



Yeni Yeşil-Travers Modelinin B70 Tipi Öngerilmeli Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN*¹, Bekir AKTAŞ²

¹ TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

*ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 22.04.2022, Kabul/Accepted: 13.08.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Günümüzün yüksek hız ve tonajlı, yoğun işletim şartları altında demiryolu yapı elemanları sıklıkla rezonans hasarlarına uğramakta ve fiili servis ömürleri kısalmaktadır. Ayrıca dünyada mevcut çelik donatılı, öngerilmeli veya öngerilmemiş beton travers modelleri, öngerilme işlemi veya etriye kullanım zorunluluğu getirmektedir. Bunun dışında öngerilmeli tipler, üretimin hemen ertesi gün gerdirme kuvvetine maruz kalacağından, yüksek erken dayanımlı beton ve çevresel zararı yüksek çimento kullanım zorunluluğu da getirmektedir. Tüm bu sebeplerle önemli düzeyde mali ve çevresel zararlar doğmaktadır. Bu çalışmada, demiryolu traverslerinin sönümlenme oranında ve karbon emisyonunda iyileştirme sağlanması için, ileri fonksiyonel bir malzeme olan yerli lamine karbon-fiber takviyeli poliüretan plakalar ve düşük dozajlı CEM II sınıfı çimento kullanılarak yeşil travers olarak adlandırılan yeni bir travers modeli araştırılmıştır. Çalışma sonunda yeni tip traverslerde kullanılan beton hammaddenin karbon emisyonunun yaklaşık %50 daha düşük olduğu, standartlarda istenilen ray mesnedinde statik yüklemeli pozitif moment tayini test şartlarını sağladığı ve 1., 2. ve 3. dikey rezonans frekanslarına ait transfer fonksiyonu zirve değerlerinde sırasıyla %87, %37 ve %36 oranında düşüş elde edildiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu traversi, Rezonans frekansı, Sönümlenme oranı, Karbon fiber takviyeli polimer

Comparative Investigation of New Green Sleeper Model with B70 Type Prestressed Sleepers

Abstract: Under today's high-speed, high tonnage, and intensive operating conditions, railway structural elements are frequently subject to resonance damage, and their actual service life is shortened. In addition, steel-reinforced, prestressed or non-prestressed concrete sleeper models available in the world require a prestressing process or the use of stirrup reinforcements. Apart from this, since prestressed types will be exposed to prestressing force shortly after the production, it also requires the use of high early strength concrete and cement with high environmental damage. All these reasons cause significant financial and environmental damage. In this study, a new sleeper model called green sleeper was investigated by using domestic laminated carbon-fiber-reinforced polyurethane plates, which is an advanced functional material, and low dosage CEM II class cement, to improve the damping ratio and carbon emission of railway sleepers. At the end of the study, it was determined that the carbon emission of the concrete raw material used in the new type of sleepers was approximately 50% lower and that the rail seat static positive moment determination test results were above the specification limits, and provide 87%, 37% and 36% reduction in peak values of transfer functions at 1st, 2nd, and 3rd resonance frequencies, respectively.

Keywords: Railway sleeper, Resonance frequency, Damping ratio, Carbon fiber reinforced polymer

1. Giriş

Bilindiği üzere, herhangi bir sisteme, periyodik bir etki uygulandığında, bu sistemde çeşitli salınımlar (titreşimler) meydana gelmektedir. Meydana gelen bu titreşimler esnasında, sistem elemanlarının normal durumuna göre yaptığı yer değiştirmelerin en yüksek değerine, genlik denilmektedir. Eğer sistemde meydana gelen bu titreşimlerin sıklığı (frekansı) artarak, sistemin

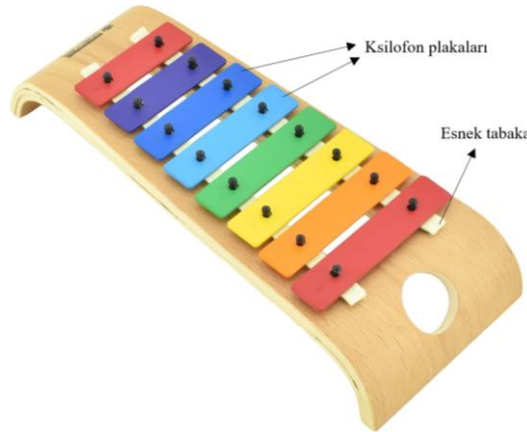
Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, "Yeni yeşil-travers modelinin B70 tipi öngerilmeli traverslerle karşılaştırmalı incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 1-13, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1107683

doğal frekansına eşit olursa, sistemin genliği, sonsuza dek artma eğilimi gösterir ki; bu olaya rezonans denilmektedir [1]. Burada belirtilen, “genliğin sonsuza gitmesi eğilimi” sistemlerin veya komponentlerin erken yorulmasıyla zaman içerisinde deforme olmalarına neden olabileceği gibi, rezonans etkisinin uzun süre devam etmesi halinde, yıkıcı sonuçlara da neden olabilmektedir. Bu konuda oldukça yaygın bilinen bir örnek; 1940 yılında ABD'nin Washington eyaletinde yapılmış olan Tacoma Asma Köprüsü'nün ulaşımına açıldıktan kısa bir süre sonra Şekil 1'de [2] görüldüğü üzere, rüzgârın etkisiyle yıkılmasıdır.



Şekil 1. Tacoma Asma Köprüsü'nün rezonans etkisiyle yıkılması [2]

Rezonans olayı, müzik, akustik, mekanik, elektromanyetik, nükleer manyetik, elektron spin ve kuantum dalga fonksiyonu rezonansları gibi bütün titreşim tipleri ya da dalgalarında görülmektedir [1]. Görüldüğü üzere rezonans olayı, titreşimlere maruz kalan hiçbir mühendislik yapısının dizayn sürecinde ihmal edilmemesi gereken bir unsurdur. Bu çalışma kapsamında ele alınan demiryolu ulaşım sistemi ise, yüksek tonaj ve hıza sahip taşıtların metal tekerlerinin metal raylar üzerinde hareket etmesi itibarıyla yoğun bir titreşim kaynağıdır. Dolayısıyla demiryolu bileşenlerinin (raylar, traversler vb.) dizayn sürecinde, rezonans etkisinin modal test ve analiz yöntemleriyle incelenmesi mutlak bir gerekliliktir. Bu bağlamda, Şekil 2'de görülen ksilofon enstrümanı, gerek rezonans direncinin ölçüldüğü modal testlerin, gerekse demiryollarında meydana gelen rezonans olaylarının kolayca izah edilmesini sağladığı düşünülmüşdür.



Şekil 2. Tipik bir ksilofon enstrümanının bileşenleri

Ksilofonlar genel olarak, çeşitli boylardaki plakaların boyutlarına göre sıralanarak, serbest (free-free modda) salınım yapabilecekleri esnek bir tabaka üzerine konumlandırılmasıyla elde edilmektedir. Bu plakalara, küre uçlu tokmaklarla, tek-tok darbeler uygulanırsa, her defasında aynı frekansların ağırlıklı olarak işitildiği görülecektir. Bu frekanslar ise, darbe uygulanan plakanın doğal frekanslarına denk gelmektedir. Görüldüğü üzere, bu durum, modal testlerde, analiz yapılacak yapı veya yapı bileşenlerinin öncelikle serbest modda salınım yapmasının temin edilmesine benzemektedir ve modal çekiçle darbe uygulanması gibi tek ve tok darbeler uygulanmasına çalışılmaktadır. Bu durumun kolayca gözlemlenebilmesi mümkündür. Şöyle ki, cep telefonlarına da yüklenebilecek basit bir ses analizörü uygulaması ile söz konusu plakalara

tek ve tok darbeler uygulanması akabinde ortaya çıkan ses dalgalarının spektrum analizi yapılabilir. Bu şekilde, aynı plakaya farklı şiddetlerde darbeler uygulandığında, her defasında aynı frekansların zirve değerlere ulaştığı görülebilir. Spektrum eğrilerindeki pik değerleri, söz konusu plakanın rezonans frekanslarını göstermektedir. Dolayısıyla farklı boydaki plakalara darbe uygulandığında, farklı farklı rezonans frekansları tahrik edilerek, farklı notalar elde edilmektedir. Ksilofon üzerindeki kısa plakalara darbe uygulanması halinde daha tiz ve yüksek frekansta sesler elde edilirken, uzun plakalarda daha kalın ve düşük frekansta sesler elde edilmektedir.

Şekil 2’de verilen ksilofon enstrümanının bileşenleri incelendiğinde, raylı sistem bileşenleriyle genel anlamda benzerliğe sahip olduğu görülecektir. Demiryollarında traversler, balast yatağı üzerinde serbest salınım yapabilmektedir. Bu durum, ksilofon plakalarının altındaki elastik tabaka nedeniyle serbest modda salınım yapabilmemesine benzemektedir. Sonuç olarak traversler, üzerlerine etkiyen dinamik tren yükleri nedeniyle, tıpkı ksilofon plakaları gibi rezonansa uğramaktadır. Bu durumun günlük hayatımızda sürekli karşılaştığımız basit bir örneği, Şekil 3’teki gibi kapalı metro istasyonlarında beklerken, tren yaklaştığı zaman duyduğumuz seslerdir. Raylı ulaşım taşıtlarının metal tekerleri, metal raylar üzerinde hareket ederken, titreşimler meydana getirmektedir. Ancak bu iki örnek arasındaki fark, ksilofon plakası titreştirildiğinde tek bir plaka rezonansa uğrarken, demiryollarında bu titreşimler raylar üzerinden metrelerce uzaklığa taşınabilmektedir. Bu yüzden, metro istasyonunda bekleyen yolcular trenin gelişini çok önceden duyabilmektedir. Bu yayılım, raylar üzerindeki titreşimlerin esnek bağlantı malzemeleri (selet vb), traversler ve balast tarafından sönmüldüğü aşamaya kadar devam etmektedir. Balastsız demiryolu hatlarında ise kullanılan döşeme tipi beton plakaların (slab-track) ve daha yumuşak bağlantı aksamının etkisiyle, raylar titreşimleri çok daha büyük uzaklıklara taşımaktadır [3, 4].



Şekil 3. Tipik bir raylı ulaşım sisteminde traverslerin balast tabakası üzerindeki konumu [5]

Demiryolu traversleri, raylardan aldığı yük ve titreşimleri, altyapıya sönmüleyerek aktarmakta ve yol geometrisini korumakta büyük öneme sahiptir [6]. Ancak günümüzde demiryolu traverslerinin tasarımında halen, inşaat mühendisliğinde artık kullanımı oldukça azalan, “izin verilebilir gerilme metodu” kullanılmaktadır. Bu metotta, traverslerin yorulma ve darbe dizayn yükleri belirlenirken, statik hesaplamalarla bulunan teker yükü, gerçek saha ölçümlerine ve titreşim-akustik odaklı analizlere dayanmadan, çeşitli güvenlik katsayılarıyla artırılmaktadır. İyi bir demiryolunda, ray üzerinde pürüzsüz bir yüzey ve taşıt tekerlerinin tam dairesel olması istenmektedir. Bu tarz hatlarda düşük hızlı demiryolu taşıtları genellikle düşük frekanslı titreşimler oluşturmaktadır [7]. Ancak zamanla kaçınılmaz şekilde tekerlerde ve raylarda anormallikler oluşmakta ve daha yüksek frekanslar meydana gelmektedir [8]. Ayrıca günümüzdeki yüksek aks yükleri ve çok yüksek işletme hızları, travers tasarımında dinamik tren yüklerinin yüksek etkili şiddet ve frekans bileşenlerinin ve traverslerin rezonans frekanslarının da göz önünde bulundurulmasını zorunlu hâle getirmiştir [9]. Ray ile tekerlek arasındaki dinamik ilişkiden dolayı ortaya çıkan titreşim frekansları, demiryolu sisteminin öz frekanslarına yaklaştıkça dinamik yükler ve deformasyonlar artmaktadır. Taşıtın tahrik frekanslarından biri veya birkaçı demiryolu sisteminin doğal frekanslarına eşit olduğu zaman rezonans olmakta ve bu

durumda hem taşıtı hem de yolu ciddi ölçüde deforme eden dinamik yükler oluşmaktadır [10]. Traverslerin doğal frekansları ve sönümlenme oranlarının dinamik tren yükleri altındaki davranışlarını oldukça etkilediği konusu geçmişte bilinse de yeterli dikkat gösterilmemiştir [11]. Günümüzde yaygın tespit ve kabule göre; demiryolu traversleri, rezonans frekansına ulaşan yük tahriki ile sıkça deforme olmaktadır [12]. Hatta bazı kaynaklarda, traverslerde hasar oluşmasının en büyük nedeninin traversin rezonans frekansına erişmesinden kaynaklandığının kesin olarak bilindiği ifade edilir hale gelmiştir [13]. Bu durumu destekleyen birçok çalışmadan birinde belirtildiği üzere; travers öz frekansında iki mesnet arasındaki ray eğilme momenti 8-9 kata varan oranlarda artmaktadır ve trenin tahrik frekansı yolun travers öz frekansına ile çakışırsa, rezonans olayı ile birlikte ray eğilme momenti hiç tahmin edilemeyecek kadar büyük düzeylere çıkmaktadır [14]. Ancak günümüzde ar-ge yapılan travers modellerinin çoğunda öngerilmeli üretim felsefesi sabit kalmaktadır. Bu durum travers üretiminde korozif çelik donatılar kullanılması ve meydana gelecek çatlakların öngerilme etkisiyle kapatılarak, bu donatıların korozyondan korunması adına devam ettirilmektedir. Oysaki dikkate alınmayan husus, tıpkı gergin durumdaki bir gitar telinin sönümlenme düzeyinin düşük kalması gibi, öngerilmeli traverslerin de gergin yapıları itibarıyla, dinamik titreşim yükleri altında daha fazla deforme olmasıdır. Nitekim öngerilmeli beton traverslerin özellikle 20-300 Hz frekans aralığındaki dinamik etkilere karşı zayıf kaldığı yaygın bilinen bir gerçektir [9, 16]. Buna rağmen dünyada mevcut standartlarda, kılavuzlarda ve rehberlerde verilen yöntemler, statik tren yüklerinin çeşitli güvenlik katsayılarıyla artırılarak travers mukavemetinin artırılmasına dayanmaktadır. Dolayısıyla bu şekilde geliştirilen traversler, raylı sistemlerde yaşanan rezonans sorunlarını istenildiği düzeyde çözmektedir. Demiryollarında traverslere etkiyen yüklerin tamamına yakını dinamik yüklerdir ve dinamik tren yüklerinin impuls ve frekans bileşenlerine dayalı bir dizayn biçimi, dünyada mevcut standartlarda henüz yer edinmediği için, teknikte uzman kişiler tarafından bu soruna dayalı çözümler de tekniğin bilinen durumundan kolayca açığa çıkarılamamaktadır. Dolayısıyla raylı sistem elemanlarının doğal frekanslarının bir veya birkaçını içeren dinamik tren yükleri etkisiyle; raylar, bağlantı malzemeleri, traversler, balast ve altyapı elemanları sıklıkla rezonansa uğramakta ve rezonans önleme kabiliyeti yetersiz mevcut traversler nedeniyle, tüm raylı sistem bileşenlerinin fiili servis ömürleri kısalmaktadır.

Ayrıca dünyada mevcut öngerilmeli veya öngerilmemiş beton travers modelleri, öngerilme işlemi veya etriye kullanım zorunluluğu getirmektedir. Bunun dışında öngerilmeli tipler, üretimin hemen ertesi gün gerdirmeye maruz kalacağından, yüksek erken dayanımlı beton kullanım zorunluluğu da getirmektedir [17]. Sonuç olarak her iki tipteki travers üretiminde de, birçok hammadde, işçilik, enerji ve süre kaybı söz konusu olmaktadır. Bu durum ise çeşitli mali külfetlerinin haricinde, önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Nitekim ülkemizde yürürlükte olan 11. Kalkınma Planınının 489.2. maddesinde de, karbon salınımının azaltılmasına dair önlemler üzerinde önemle durulmaktadır [18]. Travers üretiminin başlı başına bu emisyonuna neden olmasının haricinde, uygun şekilde dizayn edilmemiş traverslerin servis ömrünün kısa kalması nedeniyle de dünya genelinde yüksek miktarda travers üretimleri söz konusudur. Her yeni travers üretiminin de ekstra çimento, agrega, çelik, yakıt tüketimi nedeniyle çevreye önemli derecede zararı söz konusudur. Sonuç olarak, kullanım ömürleri yüksek traverslerin üretilmesi, çevreye verilen zararlı etkilerin düşürülmesi konusunda önemli rol oynamaktadır [19]. Hazır beton üretiminde başlıca girdiler çimento, agrega, su, kimyasal katkı ve bazı durumlarda mineral katkılardır. Bu girdiler içinde en fazla emisyonuna neden olan bileşen çimentodur. Çimento kaynaklı emisyonun dünyada sanayi kaynaklı toplam emisyonun %5'ine denk geldiği belirtilmektedir [20]. Çimento üretiminde neredeyse bire bir oranda CO₂ emisyonu oluştuğu ifade edilmektedir. Yani 1 ton çimento üretimi için yaklaşık bu miktarda CO₂ emisyonu oluşmaktadır. Mineral katkılar ise çimentoyu belirli bir oranda ikame eden ikincil bağlayıcılar ve bir prosesin yan ürünü oldukları için emisyonuna neden olmadığı belirtilmektedir [20]. Dolayısıyla travers üretiminde kullanılan çimento dozajının düşürülmesi mali ve çevresel fayda sağlayacağı gibi; CEM I sınıfı Portland çimentosu yerine, çeşitli oranlarda mineral katkı içeren CEM II-V sınıfı çimento tipleri kullanımı da önemli düzeyde mali ve çevresel fayda sağlayacaktır.

2. Metot

Bu çalışma kapsamında dinamik tren yüklerini daha iyi sönmüleyecek, rezonans direnci daha yüksek ve aynı zamanda daha çevreci bir travers tipi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ileri fonksiyonel bir malzeme olan yerli lamine karbon-fiber takviyeli poliüretan plakalar (L-CFRPU) ele alınmış, bu malzemelerin, beton hammadde içerisinde, mevcut öngerilmeli veya öngerilmemiş çelik donatılar yerine, betonarme donatısı olarak kullanılabilmesi düşünülmüştür. Bu doğrultuda, yerli karbon-fiber takviyeli poliüretan plakalar (L-CFRPU) yenilikçi bir yöntemle beton donatısı olarak kullanılmıştır. Söz konusu plakaların dünyada üretimini yapan fabrikalar, günümüze kadar beton iç donatısı olarak kullanılmadıkları için, mevcut kullanım alanlarına uygun olarak geniş ebatlarla üretmektedir. Bu çalışma kapsamında, yerli üretici fabrikadan standart olarak 120 mm eninde üretilen plakalar temin edilerek, bu geniş ebatlı plakalar, beton donatısı olarak kullanılabilir şekilde (bu çalışma için 15 mm eninde) kesilip, Şekil 4'te görüldüğü üzere beton hammadde içerisinde öngerilmemiş ve etriyesiz vaziyette kullanılmıştır. L-CFRPU plakaların ve yeni tip traverslerin üretim tekniğinin diğer detayları ve bu yeni tip traverslerle ilgili bugüne kadar yürütülmüş testlerin sonuçları literatürde mevcuttur [6, 9, 20-27]. Bu çalışmada, ayrıca, referansları verilen önceki çalışmalardan farklı olarak, sönmüleme oranında ve karbon emisyonunda iyileştirme sağlanması için, geçmiş uygulamalarda kullanılan yüksek dozajlı CEM I çimento kullanımı yerine, düşük dozajlı CEM II sınıfı çimento kullanımının sağlayabileceği faydalar araştırılmıştır. Bu suretle öngerilmeli beton traverslerde (üretim ertesini günü hemen gerdirme işlemi yapılması gerektiğinden) proses gereği mecbur kalınan CEM I sınıfı çevreye zararlı etkisi fazla çimento kullanımı ekarte edilmiştir. Yeni tip traverslerde, mevcut beton traverslerde kullanılan 420-550 kg/m³ düzeyindeki çok yüksek dozajda CEM I 42,5 R tipi çimento kullanımı yerine, 300-350 kg/m³ dozajda CEM II 32,5 B-LL tipi çimento kullanılmıştır. Her iki durumdaki beton bileşenleri, karışım oranları ve literatür doğrultusunda [20] hesaplanan tahmini karbon emisyon düzeyleri Tablo 1'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere her iki durumda da beton üretimi kaynaklı emisyon değerinin tamamına yakını çimento bileşeni kaynaklıdır ve yeni tip yeşil travers modelinin çevreye yaydığı toplam CO₂ değeri, standart öngerilmeli B70 tipi traverslerin yaklaşık yarısı kadardır (%50 daha düşük).

Tablo 1. Standart öngerilmeli B70 tipi traversin (solda) ve yeni yeşil travers modelinin (sağda) beton bileşenleri dozajları ve tahmini CO₂ emisyon değerleri

Bileşen	B70-TİPİ	B70-TİPİ	B70-TİPİ	YENİ TİP	YENİ TİP	YENİ TİP
	Ağırlık (kg/m ³)	CO ₂ ,eşdeğer (kg/m ³)	CO ₂ ,eşdeğer (%)	Ağırlık (kg/m ³)	CO ₂ ,eşdeğer (kg/m ³)	CO ₂ ,eşdeğer (%)
Çimento	508	469,3	97,37	350	235,9	94,79
Su	83	0,1	0,02	58	0,1	0,02
Agrega	1942	10,4	2,16	2128	11,4	4,58
Katkı	9,9	2,2	0,45	6,8	1,5	0,6
TOPLAM	2542,9	482,0	100,00	2542,8	248,9	100,00

Sonuç olarak, çalışma kapsamında, söz konusu yeni yeşil-travers modelinin özellikle modal karakteristiklerinin, klasik öngerilmeli traverslerle karşılaştırılması için, eş-boyutlu travers numuneleri üretilmiştir. Bu kapsamda da, B70 tipi öngerilmeli beton travers modeli kullanılmıştır. B70 tipi traverslerin en-kesit boyutları ile kullanılan çelik ve L-CFRPU malzemelerin karakteristik özellikleri, günümüze kadar uygulanan test ve analiz sonuçları literatürde mevcuttur [6, 9, 20-27]. Çalışma kapsamında ayrıca, belirtilen travers numunelerinin üretimi esnasında, kullanılan betondan 15x15x15 cm ebadında küp numuneler alınmış ve 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımları ölçülmüştür. Bunun akabinde, üretilen yeni tip traverslerin mekanik dayanımının standartlara uygunluğunun belirlenmesi için TS EN 13230-3 doğrultusunda travers ray mesnedine uygulanan, artırılmış yüklem-kaldırma-tekrar yüklem (YKY) testleri yürütülmüştür. Söz konusu testin uygulama biçimi literatürde de mevcuttur [9, 21, 26, 27]. Bu testlerden sonra ise, çalışmanın esasını teşkil eden modal test ve analizlere geçilmiştir. Bu esnada

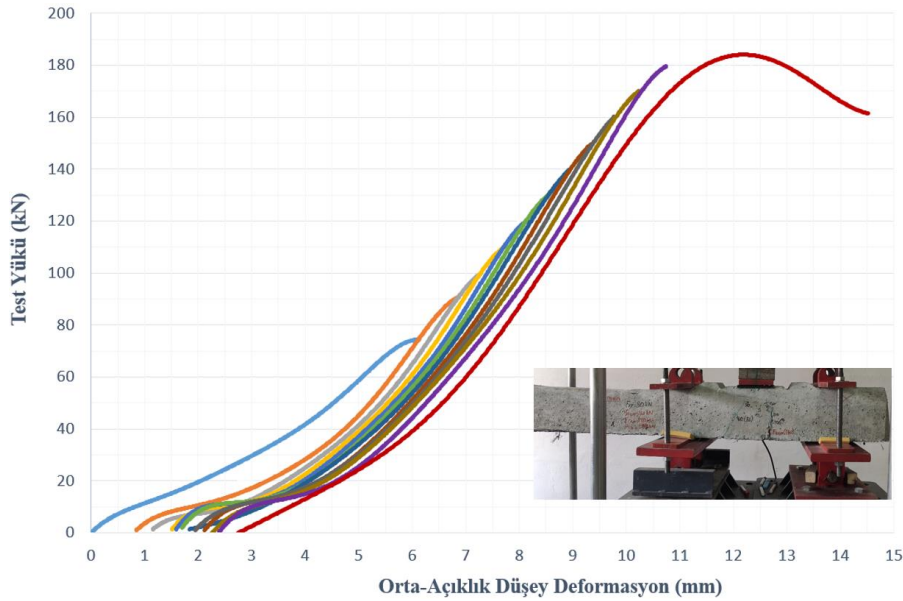
her numune için dikey doğrultuda en az 3'er çekiç darbesi uygulanarak ve ölçülen ivme dataları nCode yazılımında analiz edilerek; frekans bazında spektrum grafikleri (FRF) elde edilmiştir.



Şekil 4. Yeni geliştirilen 15x4,9 mm ebatlı L-CFRPU donatılı yeşil traversin üretimi

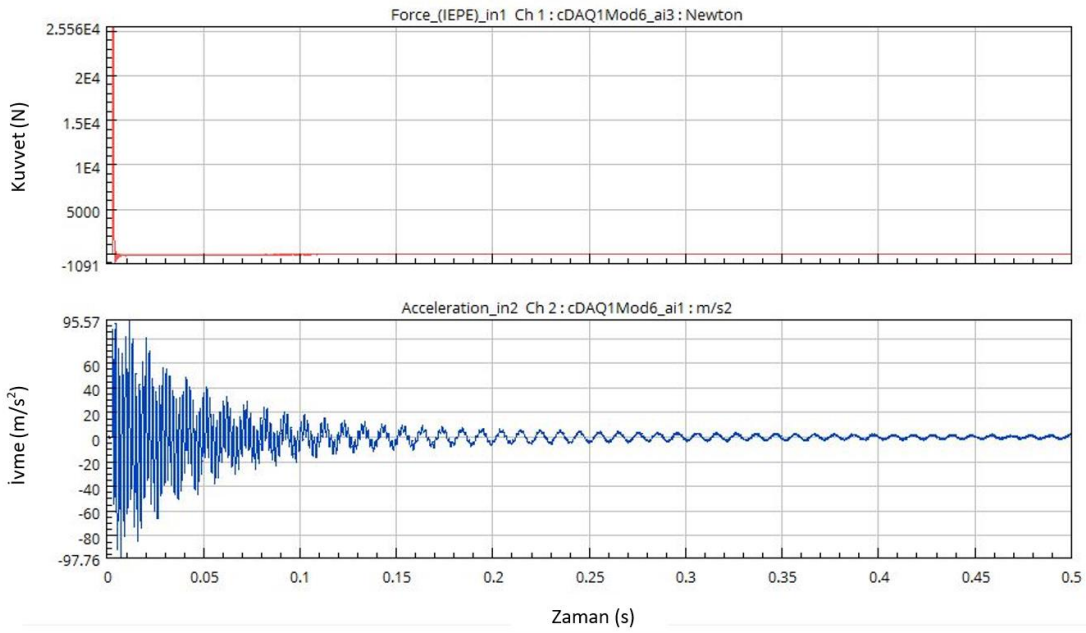
3. Bulgular

Yeni tip traverslerin üretimi esnasında kullanılan betondan alınan numuneler üzerinde 28 günlük kür süresi sonunda yapılan test sonuçlarına göre beton dayanım sınıfı C40/50 olarak belirlenmiştir. Bu sınıf, B70 tipi standart beton traversler için ise C55/67 olarak belirlenmiştir. Küp numuneler üzerinde uygulanan bu testler ardından testlere, traversler üzerinde yapılan mekanik testlerle devam edilmiştir. Bu aşamada, yeni bir travers tasarımı aşamasında TS EN 13230-2/3'te istenen YKY (yükleme-kaldırma-tekrar yüklenme) testleri uygulanmıştır. Şekil 5'te örnek grafiği sunulan test sonucunda 50 mikron genişliğindeki ilk kalıcı çatlak başlangıç yükü ($Fr_{0,05}$) 160 kN ve kırılma yükü (Fr_B) 190 kN olarak belirlenmiştir. Bu değerler EN 13230-3 standardı ve Dünya Demiryolu Birliği (UIC) rehberleri doğrultusunda demiryolu kuruluşlarınca istenilen Teknik Şartname değerlerini ($Fr_{0,05} > 125$ kN ve $Fr_B > 175$ kN) sağlamaktadır [6, 9, 21, 24].

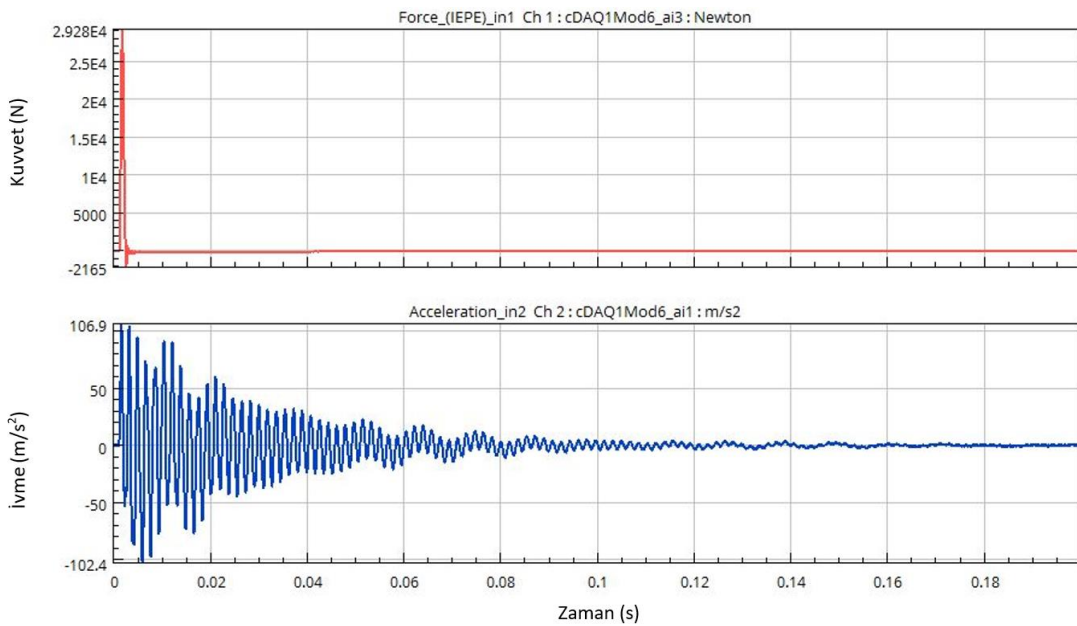


Şekil 5. Yeni tip traverslere uygulana YKY testlerine ait örnek test yükü (kN)-deformasyon (mm) eğrisi

Çalışmanın devamında, traverslerin doğal frekans değerlerinin ve modal sönümlenme oranlarının tespiti yapılmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan deneysel çalışma düzeneği literatürdeki önceki çalışmalarla [23] benzer tutulmuş olup, traversler 400 mm kalınlığında yumuşak poliüretan blok üzerine konarak serbest (free-free modda) salınım yapmasına imkân tanınmıştır. Ayrıca traverslerin üst yüzeylerinde iki uç kısma ve orta noktaya ivmeölçerler sabitlenmiştir. Kuvvet sensörü içeren ivmeölçerler ile aynı veri toplama sistemine (data logger) bağlı modal çekiç ile de travers alt-orta kısmından tek ve tok darbeler vurularak traversin serbest salınım yapması sağlanmış ve yaklaşık 10'ar saniye aralıklarla minimum 3 adet çekiç darbesi uygulanmıştır. Darbe uygulanması esnasında modal çekiç üzerinden ölçülen kuvvet ölçümleri ve ivme ölçümleri alınmıştır. Her iki tip travers numuneleri için de tek bir çekiç darbesi esnasında alınan kuvvet ve ivme datası örnekleri Şekil 6 ve 7'de sunulmuştur.

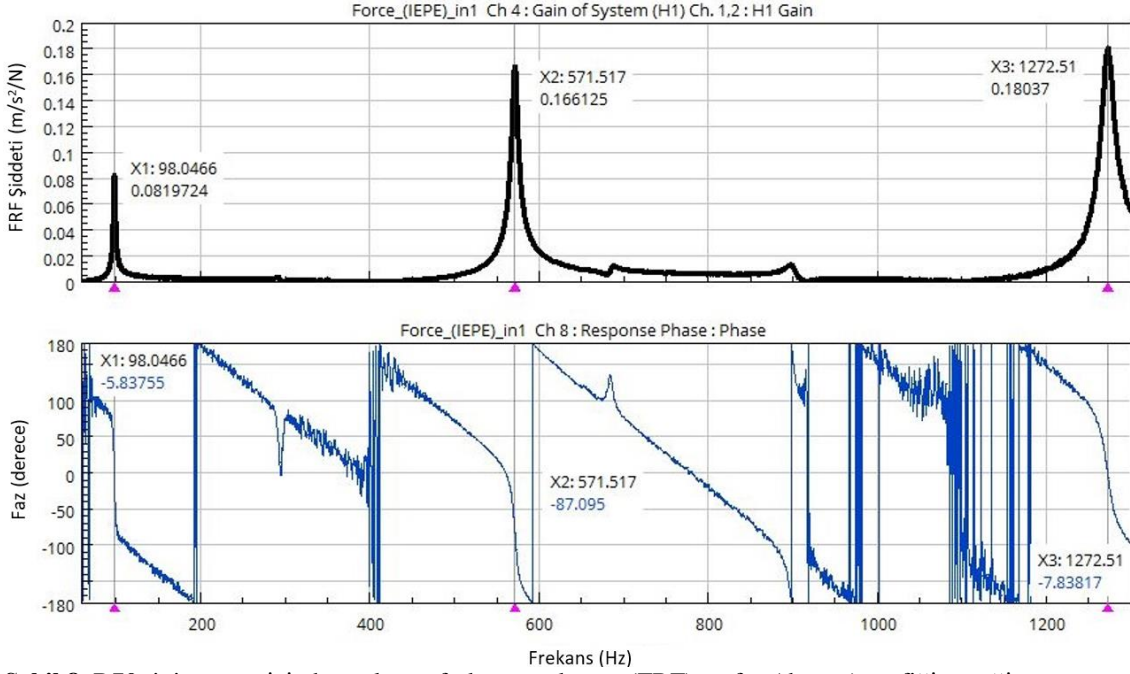


Şekil 6. B70 tipi travers numunesinden çekiç darbesiyle alınan kuvvet (N) ve ivme (m/s²) dataları örneği

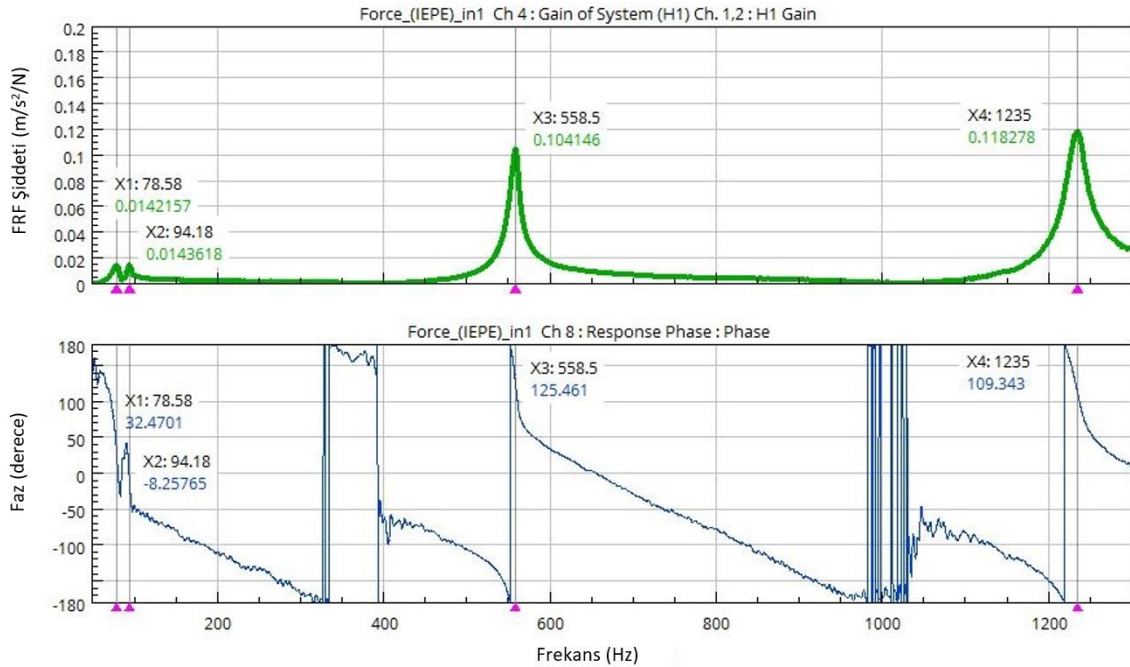


Şekil 7. Yeni tip travers numunesinden çekiç darbesiyle alınan kuvvet (N) ve ivme (m/s²) dataları örneği

Bu şekilde her bir darbe ayrı ayrı nCode analiz ağacı ile analiz edilmiş ve Şekil 8 ve 9’da örnekleri sunulan Frekans Tepki Fonksiyon (Frequency Response Function, FRF) grafikleri elde edilmiştir. FRF grafikleri ile çeşitli frekanslarda yapının tepkisi analiz edilebilmektedir. Bu grafikte, pik değerleri rezonans olayını göstermektedir [27].

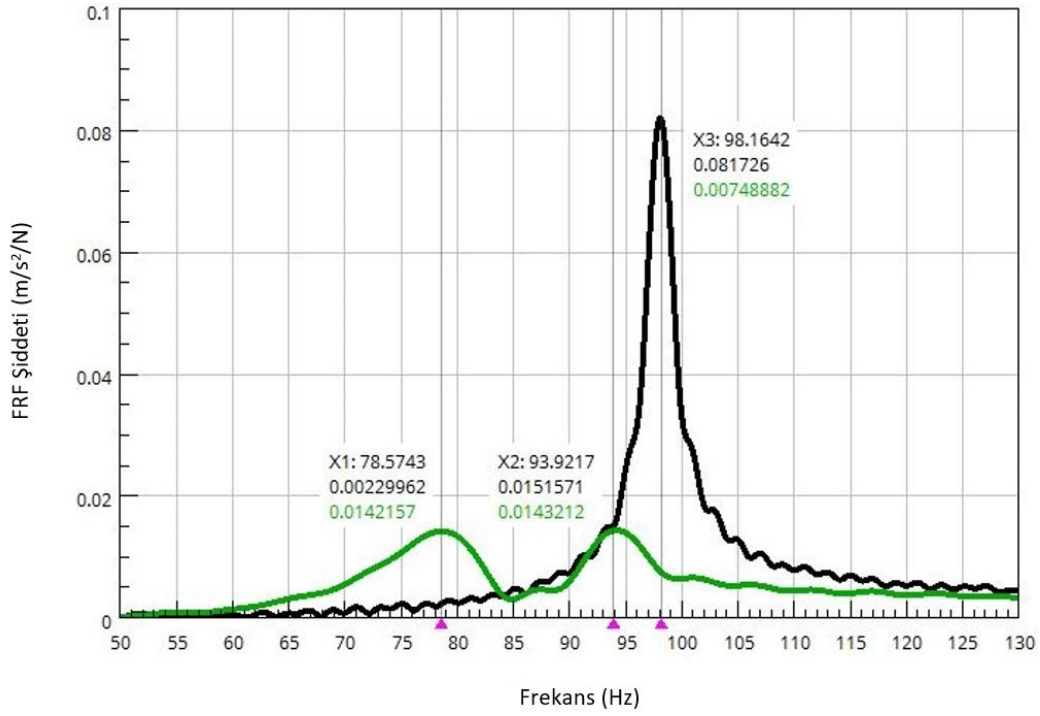


Şekil 8. B70 tipi travers için hesaplanan frekans spektrum (FRF) ve faz (derece) grafiği örneği

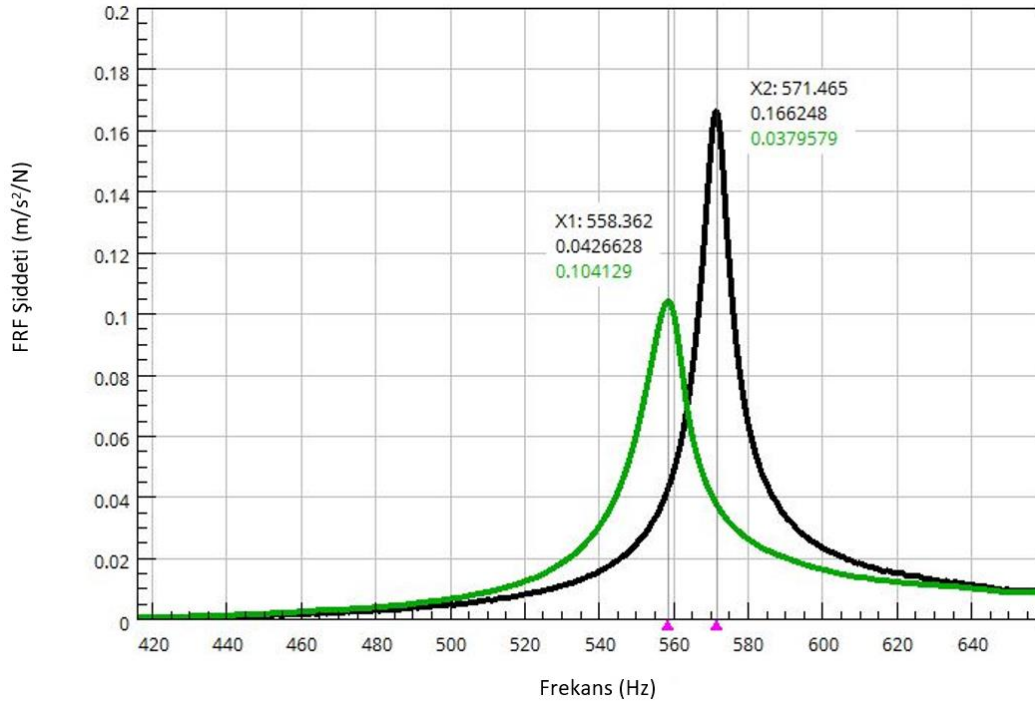


Şekil 9. Yeni tip travers için hesaplanan frekans spektrum (FRF) ve faz (derece) grafiği örneği

Şekil 8 ve 9’da sunulan FRF grafiklerinde görülen rezonans frekans bantları 1., 2. ve 3. rezonans frekansları için yaklaşıtırlarak karşılaştırılması için Şekil 10, 11 ve 12 oluşturulmuştur.



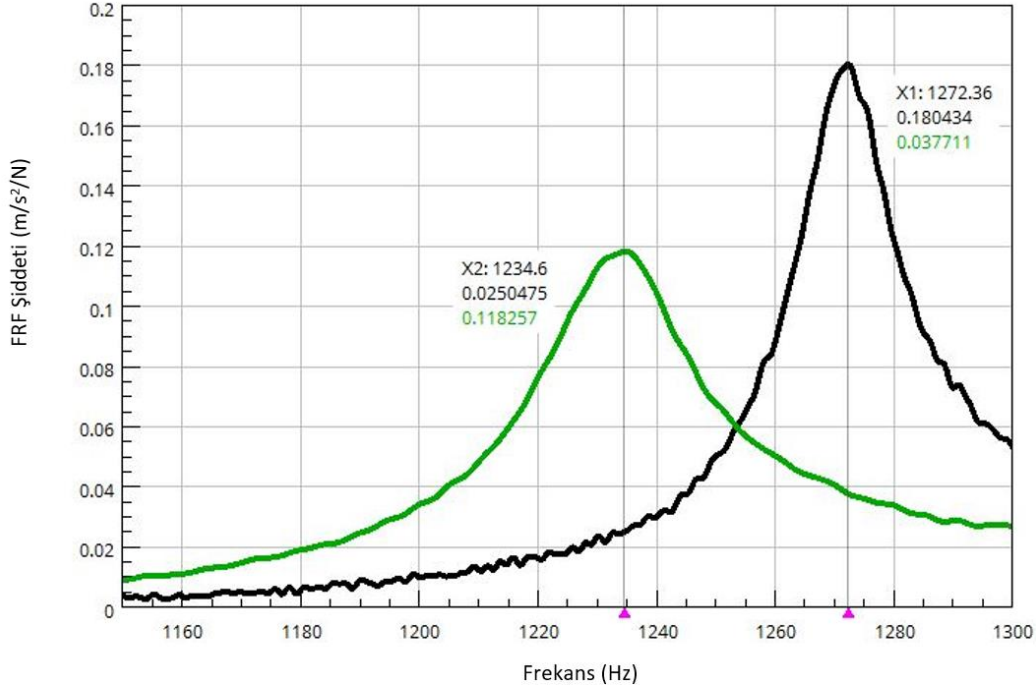
Şekil 10. B70 tipi (siyah eğri) ve yeni tip (yeşil eğri) traversin 1. Rezonans frekanslarına ait FRF grafiklerinin karşılaştırması



Şekil 11. B70 tipi (siyah eğri) ve yeni tip (yeşil eğri) traversin 2. Rezonans frekanslarına ait FRF grafiklerinin karşılaştırması

Çalışma süresince, nCode yazılımı ile yapılan analizler esnasında “baştanbaşa analiz (overall)” metodu kullanılmış, çıktı tipi olarak “güç (power)” tercih edilmiştir. Dolayısıyla elde edilen FRF grafiği tipi, PSD (spektral güç yoğunluğu (power spectral density))’dir. Buffer pencere tipi “rectangular” ve boyutu “524288” parametreleriyle daha düzgün eğriler elde edilmesi sağlanmış, bu ayarlamalar tüm analizlerde sabit tutulmuştur. FRF grafikleri üzerinde nCode yazılımının

Deneysel Modal Analiz (Experimental Modal Analysis) modülü kullanılarak sönümlenme oranı (damping ratio) hesaplamaları yapılmıştır. Eğri uydurma metodu olarak en küçük kareler (least-squares) metodu seçilmiş, analiz frekans aralığı ilgi alanını kapsayan 30-1350 Hz olarak belirlenmiştir. Eğri oturtma esnasında frekans analiz aralığı 0.1 ve frekans-amplitude gate değerleri %5 olarak kullanılmıştır. Bu hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 2 ve 3'te özet halinde sunulmuştur.



Şekil 12. B70 tipi (siyah) ve yeni tip (yeşil) traversin 3. Rezonans frekanslarına ait FRF grafiklerinin karşılaştırması

Tablo 2. Üretilen traverslerin rezonans frekansı ve sönümlenme oranı analiz sonuçları

Numune Tanımı	1. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	1. Dikey Sönümlenme Oranı (%)	2. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	2. Dikey Sönümlenme Oranı (%)	3. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	3. Dikey Sönümlenme Oranı (%)
B70 tipi travers	98,1	1,05	571,4	0,59	1272	0,50
Yeni yeşil travers	79,2	4,4	559,0	0,91	1235	0,83

Tablo 3. Üretilen traverslerin FRF şiddet (magnitüde) değeri analiz sonuçları

Numune Tanımı	1. Dikey Mod Şeklinde FRF Pik Değeri (m/s²/N)	2. Dikey Mod Şeklinde FRF Pik Değeri (m/s²/N)	3. Dikey Mod Şeklinde FRF Pik Değeri (m/s²/N)
B70 tipi travers	0,08	0,16	0,17
Yeni yeşil travers	0,01	0,10	0,11

4. Sonuç

Çalışma kapsamında yürütülen literatür taraması ve deneyler akabinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- i. Yeni yeşil demiryolu traverslerinde kullanılan düşük dozajlı CEM II sınıfı çimento sayesinde, travers beton hammaddesinin karbon emisyonunun %50'ye kadar azaltılabileceği hesaplanmıştır.
- ii. Yeni tip traverslerin beton basınç dayanımı, standart öngerilmeli beton traverslerden önemli düzeyde (yaklaşık %25) daha düşük olmasına rağmen, yeni L-CFRPU donatılı üretim prosesi sayesinde, günümüzde öngerilmemiş traversler için standartlarda (EN 13230-3 vb.) istenilen ray-mesnedinde pozitif yüklemeli moment tayini testi şartlarını sağlamaya devam ettiği tespit edilmiştir.
- iii. Yeni tip traverslerin üretim prosesindeki değişimin karşılaştırılması için yürütülen bu çalışmada travers en kesit boyutları B70 tipi öngerilmeli beton traverslerle eşdeğer uygulanmıştır. Dolayısıyla modal testler esnasında belirlenen rezonans frekansı değerlerinde, kısmi bir düşüş haricinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Bu düşüşün ana nedeninin, yeni katkılı ve düşük dozajlı çimento kullanımı kaynaklı kütle düşüşünden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Her iki travers tipinde görülen rezonans frekanslarındaki değişimler, demiryollarında görülen dinamik yüklerin 2000 Hz'leri aşması nedeniyle, traverslerin servis yüklerinin frekans aralığından çıkmasını sağlamayacağı nedeniyle, önemsizdir.
- iv. Yeni tip traverslerin modal sönümlenme oranları, B70 tipi öngerilmeli beton traverslerle karşılaştırıldığında, 1., 2. ve 3. dikey rezonans frekanslarında sırasıyla %319, %54 ve %66 artış sağladığı görülmüştür. Dolayısıyla, klasik mekanik deneyler ile ortaya çıkarılamayacak önemli bir dinamik yük sönümlenme avantajı belirlenmiştir.
- v. Yeni tip traverslerin modal sönümlenme oranlarındaki büyük artış sayesinde, B70 tipi öngerilmeli beton traverslerle karşılaştırıldığında, Frekans Tepki Fonksiyonu grafiklerinde, 1., 2. ve 3. dikey rezonans frekanslarına ait pik değerleri ($m/s^2/N$) sırasıyla %87, %37 ve %36 düşüş sağlanmıştır. Dolayısıyla yeni tip traversler, yüksek frekans bileşenleri içeren demiryolu yükleri altında, bu denli daha az genlikte titreşim gösterecek, ortaya bu denli daha düşük gerilmeler çıkacak ve traverslerin servis ömrü bu doğrultuda önemli düzeyde artacaktır. Bunun gibi, çevreye yayılan titreşim ve yükler de daha fazla sönümleneceği için, diğer demiryolu bileşenlerinin de servis ömürleri artacaktır. Sonuç olarak hem üretim esnasında hem de kullanım esnasında zararlı çevresel etkiler önemli düzeyde bertaraf edilecek, ayrıca önemli bir mali avantaj da sağlayabilecektir.

Sonuç olarak yeni tip traverslerin, hem traverslerin hem de diğer demiryolu yapı elemanlarının servis ömürlerinin artırılmasında ve çevresel zararlı etkilerin azaltılmasında önemli faydalar sağlayabileceği tahmin edilmektedir. Ancak bu durumun yorulma testleri ve saha uygulamalarıyla teyit edilmesine ihtiyaç vardır.

Kaynakça

- [1] "Rezonans," [Online]. Available: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Rezonans_\(fizik\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Rezonans_(fizik)) (21.04.2022)
- [2] "Tacoma narrows bridge," [Online]. Available: <https://adsimutec.com/en/fem-cfd-simulation-pinboard/application-examples/multiphysics-coupling-interaction/tacoma-narrows-bridge> (21.04.2022)
- [3] "Track behaviour," [Online]. Available: <https://the-contact-patch.com/book/rail/r1412-track-behaviour> (21.04.2022)
- [4] D. Thompson, C. Jones, S. Iwnicki, "Handbook of railway vehicle Dynamics" Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [5] "Dosya: İstanbul", [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:Istanbul_Feb_2020_11_46_10_411000.jpeg

- [6] F. Çeçen, B. Aktaş, “Yeni nesil demiryolu traversleri ve yerli frp donatı kullanımının deneysel araştırması,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 13, Sayfa: 53-64. Ocak 2021, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>
- [7] R. You, D. Li, C. Ngamkhanong, S. Kaewunruen, “Fatigue life assessment method for prestressed concrete sleepers,” *Frontiers in Built Environment*, 2017, Volume 3, Article 68. Erişilebilir (27.08.2021): <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2017.00068/full>
- [8] W. Ferdous, A. Manalo, G. V. Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. M. Remennikov, “Composite railway sleepers – recent developments, challenges and future prospects,” *Composite Structures*, 2015, vol. 134, pp. 158–168, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.058>
- [9] F. Çeçen, “Karbon – fiber donatıyla öngerilmemiş monoblok demiryolu beton traversi geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ulaştırma ABD, Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Tokat, 2019
- [10] Z. Öztürk, T. Öztürk, V. Arlı, “Yüksek hızlı demiryolu köprülerinde rezonans olayı,” 2018. Erişilebilir (27.08.2021): www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1448.pdf
- [11] H. P. J. Taylor, “The railway sleeper: 50 years of pretensioned, prestressed concrete,” 1993. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/288948138_The_prestressed_concrete_railway_sleepers_-_50_years_of_pretensioned_prestressed_concrete [09.03.2022]
- [12] L. M. Domingo, C. Z. Martín, C. P. Avilés, J. I. R. Herráiz, “Analysis of the influence of cracked sleepers under static loading on ballasted railway tracks,” *Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal*, 2014, Volume 2014, Article ID 363547. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/363547>
- [13] A. Remennikov, S. Kaewunruen, “Investigation of vibration characteristics of prestressed concrete sleepers in free-free and in-situ conditions,” 2005. Erişilebilir (27.08.2021): <http://ro.uow.edu.au/engpapers/284>
- [14] V. Arlı, Z. Öztürk, “Balastlı hatta ray-tekerlek titreşimlerinin demiryolu dinamiğine etkisinin belirlenmesi,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2014, Cilt 20, Sayı 3, Sayfalar 100-110. Erişilebilir (27.08.2021): <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20487/218165?publisher=pamukkale%3Fpublisher%3Dpa+mukkale>
- [15] C. Esveld, *Modern railway track*. ISBN 978-1-326-05172-3, 2014
- [16] A. N. Hanna, “State-of-the-Art Report on Prestressed Concrete Ties for North American Railroads,” *PCI Journal*. 1979, Available at (23.02.2022): https://www.pci.org/PCI/Publications/PCI_Journal/Issues/1979/September-October/Prestressed_Concrete_Ties_for_North_American_Railroads.aspx
- [17] “Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe başkanlığı On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)”, [Online]. Available: <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/OnbirinciKalkinmaPlanı.pdf> (21.04.2022)
- [18] M. S. Çelik, Z. Öztürk, “Demiryolu traverslerinin çok yönlü incelenmesi ve örnek hat üzerinde kullanılan farklı tipteki traverslerin irdelenmesi,” Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Ulaştırma Mühendisliği Programı, İstanbul, 2015
- [19] Y. Engin, “Hazır Beton ve Sera Etkisi (Excel ile Hesaplama),” [Online]. Available: <https://www.betonvecimento.com/beton-2/hazir-beton-ve-sera-etkisi> (21.04.2022)
- [20] F. Çeçen, B. Aktaş, “Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers,” *Engineering Failure Analysis*, Vol: 127, ID: 105471, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105471>
- [21] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. Ş. Öztürk, M. B. Navdar, “Comparison of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers with LUR tests,” *Construction and Building Materials*, Vol: 321, ID: 126414, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126414>
- [22] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. M. B. Navdar, Ş. Öztürk, “Behaviour of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers under repeated impact loads,” *Construction and Building Materials*, Vol: 319, ID: 126151, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126151>
- [23] B. Aktaş, F. Çeçen, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, “Comparison of prestressed concrete railway sleepers and new LCR concrete sleepers with experimental modal analysis,” *Engineering Failure Analysis*, Vol: 131, ID: 105821, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105821>
- [24] F. Çeçen, B. Aktaş, “Incremental LUR tests of new LCR concrete railway sleepers,” *Engineering Failure Analysis*, Vol: 130, ID: 105793, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105793>

- [25] F. Çeçen, B. Aktaş, “Lamine CFRP Donatılı Traverslerin Deneysel ve Sonlu Eleman Analizleriyle İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 14, Sayfa: 26-38, Temmuz 2021, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.869946>
- [26] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, M. B. Navdar, İ. Ş. Öztürk, “Karbon-Fiber Plaka Donatılı Traverslerin, B70-Tipi Öngerilmeli Beton Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 15, Sayfa: 97-110, Ocak 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1028740>
- [27] F. Çeçen, B. Aktaş, “B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının Deneysel İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 15, Sayfa: 158-169, Ocak 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.990316>

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası'nda Üretim Grup Müdürlüğü görevini yürütmekte olan yazar, Erciyes Üniversitesi'nde Ulaştırma alanında doktora eğitimine devam etmektedir. Yerli ileri fonksiyonel malzemelerle milli demiryolu traversleri geliştirilmesi amaçlı ar-ge ve patent çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr



Bekir AKTAŞ

Doktora Eğitimini Süleyman Demirel Üniversitesinde tamamlayan yazar, Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Ulaştırma alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi ve patentleri bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ferhat ÇEÇEN: Deney numunesi üretimi, Metodoloji, Kaynaklar, Doğrulama, Görselleştirme, Yazılım, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Bekir AKTAŞ: Deney numunesi üretimi, Kavramsallaştırma, Görselleştirme, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.