



B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının Deneysel 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: 02.09.2021, Kabul/Accepted: 03.01.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2022)

Öz: Günümüz demiryolu işletmeciliğinde artan hız ve aralıksız işletim koşulları sonucunda, daha düşük bakım gerektiren ve uzun ömürlü çözümler mecburiyet halini almıştır. Bu çalışmada, en önemli demiryolu üstyapı elemanlarından biri olan traversler ele alınmıştır. Klasik B70 tipi önerilmeli betonarme traverslerin faydalı servis ömrünün, sönümleme performansının ve rezonans direncinin artırılması adına, yerli polipropilen elyaf (PP) donatı kullanımının sağlayabileceği potansiyel faydalar araştırılmıştır. Üretilen elyafli ve elyafsız numunelerde TS EN 13230-2’de yeni bir travers dizaynı esnasında istenilen yüklem-kaldırma-tekrar yüklem esaslı kademeli artışı statik eğilme testlerinin yanı sıra, modern modal testler ve yüksek hızlı darbe testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre uzun ve verimli servis ömrü açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Öngerilmeli Travers, B70 Tipi Travers, Polipropilen, Elyaf Takviyeli Beton, Modal Test, Darbe Testi

Experimental Investigation of the Use of Polypropylene Fiber in B70 Type Railway Sleepers

Abstract: As a result of increasing speed and uninterrupted operating conditions in today's railway operations, low maintenance and long-lasting solutions have become a necessity. In this study, sleepers, one of the most important railway superstructure elements, are discussed. To increase the useful service life, damping performance and resonance resistance of conventional B70 type prestressed reinforced concrete sleepers, the potential benefits of using domestic polypropylene fiber (PP) reinforcement were investigated. During the design of a new sleeper in TS EN 13230-2, on the produced fibrous and non-fibrous samples, the desired loading-unloading-reloading based gradual incremental static bending tests, as well as modern modal tests and high-speed impact tests were carried out. According to the test results, positive results were obtained in terms of long and efficient service life.

Keywords: Prestressed Sleeper, B70 Type Sleeper, Polypropylene, Fiber Reinforced Concrete, Modal Test, Impact Test

1. Giriş

Demiryolu traversleri, raylardan aldığı yük ve titreşimleri, altyapıya sönümleyerek aktarmakta ve yol geometrisini korumakta büyük öneme sahiptir [1]. İyi bir demiryolunda, ray üzerinde pürüzsüz bir yüzey ve taşıt tekerlerinin tam dairesel olması istenmektedir. Bu tarz hatlarda demiryolu taşıtları genellikle düşük şiddetli ve düşük frekanslı yükler oluşturmaktadır [2]. Ancak zamanla kaçınılmaz şekilde tekerlerde ve raylarda anormallikler oluşmakta ve daha yüksek frekanslar ve dolayısıyla daha yüksek yükler meydana gelmektedir [3]. Queensland Teknoloji Üniversitesi (Avustralya) tarafından 2004 yılında, 12 ay süreyle, boş/dolu yaklaşık 6 milyon dingil geçişi kayda alınmıştır. Kayıt sonuçlarına göre %96’lık dilim 50 kN ve altıdır. Ancak çalışma yapılan yıl içerisinde 100.000 adet bu yükü aşan ve 310 kN’a varan darbeler meydana gelmiştir [4]. Her ne kadar her bir ölçüm kaydının, ölçüm yapılan demiryolu hattının işletim şartlarının (farklı ekartman açıklıkları, dingil yükleri, hız limitleri, bakım prosedürleri vb.) fonksiyonu olmasına rağmen, bu ve benzeri birçok saha çalışmasına göre traverslerin servis

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, “ B70 tipi demiryolu traverslerinde polipropilen fiber kullanımının deneysel incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 158-169, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.990316

ömrünü düşüren darbe yükleri azımsanamayacak derecede fazladır. Nitekim, günümüzde yaygın tespit ve kabule göre; demiryolu traversleri, rezonans frekansına ulaşan yük tahrikleri ile sıkça deforme olmaktadır [5]. Hatta bazı kaynaklarda, traverslerde hasar oluşmasının en büyük nedeninin traversin rezonans frekansına erişmesinden kaynaklandığının kesin olarak bilindiği ifade edilir hale gelmiştir [6]. Çelik tekerli demiryolu taşıtlarının tahrik frekanslarından biri veya birkaçı, çelik raylı demiryolu sisteminin doğal frekanslarına yaklaştıkça, hem taşıtı hem de yolu ciddi ölçüde deforme eden rezonanslar meydana gelmektedir [7]. Öyle ki, travers öz frekansında iki mesnet arasındaki ray eğilme momenti 8-9 kata varan oranlarda artmaktadır [8]. Sonuç olarak, yüksek şiddet (magnitude) ve frekans içerikli yükler altında klasik demiryolu traversleri hedeflenen 40-50 yıllık servis ömrüne ulaşmamaktadır. Klasik demiryolu traverslerinin her yıl %2-5'inin hasarlandığı için değiştirilmesi gerektiği ve bu maliyetin demiryolu bakım masraflarının yaklaşık %12'sine tekabül ettiği belirtilmektedir [9]. Günümüzdeki yüksek aks yükleri ve işletme hızları, travers tasarımında statik hesaplamaların değil, çok daha etkili dinamik darbe yüklerinin şiddet ve frekansları ile traverslerin rezonans frekanslarının da göz önünde bulundurulmasını zorunlu hâle getirmiştir [10].

Günümüzde elyaf donatılı betonlar, paspayı bölgesi dâhil beton elemanın 3 boyutlu çekme dayanımının artırılmasında ve ayrıca kesme kapasitesinin, yorulma ve darbe dayanımlarının artırılmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, kullanılan elyaf ürünlere, yabancı literatürde, beton katkısı (admixture) ifadesi yerine, donatı (reinforcement) tabiri kullanılmaktadır (fiber reinforced concrete vb.). Travers üretimi esnasında çeşitli elyaf takviyelerin kullanımı konusu yurt içinde ve yurt dışında birçok araştırmalara konu olmuştur. Bu kapsamda çelik lifler [11, 12, 13, 14], bazalt lifler [15], çeşitli sentetik lifler [16] ve bunların kombinasyonlarının [17] betonarme demiryolu traverslerinde kullanımı konusu araştırılmış ve yukarıda değinilen statik, yorulma ve darbe dayanımı konusunda çeşitli faydaların elde edildiği tespit edilmiştir. Ancak travers üretimi sırasında düşük su/çimento oranına sahip (zero slump vb.), yüksek dozajlı kırma taş içeren ve planet tipi vb. bıçaklı karıştırıcılar kullanılan bir beton üretimi söz konusu olduğundan, kullanılan elyaf takviye karıştırma esnasında koruyucu kaplaması kırılmayacak, bükülmeyecek, topaklanmayacak ve yerleştirme esnasında da betonun kolayca yerleştirilmesini sağlayacak nitelikte olmalıdır. Bir diğer önemli husus, demiryollarında sinyalizasyon emniyeti için kullanılan elyaf takviyelerin elektrik iletmemesi (elektrik yalıtkanlığına sahip olması) gerekmektedir. Ayrıca traversler her türlü kötü hava şartına açık olduğundan ve tüneller gibi yer altı sularına, trenlerden açığa çıkan atıklara vb. birçok kimyasala karşı dirençli, korozyona uğramayacak nitelikte olmalıdır. Çelik liflerin korozyon riskinin yüksek olmasının yanı sıra, demiryolu emniyeti açısından en önemli faktörlerden biri olan elektrik iletkenliğini artırdığı tespit edilmiş [18], bu nedenle sinyalizasyon hatası verme riski de bulunduğundan demiryollarında pratik manada kullanımı yaygınlaşmamıştır. Cam elyaf takviyelerin ise CNR DT203/2006 standardında da belirtildiği üzere alkali ve nem maruziyetine dayanıklılığı düşüktür [19]. Bazalt liflerin ise koruyucu kaplamalarının beton karıştırma işlemi esnasında kırılması muhtemeldir. Çevresel dayanıklılığı yüksek IR Glass sınıfının ise maliyeti oldukça yüksektir. Sonuç olarak yukarıda değinilen birçok nedenle çelik/cam/bazalt vs. liflerin demiryolu traverslerinde kullanımı çeşitli mahzurlar içermektedir.

Bu çalışmada, demiryolu traverslerinin geliştirilmesi için; nem, alkali, korozyon direnci yüksek ve elektriksel olarak yalıtkan, yerli polipropilen elyaf donatılar (PP, polyolefin polypropylene macro ve micro chopped-fiber reinforcements) kullanılmıştır. Kullanılan polipropilen ürünün maliyeti 16-24 TL/travers dolaylarında olup, bu tutar travers temin maliyetinin yaklaşık %3-6'sına tekabül etmektedir (2021).

2. Metot

Bu çalışma kapsamında B70 tipi öngerilmeli betonarme demiryolu traversleri, PP donatısız standart tipte (B70) ve PP donatılı tipte (B70-PP) olmak üzere 2 grup halinde üretilmiştir. Üretim

esnasında alınan görsel ve kullanılan PP karışım Şekil 1’de sunulmuştur. B70-PP tipi numuneler, TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası’nda daha önce ar-ge ile belirlenen çimento ağırlığının %1,3’ü oranında (her travers için 750 gram) PP kullanılarak üretilmiş olup, optimum dozaj için ayrıca numune üretimine ihtiyaç duyulmamıştır. Eşdeğer üretim temini için çimento, agrega ve su dozajları eşit tutulmuştur. B70 tipi traversler ve kullanılan materyaller hakkında detaylı bilgi önceki çalışmalarda sunulmuştur [1, 10, 20].



Şekil 1. PP donatılı travers üretimi ve kullanılan PP ürünlerin yakından görünüşü

B70 tipi standart öngörülen betonarme demiryolu traverslerinde, yerli polipropilen makro ve mikro elyaf donatılarının (PP) kullanımının sağlayabileceği potansiyel faydaların araştırılması için belirtildiği şekilde numuneler üretilerek klasik TS EN 13230-2 statik eğilme testlerinin yanı sıra, deformasyon ölçümlü eğilme testleri ile rezonans direnci ve sönümleme performansının araştırılması için modern modal testler ve yüksek hızlı darbe testleri yapılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Beton küp numunelerde basınç dayanımı test sonuçları

Traverslerin üretimi esnasında kullanılan betonlardan numuneler alınarak, traversler ve küp numunelere TS EN 13230-1 doğrultusunda 28 günlük kür uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre beton küp numunelerin ortalama basınç dayanımı elyafsız ve elyaf donatılı betonlarda sırasıyla 72,9 MPa ve 77,3 MPa olarak belirlenmiştir. TS EN 13230-1’de travers üretiminde en az C45/55 dayanımı sınıfında beton kullanılması istenmektedir. Buna göre; elyaf donatılı betonun elyafsız betona göre %6 oranında küçük oranda daha yüksek basınç dayanımına ulaştığı ve her iki tip betonun da standartta istenen dayanıma sahip olduğu görülmüştür.

3.2. Travers numunelerinde uygulanan deformasyon ölçümlü statik yükleme test sonuçları

Travers numunelerinde deformasyon ölçümlü statik testler iki şekilde yürütülmüştür. İlki literatürde yaygın olan direkt yüklemeli (DY), deformasyon ölçümlü statik testlerdir. İkincisi ise yeni bir travers tasarımı aşamasında TS EN 13230-2’de istenen, travers ray mesnedine uygulanan, “artırımlı yükleme-kaldırma-tekrar yükleme (YKY)” testleridir. YKY testleri esnasında Şekil 2’de örneği verildiği üzere çatlak başlangıç yükü ve çatlak genişlik ölçümleri için aseton sprey ve hassas mercekler kullanılmış olup, oldukça kapsamlı olan bu testler tek bir numune için ortalama 150 dakika sürmektedir. YKY testi ve yük limit terimleri özet olarak şöyledir: En fazla 120 kN/dk hızla uygulanacak yükleme işlemine ilk elastik (yük kaldırılınca kapanan) çatlak tespit edilen (F_{r1}) veya demiryolu kuruluşunca belirlenen (F_{r0}) yük değerine kadar devam edilir. Bu yük seviyesi 10 saniye ile 5 dakika arasında sabit tutulduktan sonra yük kaldırılıp, merceklerle kalıcı (plastik) çatlak kontrolü yapılır. Daha sonra bir önceki adımda kaydedilen zirve yükünün 10 kN fazlasına kadar aynı hızla yükleme yapılır ve belirtilen süre kadar beklenildikten sonra yük kaldırılıp çatlak kontrolü yapılır. Bu şekilde devam edilerek, yük kaldırıldığında, tamamen kapanmayıp 0,05 mm’lik kalınlıkta görülen çatlak tespit edilirse deneyin ikinci kayıt unsuru ($F_{r0,05}$) bulunmuş

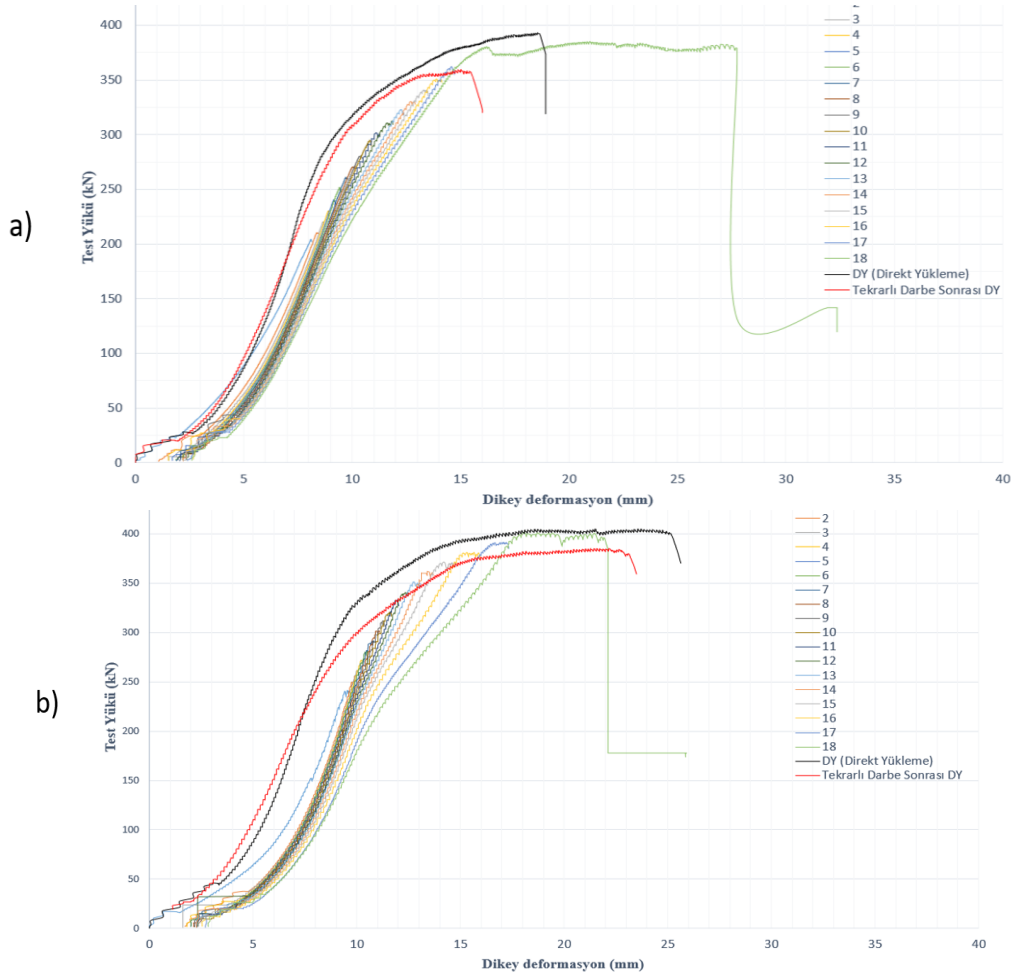
olmaktadır. Son olarak, belirtilen yükleme kaldırma prosedürüne devam edilerek, kesitin daha fazla yük taşıyamadığı, kırılma yükü (F_{RB}) kayıt edilir. Kademeli ve direkt yüklemeli testler sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 1’de sunulmuştur. DY tipi klasik test sonucunda tespit edilen kırılma yükü (F_{RB-D}) olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Testler esnasında çatlak başlangıç yükü belirlenmesi ve çatlak genişlik ölçümü işlemleri

Tablo 1. YKY ve DY tipi statik test sonuçları ile tekrarlı darbe deneyi sonrası kırılma yükü

Numune Tanımı	F_{rr} (kN)	$F_{r0,05}$ (kN)	F_{RB} (kN)	F_{RB-D} (kN)	F_{RB-50} (kN)
B70	200	270	380 (Baz)	393 (+%3,4)	360 (-%5,3)
B70-PP	240	340	400 (+%5,2)	405 (+%6,6)	385 (+%1,3)



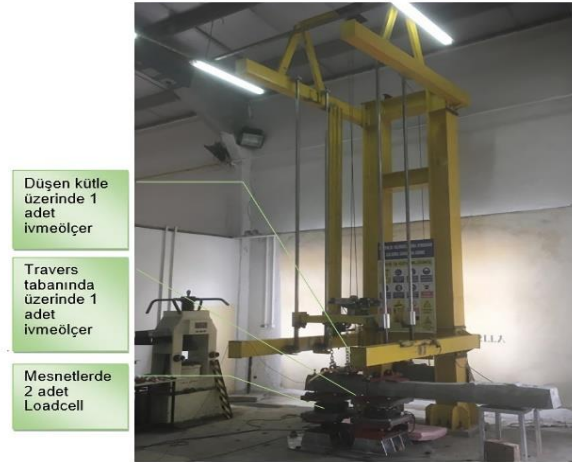
Şekil 3. Travers numunelerinin YKY statik testleri ile tekrarlı darbe testi öncesi ve sonrası DY testlerine ait örnek test yükü (kN)-deformasyon (mm) eğrileri, a. B70 tipi, b. B70-PP tipi numune

Şekil 3’te sunulan YKY ve DY tipi statik test grafikleri incelendiğinde, aşağıda belirtilen tespitler yapılmıştır:

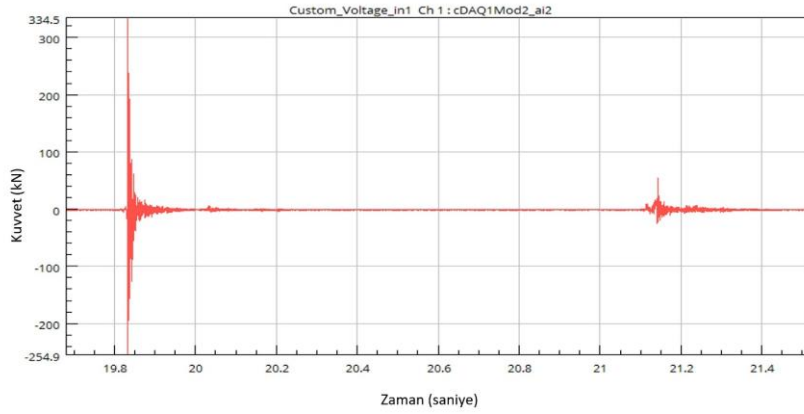
1. Bu çalışma kapsamında literatürde ender görülebilecek bir farklılık olarak, YKY testleri esnasında dikey deformasyon ölçümleri de kayda alınmıştır. Şekil 3 incelendiğinde her yükleme basamağında traverslerin elastisite modüllerinin giderek düştüğü ve yükleme kaldırıldığında plastik bir deformasyonun okunabildiği görülmektedir. Bu metod, halen gözle çatlak kalınlığı ölçümü yapılan EN-13230 testlerine göre daha pratik ve hassastır.
2. YKY testlerinde, son yükleme adımına gelmeden hemen önceki plastik deformasyon düzeyleri incelendiğinde, öngerilme kuvvetinin etkisiyle benzer plastik deformasyonlar (yaklaşık 2,8 mm) söz konusu olduğu görülmektedir.
3. YKY tipi testlerde DY tipi testlere göre, PP donatı kullanılmayan traverslerde %3, PP donatı kullanılan traverslerde ise %1 daha düşük kırılma yükleri elde edilmiştir. Buna göre PP donatı kullanılmayan traverslerin tekrarlı yükleme-kaldırma prosedürü içeren YKY testlerine zaafi az miktarda daha yüksektir. Diğer ifadeyle PP donatı kullanımı ile tekrarlı yükleme-kaldırma prosedürü içeren YKY testleri sonucunda elde edilen kırılma yükü kapasitesi artmaktadır.
4. Yaklaşık 225 kN’luk test yüküne kadar benzer elastisite modülleri söz konusu olduğu, bu yükten sonra PP donatı takviyeli numunelerin aynı yük altında daha fazla deformasyon yaptığı ve YKY testlerinde daha yüksek zirve değerine çıksalar da daha az deformasyon göstererek göçmeye geçtiği görülmektedir.
5. Traverslerde polipropilen (PP) elyaf donatı kullanımı, YKY tipi statik testlerle tespit edildiği üzere; ilk elastik çatlak başlangıcı (F_{r1}), ilk kalıcı (plastik) çatlak başlangıcı ($F_{r0,05}$) ve kırılma (F_{rB}) yükü değerlerinde sırasıyla, %20, %13 ve %5 düzeylerinde olmak üzere, önemli miktarda artış sağlamıştır.
6. DY tipi statik test sonuçlarına göre; PP elyaf donatı kullanımı, kırılma (F_{rB-D}) yükü değerinde %3 düzeyinde düşük bir artış sağlamıştır.
7. PP elyaf donatı kullanımı, DY tipi testlerde %44 düzeylerinde daha fazla deformasyon yapabilmeyi ve dolayısıyla tokluk değerinde büyük bir artışı sağlamıştır. Ancak, beton malzemenin yumuşamaya uğradığı YKY tipi testlerde tam aksi bir davranış meydana gelmiş ve PP içermeyen numuneler yaklaşık %23 daha yüksek deformasyon göstermiştir. Görüldüğü üzere deney metodu, numune davranışını büyük ölçüde etkilemektedir.

3.3. Travers numunelerinde uygulanan tekrarlı darbe testi sonuçları

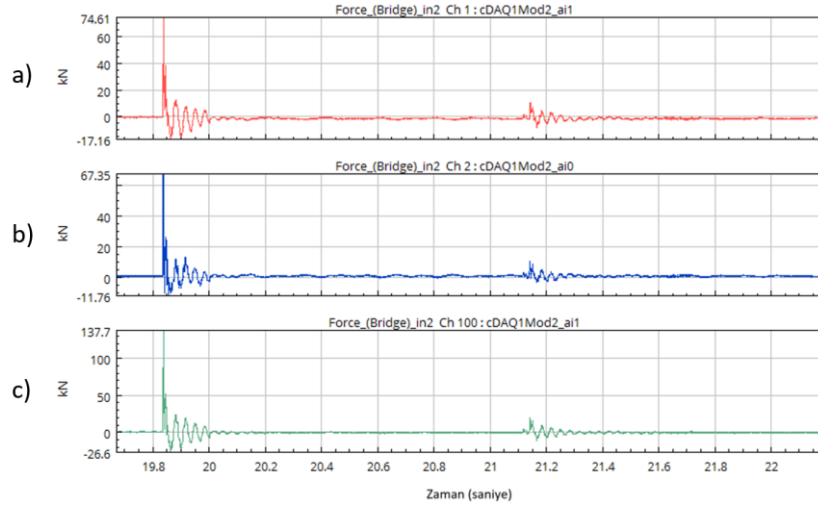
Giriş bölümünde aktarıldığı üzere demiryollarında yüksek değerli darbe yükleri kaçınılmaz olarak meydana gelmektedir ve demiryolu traverslerinin darbe dayanımları en az statik dayanımları kadar önemlidir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında Şekil 4’te fotoğrafı verilen cihazla, demiryolu darbe yüklerini temsil edecek şekilde tekrarlı darbe testleri yürütülmüştür. Deney süresince mesnet aralığı, EN 13230 travers deneylerinde uygulandığı üzere 60 cm olarak ayarlanmıştır. Daha düşük hızla çarpan yüksek kütle etkisinin, yüksek hızla çarpan düşük kütlelere oranla daha az zarar verdiği literatürde belirtilmektedir [14]. Demiryollarındaki yüksek hızlı darbe etkisini meydana getirmek için sabit 3,00 metre yükseklikten (çarpiş hızı 7000 mm/sn = 25,2 km/sa) serbest yük düşüşleri gerçekleştirilmiştir. Düşen kütlenin belirlenmesi için ilk etapta yeterli sayıda travers üzerinde kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Düşen kütlenin 3 metre yükseklikten travers üzerine bağlı üstte metal, altında ray altı plastik selet (elastomer) üzerine düşüşü esnasında, düşüş yapan kütle üzerine monte edilen ivme ölçer yardımıyla alınan ivme kaydı, nCode® analizleriyle Newton’un ikinci hareket kanunu ($F=m.a$ veya kuvvet (kN) = kütle x ivme) doğrultusunda hesaplamaya tabi tutulmuş ve Şekil 5’te sunulan yaklaşık 330 kN’luk maksimum değere sahip darbe kuvveti elde edilmiştir. Düşen kütle etkisiyle üstte yaklaşık 330 kN kuvvet meydana gelirken, enerji kayıpları ve deformasyonlar ardından mesnetlere yerleştirilen 2 adet loadcell vasıtası ile açığa çıkan yük kaydı alınarak Şekil 6’da sunulmuştur.



Şekil 4. Darbe testlerinde kullanılan çarpma çerçevesi ve ölçüm cihazları



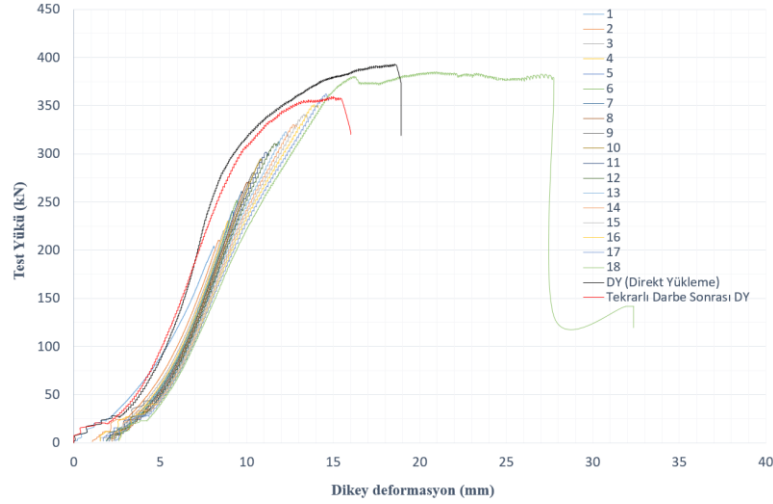
Şekil 5. Düşen kütle etkisiyle meydana gelen kuvvet (F, kN)



Şekil 6. Düşen kütle etkisiyle hareketli (a) ve sabit (b) mesnetler ile toplamda (c) meydana gelen tepki kuvveti (F, kN)

Kalibrasyon işlemiyle belirlenen yeterli şiddet ve hıza sahip darbe yükü, her travers numunesi için 50 defa tekrarlı olarak uygulanmıştır. Bu şekilde, demiryolunda normal işletim şartları altında ortalama 1-2 yıl içerisinde meydana gelmesi beklenen darbe yükleri temsil edilmiştir. Giriş kısmında sunulduğu üzere; demiryolu yüklerinin şiddet (kN) değeri kadar tesir süresi ve frekans

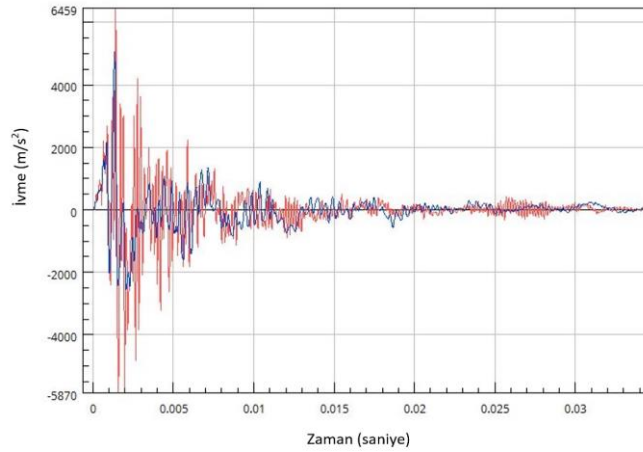
içeriği de büyük önem taşımaktadır. Statik testlerde büyük hasar bırakan 330 kN'lık yük değeri, gerek PP donatılı gerekse PP'siz traverslerde, yükün oldukça kısa süre tesir etmesi ve meydana gelebilecek kılcal çatlakların öngerilme kuvveti etkisiyle hemen kapatılması nedeniyle, travers dış yüzeyinden gözle görülebilir kalıcı bir çatlığa sebebiyet vermemiştir. Tekrarlı darbe yüklemeleri sonrasında numuneler daha önce açıklanan DY tipi yüklemeli statik testlere tabi tutulmuş, ulaşılan zirve yük değerleri Tablo1'de F_{RB-50} (kN) sütunu altında, deformasyon bazlı grafikleri ise Şekil 3 ve 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Standart B70 ve PP donatılı varyasyon için YKY testi son adımı, DY tipi statik test ve tekrarlı darbe yükleri sonrasında uygulanan DY testi sonuçları (test yükü-kN, dikey deformasyon-mm)

Test sonuçlarına göre, PP donatı kullanılmayan klasik B70 tipi traverslerin kırılma yükünde (F_{RB-50}), darbe uygulanmayan aynı numunelerin kırılma yüküne oranla (F_{RB-D}) %8 miktarında önemli bir düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş PP donatı kullanılan B70-PP tipi traversler için ise %5 miktarındadır. Buna göre PP kullanılan traverslerin darbe zafiyeti daha düşüktür. Ancak her iki travers üretiminde de öngerilmeli üretim tekniğinin kullanılması nedeniyle ve diğer açıdan kullanılan PP donatı özellikleri itibariyle yeterli iyileşme kaydedilmemiştir. Bununla birlikte, uygulanan tekrarlı darbe yükleri ardından PP donatı kullanılmayan klasik B70 tipi traverslerin kırılma yükü (F_{RB-50}), TS EN 13230-2 doğrultusunda TCDD tarafından Teknik Şartnamelerde istenilen en az 375 kN'lık kırılma yükü değerini sağlayamamış, 360 kN'da kırılma gerçekleşmiştir. PP donatı kullanılan B70-PP tipi traverslerin kırılma yükü (F_{RB-50}) ise istenilen dayanım şartı sağlanarak kırılma 385 kN'da gerçekleşmiştir.

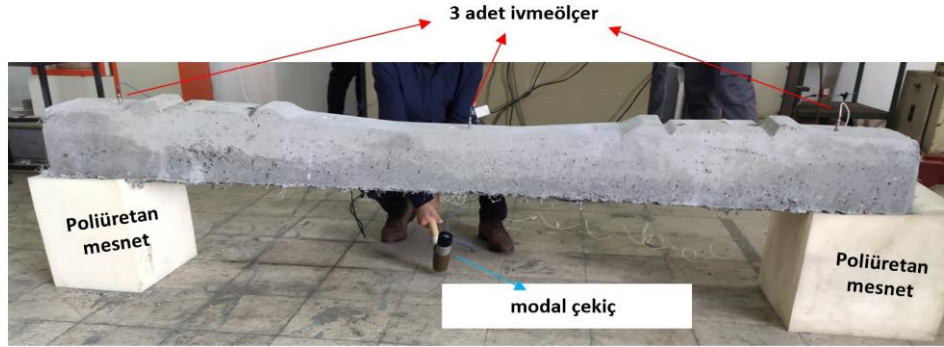
Test müddetince ayrıca tekrarlı darbe yükü deneyi esnasında traverste meydana gelen ve çevreye yayılan titreşim, travers üzerine konumlandırılan ivmeölçerler ile kayda alınmış ve aynı grafikte kıyaslamalı olarak Şekil 8'de sunulmuştur. İvme kayıtları karşılaştırıldığında, aynı darbe yükü tesiri altında klasik B70 traverslerde ulaşılan maksimum ivme değeri 6459 m/s^2 iken, PP elyaf donatı kullanılan numunelerde %22 daha düşük olarak 5056 m/s^2 olarak tespit edilmiştir. Zirve ivme değeri için söz konusu olan bu avantaj erken sönümlenme süresi performansı açısından da benzerdir.



Şekil 8. 330 kN'luk darbe yükü altında traverslerde meydana gelen ivme kayıtlarının (m/s²) karşılaştırması (Kırmızı: B70-NO-PP, Mavi: B70-PP)

3.4. Travers numunelerinde uygulanan modal test sonuçları

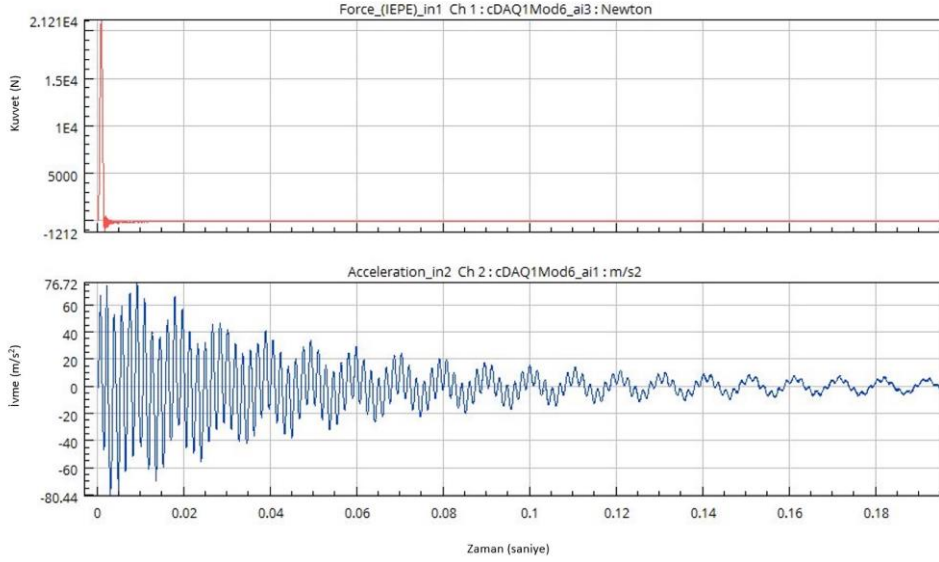
Çalışma kapsamında darbe testlerinin yanı sıra, giriş kısmında sunulan gerekçeler doğrultusunda, modern analiz yöntemleri kullanılarak, traverslerin doğal frekans değerlerinin ve modal sönümlenme oranlarının tespiti yapılmıştır. Traverslerin mesnetlenme biçimine göre doğal frekansları oldukça değişmekte, daha rijit mesnetler altında doğal frekansı kayda değer düzeyde artmaktadır. Çalışma kapsamında hazırlanan deneysel çalışma düzeneği Şekil 9'da verilmiş olup, traversler 400 mm kalınlığında yumuşak poliüretan blok üzerine konarak serbest (free-free modda) salınım yapmasına imkân tanınmıştır. Şekilden görüleceği üzere, traverslerin üst yüzeylerinde iki uç kısma ve orta noktaya ivmeölçerler sabitlenmiştir.



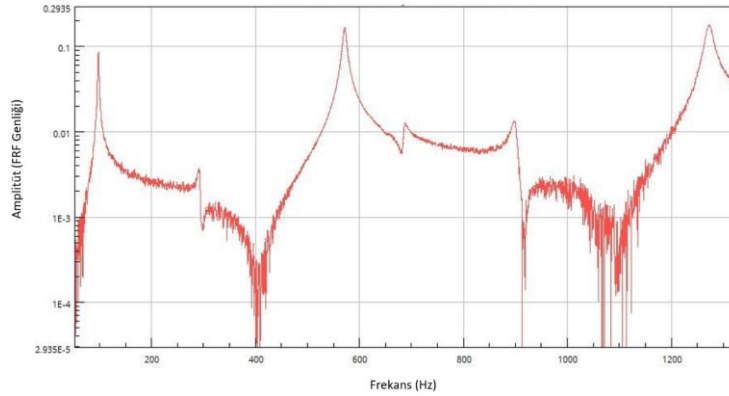
Şekil 9. Modal test düzeneği

Şekil 9'da görülebilen, kuvvet sensörü içeren, ivmeölçerler ile aynı data logger sisteme bağlı modal çekiç ile de travers alt-orta kısmından tek-tok darbeler vurularak traversin serbest salınım yapması sağlanmış ve yaklaşık 10'ar saniye aralıklarla minimum 5 adet çekiç darbesi uygulanmıştır. Darbe uygulanması esnasında modal çekiç üzerinden ölçülen kuvvet ölçümleri ve ivme ölçümleri alınmıştır. B70-NO-PP varyasyonu için tek bir çekiç darbesi esnasında alınan kuvvet ve ivme datası örneği Şekil 10'da sunulmuştur. Bu şekilde her bir darbe ayrı ayrı nCode analiz ağacı ile analiz edilmiş ve Şekil 11'de örneği 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. nCode ile yapılan analizler esnasında "overall" metodu kullanılmış, çıktı tipi olarak "power" tercih edilmiştir. Dolayısıyla elde edilen FRF grafiği tipi, PSD (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 Experimental Modal Analysis modülü kullanılarak sönümlenme oranı (damping ratio) hesaplamaları yapılmıştır. Eğri oturtma metodu olarak “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’de özet halinde sunulmuştur.



Şekil 10. B70-NO-PP varyasyonundan çekici darbesiyle alınan kuvvet (N) ve ivme (m/s²) dataları



Şekil 11. B70-NO-PP varyasyonu için elde edilen FRF grafiği örneği

Tablo 2. Üretilen traverslerin ilk dikey rezonans frekansı için modal analiz sonuçları

Numune Tanımı	1. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	2. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	3. Dikey Rezonans Frekansı (Hz)	İlk Rezonans Frekansı Sönümlenme Oranı	Sönümlenme Oranındaki Artış (%)
B70	98,0	571,5	1272,2	0,994	0% (Baz)
B70-PP	100,8	583,9	1288,0	1,088	9%

Tablo 2 incelendiğinde, klasik öngerilmeli B70 tipi traverslerin sönümlenme oranının B70-PP tipi traverslere göre %9 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki varyasyonda da B70 tipi öngerilmeli betonarme traverslere ait kalıplar kullanıldığından, rezonans frekanslarında kayda değer bir değişim oluşmadığı, bu konuda düzenleme yapılması için kalıp boyutlarında değişiklikler yapılmasının mecburi olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, B70 tipi standart öngerilmeli betonarme demiryolu traverslerinde, yerli polipropilen makro ve mikro elyaf donatılarının (PP) kullanımının sağlayabileceği potansiyel faydaların araştırılması için numuneler üretilerek TS EN 13230-2’de geçen ağır şartlara sahip statik testler (YKY) ile deformasyon ölçümlü klasik statik testler (DY) uygulanmış, ayrıca rezonans direnci ve sönümlenme performansının araştırılması için modern modal testler ve yüksek hızlı tekrarlı darbe testleri yapılmıştır. YKY testleri esnasında, literatürde ender görülebilecek bir şekilde, dikey deformasyon ölçümleri de kayda alınmıştır. Bu metodun, halen gözle çatlak kalınlığı ölçümü yapılan EN-13230 testlerine göre daha pratik ve hassas bir alternatif olarak değerlendirilebileceği görülmüştür. Demiryolundaki darbe yüklerini temsil eden, yüksekte serbest kütle düşüşü esaslı çarpışma (impact) testlerinin de; gerek yeni tip traverslerin tasarımında, gerekse mevcut traverslerin kabulü aşamasında kullanılacak, demiryolu yüklerini simülasyona elverişli ve hızlı bir test metodu olduğu görülmüştür. Nitekim dünyanın çeşitli ülkelerinde bu yönde standart test usulleri belirlenmeye başlanmıştır (AS 1085-14:2019 vb.) Yine aynı gerekçelerle titreşim sönümlenme ve rezonans direncini gösteren modern modal testlerin, milli demiryolu travers modellerinin geliştirilmesi için mutlaka esas alınması gereken bir analiz yöntemi olduğu görülmüştür. Nitekim özellikle Çin, Japonya ve Almanya tarafından son yıllarda geliştirilen traverslerde, modal sönümlenme oranları ve rezonans direnci doğrultusunda travers kesitleri klasik mono-blok traverslerden çok farklı hale getirilmiştir.

Çalışma süresince yapılan testler sonucunda, öngerilmeli betonarme traverslerde PP donatı kullanımı ile özellikle YKY tipi statik testlerde; ilk elastik çatlak başlangıcı (F_{r1}), ilk kalıcı (plastik) çatlak başlangıcı ($F_{r0,05}$) ve kırılma (F_{rB}) yükü değerlerinde sırasıyla, %20, %13 ve %5 düzeylerinde olmak üzere, önemli miktarda artış sağlanmıştır. Tekrarlı darbe testleri esnasında ise yeni traverslerin, daha düşük performans kaybı ile TS EN 13230-2 doğrultusunda TCDD tarafından Teknik Şartnamelerde istenilen kırılma yükü şartını sağlamaya devam ettiği görülmüştür. Test müddetince darbe yükleri altında traverslerde meydana gelen ve çevreye yayılan titreşimler de kayda alınmış ve zirve ivme değerinin PP elyaf donatı kullanılan numunelerde %22 daha düşük olduğu ve daha erken sönümlenme sağladığı görülmüştür. Son olarak uygulanan modal testler esnasında da, B70-PP tipi traverslerin modal sönümlenme oranlarında %9 oranında artış kaydedilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında kullanılan polipropilen elyaf donatılarının, çalışmada ele alınan tüm testler bakımından, demiryolu traverslerinin dayanım ve sönümlenme karakteristiklerinde faydalar sağladığı, getireceği travers temin maliyetinin %3-6’sı dolaylarındaki ek maliyetin ise orta vadede amorti edilebileceği ve traverslerin servis ömürlerinin artırılmasında fayda sağlayabileceği öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Tübitak Ardeb Dairesi Başkanlığı’nın 120M403/2020 sayılı projesi kapsamında desteklenmektedir. Ayrıca katkılarından dolayı TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürü Sn. Ali KARABEY’e ve Polyfibers® firması yetkilisi Sn. Faraz MALİK’e teşekkürlerimizi bildiririz.

Kaynakça

- [1] F. Çeçen, B. Aktaş, “Yeni nesil demiryolu traversleri ve yerli frp donatı kullanımının deneysel araştırması,” *Demiryolu Mühendisliği*, Ocak 2021, Sayı: 13, Sayfa: 53-64. doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>

- [2] 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>
- [3] 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>
- [4] A. M. Remennikov, M. H. Murray, S. Kaewunruen, "Dynamic design guidelines for prestressed concrete sleepers," 2008. Erişilebilir (27.08.2021): <https://ro.uow.edu.au/engpapers/492/>
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] 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
- [8] 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%3Dpamukkale>
- [9] W. Ferdous, A. Manalo. "Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies –review of current practice," *Engineering Failure Analysis*, April 2014, vol. 44, pp. 17-35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.04.020>
- [10] 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
- [11] M. Kozak, O. Ünal, "Bazalt agregası ile üretilen beton travers de çelik lifin kullanılabilirliğinin araştırılması," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2014, vol. 18(3), pp. 15-21
- [12] Ahsan P., Stephen J. F., "Fatigue of steel-fibre-reinforced concrete prestressed railway sleepers," *Engineering Structures*, 2017, Vol. 141, pp. 241-250, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.025>
- [13] Doo-Yeol Y., Jin-Young L., Hyun-Oh S., Jun-Mo Y., Young-Soo Y., "Effects of blast furnace slag and steel fiber on the impact resistance of railway prestressed concrete sleepers," *Cement and Concrete Composites*, 2019, Volume 99, Pages 151-164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.015>
- [14] Hyun-Oh S., Doo-Yeol Y., Young-Soo Y., "Enhancing the resistance of prestressed concrete sleepers to multiple impacts using steel fibers," *Construction and Building Materials*, 2018, Volume 166, Pages 356-372, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.095>
- [15] Purtseladze I. B., "Application of basalt fiber in reinforced concrete sleepers," *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, 2020, Vol. 23, No. 2, pp. 382-384, Erişilebilir (27.08.2021): <http://ijpsat.ijsh-t-journals.org/>
- [16] Christophe C., Dayani K. H., Olivia M., Fidelis M., Brendan K., Todd C., "Evaluation of macro-synthetic fibre reinforced concrete as a sustainable alternative for railway sleepers," *Innovation for Sustainable Infrastructure*, 2020, pp 471-476, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_73
- [17] Ghasem P., Majid G., "Using steel and polypropylene fibres to improve the performance of concrete sleepers," *ICE Proceedings Structures and Buildings*, 2019. Volume 173, Issue 9, pp. 690-702. doi: <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00154>
- [18] Younghoon B., Sukhoon P., "Effect of steel fiber content on structural and electrical properties of ultra high performance concrete (UHPC) sleepers," *Engineering Structures*, 2020, Volume 222, 111131, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111131>
- [19] Anonim. "Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars (CNR-DT 203/2006)," National Research Council-Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (CNR), Rome, Italy. 2006. Erişilebilir (27.08.2021): <https://www.cnr.it/en/node/2639>

[20]F. Çeçen, B. Aktaş, “Lamine cfrp donatılı traverslerin deneysel ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Temmuz 2021, Sayı: 14, Sayfa: 26-38. doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.869946>

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

Yüksek Lisans eğitimini “Karbon – Fiber Donatıyla Öngerilmemiş Monoblok Demiryolu Beton Traversi Geliştirilmesi” teziyle Gaziosmanpaşa Üniversitesinde tamamlamış, halen Erciyes Üniversitesi’nde doktora eğitimine devam etmektedir. CFRP, GFRP ve çeşitli yerli ürünlerle milli demiryolu traverslerinin geliştirilmesi amaçlı ar-ge ve patent çalışmaları devam etmektedir.

E-Posta: ferhatcecen@tcdd.gov.tr



Bekir AKTAŞ

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini Erciyes Üniversitesi, Doktora Eğitimini ise Süleyman Demirel Üniversitesinde tamamlamış, halen Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Ulaştırma alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.