hat platformunun, katener direklerinin veya karayolu platformunun Şekil 1.d-g’deki gibi yanal/dikey/verev atılıma uğradığı gözlenmemiştir. Bunun aksine, yalnız hat çerçevesinin birçok noktada S-tipi atılımlar yaptığı tespit edilmiş ve örnekleri Şekil 4-7’de sunulmuştur.

Bir diğer konu, Şekil 10.a-c’de sunulan yatay rezonansların bir veya birkaçının, yalnızca depremler esnasında değil, normal servis yükleri altında da gerçekleşmesi mümkündür. Bu durum, yanal etkilerin arttığı durumlarda (kurplarda vb.) daha bariz meydana gelmektedir. Ancak tesir eden yüklerin yanal bileşenlerinin deprem etkisine nazarla oldukça düşük şiddetli olması nedeniyle, meydana gelen salınımlar çoğunlukla “elastik” sınırlar içerisinde kalmakta veya yıllar içerisinde etkisini gösteren bu minimal etkiler, ilk etapta kolayca tespit edilememektedir. Deprem sonrası saha analizi yapılan hat kesiminde ise, hat standartlara uygun inşa edilse dahi, deprem üssünde yanal bileşenlerinin şiddeti 2 g’ye varan ve kil ağırlıklı Gölbaşı zemin şartlarının etkisiyle zemin-yapı etkileşimi sonucu spektral etkisi artabilecek çok daha büyük bir dinamik kuvvet söz konusudur. Bu olağanüstü etki altında, hat çerçevesinin modal salınımlarının arttığı ve sonuçta hattın elastik deformasyon sınırlarını aşan (plastik) salınımlara maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, elastik deformasyon sınırlarını aşan dinamik yükler altında kalan yapı elemanlarının sönümlenme oranları ve rezonans frekansları değiştiğinden [15, 16], hat çerçevesinin belirli aşamadan sonra “rezonanstan çıkması” söz konusudur.

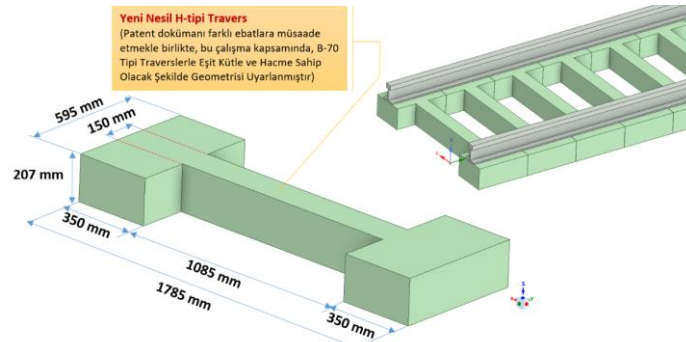
Nitekim Şekil 4-7’deki balast tabakasındaki dağılımlar yakından incelendiğinde, S-tipi salınımların bir veya birkaç adet ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Örneğin Şekil 4’teki görsellerden sonuncusu, Şekil 11’de yakınlştırılarak sunulmuştur. Şekil 11’de görüldüğü üzere, hattın incelenen bölümü, sağa doğru (yeşil renkli 1 numaralı oklarla gösterilen yönde) salınım yaparken, traversler, balastı sağa doğru sürüklemiş ve arkalarında kalan balast tabakasında, yeşil renkli dikdörtgen kesik çizgili işaretlemeyle gösterilen boşluklar oluşmuştur. Bu salınım ardından, rezonans devam ederken, hattın incelenen bölümü, bu kez sola doğru (kırmızı renkli 2 numaralı oklarla gösterilen yönde) salınım yapmış, traversler, balast tabakasını bu kez sola doğru sürüklemiştir. Ancak bu son salınım esnasında deprem etkisi sona ermiş veya hat rezonanstan çıkmıştır. Bu durum, traverslerin sol omuz başlarında biriken ve kırmızı renkli dikdörtgen kesik çizgili işaretlemeyle gösterilen lokal balast öbeklerinden anlaşılmaktadır. Hat, depremden önceki haline dönmeden ve yeşil kesik çizgili alanları doldurmadan salınım sona ermiştir. Bu salınım “silsilesi” ise, Şekil 4-7’de örnekleri sunulan bu “S-tipi salınımların” fay kırıkları/kayaç deformasyonları veya termal gerilme kaynaklı “tekil” salınımlardan kaynaklanmadığını ispatlamaktadır. Aksine, sonlu eleman modellemesi ile örtüşen, rezonans etkisiyle meydana gelen çok sayıdaki modal salınımı işaret etmektedir.



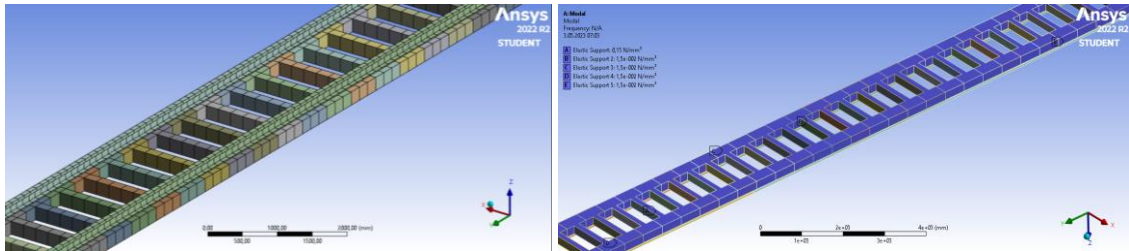
Şekil 11. Saha gözlemleri esnasında tespit edilen S-tipi yanall üstyapı salınımlarının yakından incelenmesi

5. Yeni Nesil H-tipi Demiryolu Traverslerinin Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi

Önceki bölümde sunulan sonlu eleman analizleriyle, Şekil 1.a ve Şekil 4-7’de örnekleri verilen deprem kaynaklı S-tipi demiryolu üstyapısı salınımlarının esas nedenleri ortaya konulmuştur. Buna göre, Şekil 1.d-g’deki gibi, aksine bir emare (fay kırıkları vb.) tespit edilmediği müddetçe, bu tipik salınımlar, hat çerçevesinin “modal performansı” ile ilgilidir. Üstelik Şekil 1.d, e, g’den görüldüğü üzere, dikey/verev atımlı faylarda da bu modal salınımlar görülebilmektedir. Bu bölümde ise, söz konusu salınımların demiryolu traverslerinin modal performansları geliştirilerek minimize edilip edilemeyeceği araştırılacaktır. Bu esnada ise, ülkemizde yakın zamanda geliştirilerek, Türk Patent Kurumunda (2019/20386 Başvuru No) incelemeye alınan; “H-tipi travers” modeli analize tabi tutulacaktır. Söz konusu travers modelinin hak sahibi Erciyes Üniversitesi olup, Buluşçuları Erciyes Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Bekir AKTAŞ ve bu çalışmanın yazarıdır. Buluşa ait patent dokümanının daha avantajlı ebatlara müsaade etmesine rağmen, yeni tip traverslerin geometrisi, H-tipi travers ağırlığı ve hacmi, B70-tipi traverslerle eşit (290 kg ve 0,12 m³) olacak şekilde uyarlanmış ve boyutları Şekil 12’de sunulmuştur. Bu yeni tip traversleri içerecek şekilde revize edilen sonlu eleman modelinde kullanılan 36 metrelik raylar ve toplamda 60 adet H-tipi travers ise Şekil 13’te sunulmuştur.

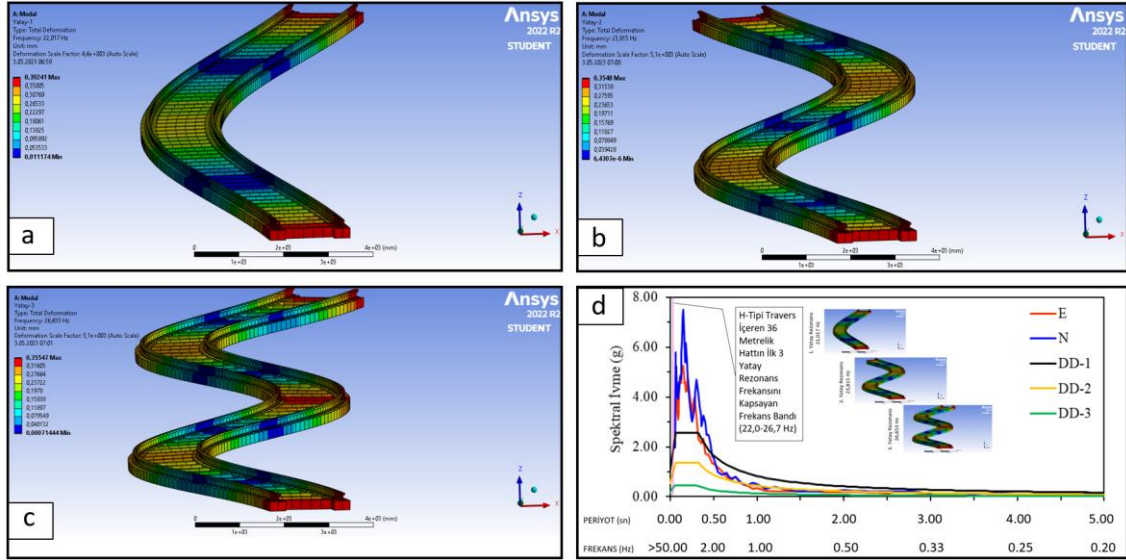


Şekil 12. Sonlu eleman modelinde kullanılan yeni nesil H-tipi traverslerin çeşitli geometrik boyutları



Şekil 13. Yeni nesil H-tipi traversler içeren sonlu eleman modeli

Öte taraftan, H-tipi traverslerin patent dokümanında geçen hammaddeleri (beton, donatı vb.) bakımından olumlu yönde birçok avantajları olmasına rağmen, bu çalışmada yalnızca yeni-nesil geometrisinin sağlayacağı avantajlar incelemeye tabi tutulacaktır. Bu bağlamda kullanılan materyal parametrelerinden (elastisite modülü, Poisson oranı, birim hacim ağırlığı vb.) sonlu eleman boyutuna (150 mm) ve mesnetleme modellemesine (balast rijitliği) kadar tüm şartlar daha önce analize tabi tutulan B70 tipi traversli hat kesimi ile eşit tutulmuştur. Yapılan ayarlamalar ardından ANSYS® Modal Analysis modülü kullanılarak, söz konusu yeni nesil H-tipi traversli demiryolu hattının ilk 3 yatay rezonansına ait frekans değerleri belirlenerek Tablo 1’de, salınım şablonları ise Şekil 14.a-c’de sunulmuştur. Buna göre, H-tipi traverslerin her 3 rezonans bakımından da avantajlar sağladığı görülmektedir.



Şekil 14. Yeni nesil H-tipi traversler içeren 36 metrelik sonlu eleman modelinin; a) Birinci yatay rezonansına ait salınım şablonu, b) İkinci yatay rezonansına ait salınım şablonu, c) Üçüncü yatay rezonansına ait salınım şablonu, d) Belirlenen ilk 3 rezonansın, 4614 kodlu AFAD istasyonu kaydının spektrum analizinde denk geldiği bölge (pembe dolgulu alan)

Şekil 14.d’de ise, daha önce Şekil 10.d’de sunulduğu gibi, 4614 kodlu AFAD istasyonunda ölçülen zemin ivme kaydının yanal bileşenlerinin spektral ivme analizleri sonuçları [11] ile H-tipi traversler içeren 36 metrelik sonlu eleman modelinin ilk 3 yatay rezonans frekansının bu spektrum eğrisi içerisinde denk geldiği kısım (pembe dolgulu alanla) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, H-tipi geometriye sahip yeni tip traverslerin kullanımı, pembe dolgulu demiryolu rezonans frekanslarını gösteren alanın, B70 tipi traversler kullanılan hatta göre, sola doğru kaymasını (rezonans frekanslarının artmasını) sağlamıştır. Bu bölge ise depremlerin yoğun olarak etkin olduğu 2-15 Hz aralığı dışındadır ve spektral ivme şiddeti oldukça düşüktür (Şekil 11.d için yaklaşık 6 kat daha düşüktür). Öte yandan, analiz edilen hat kesimi uzunluğu (36 metre) artsa ve bu nedenle elde edilen rezonans frekansları kısmen düşse de (pembe dolgulu alanlar sağa doğru genişlese de), yeni nesil H-tipi traversler kullanılan hatların rezonans frekansları (1., 2., 3., 4., 5., 6. vb.), genel olarak, konvansiyonel yekpare (B70 vb.) traverslere göre, spektral ivme şiddeti daha düşük alanlara denk gelecek ve/veya daha az sayıda rezonans frekansı tahrik edilmiş olacaktır. (Örneğin 1. rezonans bu bölgeye denk gelse de, diğer 2., 3., 4. vb. rezonanslar bu bölgenin dışında kalacaktır.) Yapı elemanlarının rezonans frekanslarının (tümünün veya bir kısmının), kendisine tesir eden dinamik yüklerin frekans kapsamı dışına çıkarılması, modal tasarım uzmanlarınca uygulanan en önde gelen önlemlerden biridir [14, 18]. Buna göre H-tipi traverslerin, demiryolu üstyapısının depreme dayanıklılığını artırmak adına önemli avantajlara sahip olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan mesnetleme modeli denemeleriyle (yanal balast desteklemeleri aktif ve deaktif edilerek) bu farklılığın nedeni araştırılmış, bu analizlere göre, H-tipi traverslerin bu

yüksek rezonans frekanslarına, rayların altında aralıksız bir şekilde devam eden geometrisi sayesinde ulaştığı görülmüştür. Bu yeni nesil geometri sayesinde H-tipi traverslerin yanal aderansı artmakta, balasta daha iyi kenetlenmekte ve neticede demiryolu üstyapısının (deprem/normal işletim esnasında) yanal stabilitesi daha yüksek sonuçlanmaktadır.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, 6 Şubat 2023 tarihinden itibaren Kahramanmaraş ve çevresinde meydana gelen depremler akabinde, Gölbaşı İstasyonu itibariyle yaklaşık 5140 metrelik demiryolu hat kesimi, yaya turne halinde gözle muayene edilmiş ve üstyapıda çeşitli S-tipi hatalar tespit edilmiştir. Bu saha çalışması ardından, söz konusu demiryolu hattı, ANSYS® sonlu eleman yazılımında modellenerek “modal analizlere” tabi tutulmuştur. Analizler sonucunda belirlenen yanal rezonans frekansları, bölgedeki AFAD İstasyonu kayıtlarının spektral ivme analizleriyle karşılaştırılmış ve meydana gelen deprem etkilerinin bölgedeki demiryolu hattının yatay rezonans frekanslarının önemli bir kısmını kapsadığı belirlenmiştir. Nitekim, sonlu eleman analizleriyle elde edilen yanal rezonans salınım şablonları da, saha çalışmasında tespit edilen salınımlarla örtüşmektedir. Neticede, balastlı yekpare traversli hat kesimlerinde, depremler sonrasında (standartlarda geçen tüm önlemler alınsa dahi) sıkça görülen bu hataların, fay hattı/kayaç deformasyonu veya termal gerilmeler kaynaklı benzer S-tipi hatalardan farklı oldukları, bu salınımların hattın “modal performansı” ile ilgili olduğu tespit ve izah edilmiştir. Bu önemli tespit ardından, konuya alternatif bir çözüm de sağlayabilmek adına araştırmalar devam ettirilmiştir. Bu bağlamda, ülkemizde son yıllarda geliştirmeye alınan, yeni H-tipi geometriye sahip traverslerin, söz konusu konvansiyonel yekpare (mono-block) geometrili traverslerle karşılaştırmalı modal analizleri yürütülmüş, bu yeni nesil traverslerin demiryollarının depreme dayanıklılığını artırmak adına sağlayabileceği faydalar araştırılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre; yeni tip traversler, üstyapı çerçevesinin 1. yatay rezonans frekansında %109, ikinci yatay rezonans frekansında %89, üçüncü yatay rezonans frekansında ise %72 artış sağlayabilmektedir. Yapı elemanlarının rezonans frekanslarının, kendisine tesir eden dinamik yüklerin frekans kapsamı dışına çıkarılması, modal tasarım uzmanlarınca uygulanan en yaygın önlemlerden biridir. Bu bağlamda, yeni tip traverslerin demiryolu üstyapısının depreme dayanıklılığını artırmak bakımından önemli bir potansiyeli söz konusudur. Yapılan sonlu eleman analizlerine göre, yeni tip traversler, bu avantaja, rayların altında aralıksız bir şekilde devam eden geometrisi sayesinde ulaşmaktadır. Bu sayede balasta daha iyi kenetlenmekte ve çok daha yüksek frekanslı dinamik etkilere kadar rezonansa uğramayarak, hat stabilitesini daha fazla koruyabilmektedir.

Çalışma esnasında yürütülen gözlemler ve sonlu eleman duyarlılık analizleriyle ulaşılan diğer tali sonuçlara göre ise; kaynaklı ray uzunluğu, travers aralığı (eker), travers betonu birim hacim ağırlığı ve travers betonu elastisite modülü parametreleri, hattın yanal rezonans frekansları ile ters orantıya sahiptir. Yani bu parametrelere ait değerler arttıkça hattın yanal rezonans frekans değerleri düşmektedir. Bu ise depreme karşı dayanıklılık bakımından, genel anlamda, istenilmeyen bir husustur. Öte yandan yanal balast mesnetleme rijitliği ise hattın rezonans frekansları ile doğru orantıya sahiptir. Yani bu değer arttıkça hattın yanal rezonans frekansları artmaktadır. Bu ise depreme karşı dayanıklılık bakımından önemli bir avantajdır. Bu değerlerin düşüş gösterdiği bazı bölgelerde (menfezler vb.) S-tipi salınımların arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte tüm bu parametrelerin, deneysel veriler, demiryoluna montaj, işletme koşulları ve fayda/maliyet analizleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmekte olup, bu geniş çaplı araştırmalar bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Dolayısıyla bu konuların, ilerleyen çalışmalarda geniş ölçekte araştırılmaları önerilir.

Bu çalışmada, benzer çalışmaların artırılarak, daha üstün nitelikli milli demiryolu travers modellerinin geliştirilmesine ön ayak olmak amaçlanmıştır. Ülkemiz gibi sıkça depremler

yaşanan Japonya’da, demiryolu konusunda teknik araştırmalar yapmak üzere, Demiryolu Teknik Araştırma Enstitüsü (RTRI) ve bunun bünyesinde de, deprem mühendisliği branşında özel araştırmalar yapmak üzere ayrı bir merkez kurulmuştur. Öte yandan, günümüze kadar dünyadaki büyük-küçük birçok ülke tarafından, sahip oldukları madeni ve endüstriyel kaynaklara ve demiryolu işletme koşullarına uygun olarak, onlarca çeşitli travers modeli geliştirilmiş ve hâlen geliştirilmeye devam etmektedir. Hâlbuki ülkemiz demiryollarında günümüze kadar kullanılan travers modellerinin bilindiği kadarıyla tamamı (B55, B58, B70, B07, B320 vb.) yurt dışında dizayn edilmiştir. Bu traversler çeşitli bakımlardan üstün niteliklere haiz olsa da, ülkemizde geliştirilecek alternatif travers modellerinin, depreme dayanıklılık gibi ülkemiz açısından ayrıca önem arz eden şartlara daha fazla uygunluk sağlayabileceği bu çalışmadan anlaşılmaktadır.

Bu çalışmanın kapsamı dışında olmakla birlikte demiryolu üstyapısının depreme dayanıklılığını artırmak bakımından ileride araştırılması önerilen diğer konu başlıkları ise şöyle sıralanabilir:

- Yanal hat stabilitesini artıracak diğer travers/hat modelleri (döşeme tipi traversler (slab tracks vb.), dikey çıkıntılı traversler (nailed sleepers), balastsız üstyapılar vb.),
- Uzun kaynaklı (UKR) ve sürekli/sonsuz kaynaklı ray (SKR) uygulamalarının “üstyapının yanal rezonans frekanslarını düşürücü etkisini” önleyecek özel önlemler (belirli aralıklarla uygulanacak özel conta/ray birleşimleri vb.),
- Deprem dalgalarının demiryoluna erişmesini önleyecek/etkilerini indirgeyecek önlemler (travers altı pedler (under sleeper pad, USP), çeşitli balast altı geotekstiller, platform kenarında-hatta paralel devam eden tabakalar/boşluklar, vb.).

Teşekkür

Yazar, bu çalışmadaki destek ve katkılarından dolayı TCDD Sivas 4. Bölge Müdürlüğü ve Malatya 5. Bölge Müdürlüğü yetkili ve personellerine ve ayrıca Erciyes Üniversitesi öğretim üyeleri Prof. Dr. Bekir AKTAŞ ve Dr. Ahmet ÖZBAYRAK’a teşekkürlerini sunar. Ayrıca çalışmayı, depremler etkisiyle bölgede hayatını ve sevdiklerini kaybeden vatandaşlarımıza, bölge halkının yeniden normal hayatlarına dönebilmeleri için geceli-gündüzlü çalışan Devlet ve sivil toplum kuruluşu yetkililerine-çalışanlarına ve ülkemiz içinden-dışından küçük-büyük yardımlarını esirgemeyen tüm hayırseverlere ithaf eder.

Kaynakça

- [1] F. Çeçen, B. Aktaş, “Yeni Nesil Demiryolu Traversleri ve Yerli FRP Donatı Kullanımının Deneysel Araştırması,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 13, pp. 53-64, Ocak 2021, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>
- [2] F. Çeçen, “Demiryolu Traverslerinde Yerli Lamine CFRPU Donatı Kullanımının Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2023
- [3] F. Çeçen, “Karbon – fiber donatıyla öngerilmesiz monoblok demiryolu beton traversi geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye, 2019
- [4] “Center for Railway Earthquake Engineering Research,” [Online]. Available: <https://www.rtri.or.jp/eng/rd/division/rd61/> [accessed May 04 2023].
- [5] D. Petley, “Distorted railway lines in the Christchurch Earthquake,” 2011, [Online]. Available: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2011/03/08/distorted-railway-lines-in-the-christchurch-earthquake/> [accessed May 04 2023].
- [6] H. G. Demiralp, “Deprem Kanalizasyon Ve İçmesuyu Sistemlerine Etkisi,” Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi, 2017. Available: <https://www.ilbank.gov.tr/userfiles/files/uzmanliktezleri/14704.pdf>
- [7] Quora, “What happened to the road in normal fault?,” [Online]. Available: <https://www.quora.com/What-happened-to-the-road-in-normal-fault?> [accessed May 04 2023].
- [8] TRT Haber, “Deprem tren raylarının bükülmesine sebep oldu,” 2023, [Online]. Available: <https://www.trthaber.com/video/depem-tren-raylarinin-bukulmesine-sebep-oldu-66473.html> [accessed May 04 2023].

- [9] T. Cook, “Variations in Creep Along One of Earth’s Most Active Faults,” 2019, [Online]. Available: <https://eos.org/research-spotlights/variations-in-creep-along-one-of-earths-most-active-faults> [accessed May 04 2023].
- [10] T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), “06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 Depremlerine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu,” 9 Şubat 2023, [Online]. Available: https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmaras%20%20Depremleri_%20On%20Değerlendirme%20Raporu.pdf [accessed May 04 2023].
- [11] Düzce Üniversitesi-Sakarya Üniversitesi-Karadeniz Teknik Üniversitesi-Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi-Sivas Cumhuriyet Üniversitesi-Giresun Üniversitesi, “6 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık Mw=7.7 ve Elbistan Mw=7.6) Depremleri ve Artçıları, Saha Gözlemlerini, Yapısal Hasarları ve İleriye Yönelik Önerileri İçeren Değerlendirme Raporu,” Nisan 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/370003182_Kahramanmaras_Deprem_Raporu [accessed May 04 2023].
- [12] İstanbul Teknik Üniversitesi, “6 Şubat 2023 04.17 Mw 7.8 Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu), Hatay (Kırıkhan), 13.24 Mw 7.7 Kahramanmaraş (Elbistan, Nurhak-Çardak) depremleri ön inceleme raporu,” Şubat 2023. [Online]. Available: <https://www.izmimod.org.tr/haberler/itu-06-subat-2023-depremi-on-inceleme-raporu> [accessed May 04 2023].
- [13] F. Çeçen, B. Aktaş, “Lamine CFRP Donatılı Traverslerin Deneysel ve Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 14, pp. 26-38, Temmuz 2021, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.869946>
- [14] F. Çeçen, B. Aktaş, “Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 127, ID: 105471, Eylül 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105471>
- [15] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. Ş. Öztürk, M. B. Navdar, “Comparative modal analysis of B70 and LCR-6 type railway sleepers after repeated impact loads,” *Construction and Building Materials*, vol. 336, ID: 127563, Haziran 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127563>
- [16] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, “Behaviour of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers under repeated impact loads,” *Construction and Building Materials*, vol. 319, ID: 126151, Şubat 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126151>
- [17] “Bahnschwelle,” [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnschwelle> [accessed May 17 2023].
- [18] F. Çeçen, A. Özbayrak, B. Aktaş, “Experimental modal analysis of fly ash-based geopolymer concrete specimens via modal circles, mode indication functions, and mode shape animations,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 137, ID: 104951, Mart 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104951>

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD’nin çeşitli birimlerinde 16 yıldan fazla hizmet veren yazar, doktora eğitimini Erciyes Üniversitesi Ulaştırma Bilim Dalında tamamlamıştır. İlgilinin, milli demiryolu traversleri geliştirilmesi amaçlı ar-ge ve patent çalışmaları devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.