



Yeni LCR Tipi Traverslerin Demiryolu Hat Rijitliğine Etkisinin Araştırılması

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: 19.04.2022, Kabul/Accepted: 02.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Bu çalışma kapsamında, demiryolu hat rijitliği ve traverslerin eğilme modüllerinin bu hat rijitliğine etkisi, geniş bir literatür taraması, basitleştirilmiş örneklendirmeler ve karşılaştırmalı deneylerle incelenmiştir. Deneyler esnasında, standart B70 tipi önerilmeli beton demiryolu traversleri ve ülkemizde son yıllarda geliştirmeye alınan yeni LCR tipi traversler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, yeni tip traverslerin kütlesi ve eğilme modülü bakımından, ahşap traverslerin optimum eğilme modülü avantajını ve beton traverslerin yüksek kütle ve çevresel dayanıklılık avantajlarını bir araya getirerek, optimum bir çözüm sağladığı görülmüştür. Ayrıca sahip olduğu bu optimum eğilme modülünü, servis ömrü boyunca koruyup koruyamayacağı da incelenmiş ve yeni tip traverslerin tekrarlı yükleme adımlarında eğilme modülünü büyük oranda koruduğu ve yüksek değerli yüklerle rağmen plastik deformasyonlarının en az önerilmeli rakipleri kadar düşük olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Demiryolu hat rijitliği, Hat esneme direnci, Hat modülü, Travers eğilme modülü

Investigation of the Effect of New LCR Type Sleepers on Railway Track Stiffness

Abstract: In this study, the railway track stiffness and the effect of the flexural modulus of sleepers on track stiffness were investigated. For this purpose, an extensive literature review, simplified examples, and comparative tests were used. During the tests, standard B70 type prestressed concrete railway sleepers, and the new LCR type sleepers which have been developed in Türkiye, were used. As a result of the study, it has been seen that the new type of sleepers provides an optimum solution in terms of mass and flexural modulus, combining the optimum flexural modulus advantage of wooden sleepers and the high mass and environmental durability advantages of concrete sleepers. In addition, it has been examined whether it can maintain this optimum modulus throughout its service life, and it has been observed that the new type of sleepers largely maintains its flexural modulus during repeated loading steps. In addition, plastic deformations occurring even at high load levels are at least as low as seen in prestressed competitors.

Keywords: Railway track stiffness, Track flexural resistance, Track module, Sleeper flexural modulus

1. Giriş

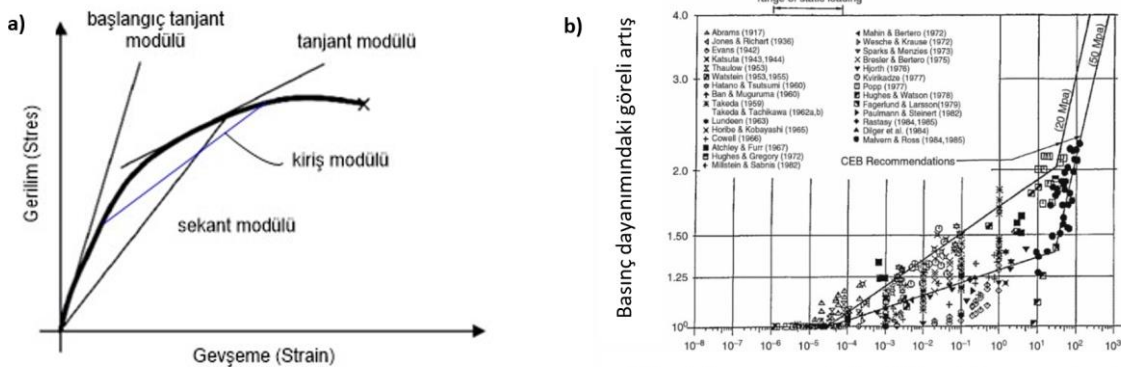
Elastisite modülü, gerilme uygulanan bir malzemenin deforme olmaya karşı sergilediği karakteristik direnci gösteren bir ölçüm birimidir [1]. Elastisite modülü, mikro ölçekte atomlar arası bağlardan, makro ölçekte sürtünme etkisine, yükleme hızına, yönüne ve mertebesine, deformasyon ölçüm yöntemine ve malzemenin sıcaklığına kadar birçok faktörden etkilenmektedir. Ancak malzemenin boyutundan, şeklinden ve mesnetleme faktörlerinden bağımsızdır. Örneğin S220 sınıfı çelik bir malzemenin Young elastisite modülü ortalama 200 GPa olup, bu değer söz konusu malzemenin boyutlarından, biçiminden ve mesnet düzeneğinden bağımsızdır.

Rijitlik terimi ise (İngilizce “stiffness” manasıyla) elastisite modülünün yanı sıra, boyut, şekil ve mesnetleme faktörleri gibi çeşitli dış etkenlere de bağlı olan, nispeten daha kolay belirlenebilen, benzer bir direnç davranışını işaret etmektedir. Sonuçta, elastisite modülü, hammaddelerin

Atıf için/Cite as: F.Çeçen, B.Aktaş, “Yeni LCR tipi traverslerin demiryolu hat rijitliğine etkisinin araştırılması,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 36-50, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1105999

sergilediği karakteristik bir özellik iken; rijitlik, bu hammadde veya kompozit ürünle üretilmiş bir komponent veya yapının özelliğidir [2]. Örneğin klasik bir çimento harcının elastisite modülü 10-30 GPa aralığında değer almaktadır. Ancak aynı elastisite modülüne sahip çimento harcı ile üretilen farklı boyutlardaki numunelerin rijitlikleri farklı sonuçlar vermektedir. Bunun gibi, boyutları ve elastisite modülü aynı olan iki çimento harcı numunesine, eğilme deneyi uygulandığında, mesnet aralığı değişince, daha kısa mesnet aralığında daha yüksek rijitlik elde edilmektedir. Genel olarak, daha yüksek elastisite modülüne sahip malzemeler kullanıldığında, daha yüksek rijitliğe sahip yapılar elde edilmektedir. Bu yüzden, literatürde bu iki terimin zaman zaman birbiri yerine kullanıldığı da görülmektedir. Gerek elastisite modülü, gerekse rijitlik değerleri demiryollarının dizayn ve kullanım sürecinde ihtiyaç duyulan önemli parametrelerdir. Bununla birlikte elastisite modülüne daha çok dizayn aşamasında, rijitlik değerine ise hem dizayn hem kullanım aşamasında ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü şekil, boyut ve mesnet etkenlerinden arındırılarak elde edilen elastisite modülü, örneğin farklı traverslerin demiryolu hattında sergileyeceği farklı direnimsel davranışlarını değerlendirmekte yeterli bilgi sağlamayacaktır. Elastisite modülü değerlerine, daha çok demiryolu hatlarının modellenmesi esnasında, örneğin sonlu eleman analizlerinde hammaddeler tanımlanırken ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüze kadar, gerilme ve birim şekil değiştirmenin ölçüm yöntemlerine bağlı olarak, birçok farklı elastisite modülü tanımlanmıştır. Young modülü, kesme modülü, Bulk modülü, kopma modülü ve eğilme modülü bunlardan birkaçıdır [1]. Homojen ve izotropik bir materyal için, ideal şartlar altında, eğilme, çekme ve basınç modülleri veya eğilme ve çekme dayanımları birbiri ile eşittir [3]. Ancak birçok katı materyal, homojenliğine ve izotropik veya anizotropik olmasına göre farklı eksenlerde, farklı elastisite modülü sergilemektedir [1]. Örneğin travers imalatında da kullanılan ahşap malzemelerin içerdiği liflere paralel istikamette elastisite modülü ortalama 12,5 GPa iken, liflere dik ekseninde ortalama 0,6 GPa'dır. Bunun gibi gerilme-deformasyon davranışı lineer (doğrusal) olmayan malzemelerin, gerilme-deformasyon eğrilerinin farklı bölgelerinde farklı eğimler ve dolayısıyla farklı elastisite modülleri göstermesi de söz konusudur. Örneğin beton hammaddenin gerilme-deformasyon davranışı genel olarak lineer değildir. Bununla birlikte beton malzemelerin nihai dayanımlarının yaklaşık %30'luk seviyesine kadar lineer ve elastik davranış sergilediği kabul edilmektedir [4]. Lineer davranış sergilemeyen bu malzemelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi için Şekil 1.a'da örnekleri sunulmuş; başlangıç, sekant, giriş ve tanjant modülleri gibi birçok yöntem önerilmiştir [5]. Bu yöntemlerden gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin test müddetince takibi için en yaygın kullanılanlardan biri sekant modülü olup, bu özelliğinden dolayı statik modül olarak da adlandırılmaktadır [6].

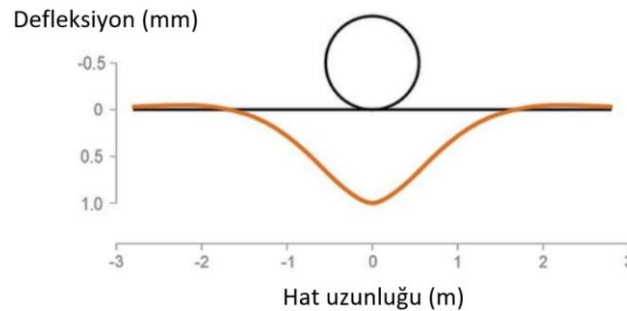


Şekil 1. a) Lineer olmayan malzemelerin elastisite modülleri belirlenirken uygulanan bazı hesaplama yöntemleri [5], b) Yükleme hızına bağlı olarak beton basınç dayanımındaki artışı gösteren çalışmalar [7]

Demiryolu yapı elemanlarının elastisite modülleri veya rijitlikleri, hat performansı ve servis ömrü bağlamında, ana belirleyici etkenlerdendir. Şekil 1.a'da örnekleri verilen modüller, statik yükleme etkenleri gözetilerek oluşturulmuştur. Demiryollarında etkiyen yükler ise dinamik, kısa etki süreli

(short duration) ve yüksek yükleme hızına (high strain rate) sahiptir. Genel olarak yükleme hızı arttıkça elde edilecek gerilme-deformasyon eğrisinin eğimi ve zirve noktası (dayanımı) da artmaktadır. Nitekim Şekil 1.b’de, iki farklı statik basınç dayanımına sahip betonun yükleme hızına bağlı olarak dayanımlarındaki artışı gösterir birçok (yaklaşık 28) çalışmanın ve CEB normunun bu iki farklı beton için önerdiği formülasyon sonuçları özet halde verilmiştir [7]. Şekilden görüldüğü üzere, yükleme hızı statik sınırlardan çıkıp ($>10^{-5}$), demiryollarında da görülen yüksek hızlara ulaştıkça, her iki malzemede de dayanım artışı %300’leri bulabilmektedir. Ancak şekildeki bir diğer dikkat çeken husus, 50 MPa dayanıma sahip betondan yaklaşık %27 daha düşük elastisite modülüne ve 20 MPa dayanıma sahip betonun, dinamik yüklemeler altındaki göreceli dayanım artışının daha yüksek olmasıdır. Görüldüğü üzere, dinamik kuvvetlere maruz kalan malzemelerin dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biri elastisite modülleri ve rijitliktir. Bu konuda detaylı bilgi literatürde mevcut [8] olup, genel olarak, diğer faktörler eşdeğer kalmak şartıyla; daha zor esneyen, elastisite modülü yüksek, rijit, yüksek yoğunluklu ve düşük boşluklu, penetrasyon ve deformasyona müsaade etmeyen nesnelere veya yüzeylere dinamik kuvvet uygulandığında daha yüksek kuvvetler ortaya çıkmaktadır.

Demiryolu inşasında kullanılan her bir yapı elemanının, fiili kullanıma başladığı anda, ayrı ayrı karakteristik elastisite modülleri ve rijitlikleri söz konusudur. Bunun gibi, tüm bu yapı elemanlarının çeşitli şekillerde birleştirilmesi ile elde edilen demiryolu yapı sisteminin de kendine özel hat rijitliği (track stiffness) söz konusudur. Bu hat rijitliği, gerek dizayn, gerek inşa, gerekse bakım sürecinde yararlanılan önemli bir parametredir. Nitekim hat rijitliğinin, yola ve taşıta gelen dinamik gerilme ve titreşimleri belirleyen en önemli parametre olduğu ve en uygun (optimum) değerlerinin belirlenerek bu değerler arasında kalınmasına dikkat edilmesi gerektiği literatürde belirtilmektedir [9]. Çünkü gerek yapı elemanlarının gerekse demiryolu hattının rijitlikleri, kullanım durumuna ve mevsimsel etkilere bağlı olarak zamanla artıp azalabilmektedir. Bu durum demiryolu ekiplerince düzenli takip edilerek, hat rijitliğinin bakım işlemleriyle optimum seviyede tutulmasına çalışılmaktadır. Demiryolu hatlarının rijitliği analiz edilirken, literatürde çeşitli yöntemlerden yararlanıldığı, bunlar içerisinde en yaygın olanların ise “hat modülü” ve “hat esneme direnci” olduğu görülmektedir. Hat modülü, birim ray uzunluğu başına düşen statik kuvvetin, meydana getirdiği birim deformasyona oranıyken (N/mm^2), hat esneme direnci birim defleksiyon başına düşen toplam statik hat direncini (N/mm) ifade etmektedir [10]. Hat esneme direncinin hesaplanması adına örnek verilecek olursa, Şekil 2’de tasvir edildiği üzere [11], örneğin 125 kN statik tren teker yükü etkisiyle hat’ta meydana gelen maksimum defleksiyon 1 mm ise, bu iki değer oranlanmasıyla statik hat esneme direnci 125 kN/mm olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca Şekil 2’deki gibi; teker yükünün her iki tarafında negatif defleksiyonlar da söz konusu olmaktadır. Bu negatif defleksiyonlar, yüksek kütleli beton traversler kullanılan demiryolu hatlarında ihmal edilebilecek seviyede düşüktür [12]. Ancak düşük kütleli traversler, Şekil 2’de örneklendiği gibi, detayları ileride sunulacak çeşitli dezavantajlara yol açmaktadır. Şekil 2’de teker merkezi hizasındaki maksimum defleksiyon değerlerinin ise, uzun kaynaklı raylar kullanılan hatlarda 2 milimetreyi geçmediği [12], köprü, tünel ve döşeme tipi rijit uygulamalarda (slab-track vb.) daha da düştüğü [13], aksine demiryolu hat kalitesinin düşmesi ile örneğin contalı ray birleşim lokasyonlarında 10 mm’leri bulabildiği ifade edilmektedir [14].

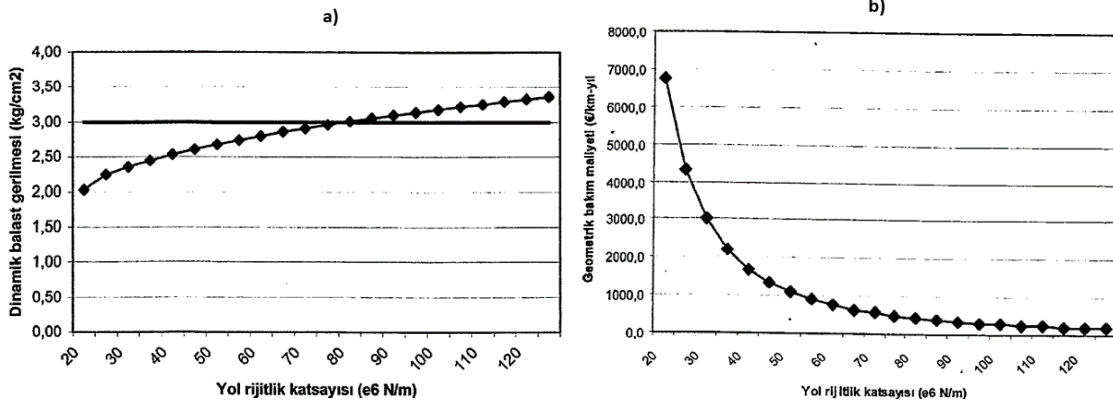


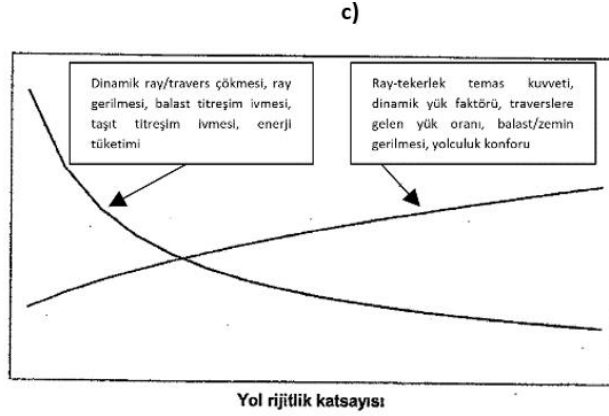
Şekil 2. Tren tekerleri etkisinde raylardaki şekil değişikliğinin miktar ve biçimi [11]

Bu aşamada, ideal hat rijitliğinin ne düzeyde olması gerektiği akla gelmektedir. Literatürde, demiryolu hattının bir miktar esnek kabiliyete sahip olmasının (flexibility) özellikle dinamik darbe yüklerinin kısıtlanması açısından (Şekil 1.b'deki gibi) fayda sağlayacağı belirtilmektedir. Bununla birlikte bu esnekliğin elastik olması (resilience), yani taşıt geçişinden sonra tamamen geri dönmesi ve hat kalitesinin korunmaya devam edilmesi de önemlidir. Özellikle hat rijitliğinin korunmasının daha zor olduğu kurplarda ve makaslarda, bu yüzden yüksek oranda deray riski söz konusu olduğu yaygın bilinen bir gerçektir [11]. Bu durum yüksek hızlı demiryolu hatlarında daha da büyük öneme sahip olup, rayların 1 veya 2 milimetreden daha fazla defleksiyona uğramaması istenilmektedir. Söz konusu defleksiyonların sınırlandırılması ise hat rijitliği ile ilgili olup, rijitlik ve defleksiyon arasında ters orantılı bir ilişkili söz konusudur. Örneğin 120 kN statik teker yükü ile işletilen bir demiryolu hattında, hat rijitliği 60 kN/mm ise, statik yükler altında en fazla 2 mm defleksiyon meydana gelirken, hat rijitliği 120 kN/mm'ye yükselince defleksiyon değeri 1 mm'ye düşmektedir. Belirtilen defleksiyon değerlerinin artış veya azalışı demiryollarında birçok faktörü de etkilemektedir. Örneğin Şekil 3.a'da görüldüğü üzere; düşük hat rijitliği, balast ve zemine aktarılan eğilme momenti ve gerilmeyi azaltmaktadır [9]. Genel olarak, balast tabakasına gelen gerilmelerin 3 kg/cm²'nin altında kalması istenilmektedir. Dolayısıyla Şekil 3.a'dan görülebileceği üzere, yol rijitliğinin 80 kN/mm'nin (80x10⁶ N/m) altında kalması önerilmektedir. Düşük yol rijitliğinin diğer faydaları; contalı ray birleşimlerdeki darbe yükünü azaltması, taşıtın düşey titreşimlerini azaltarak yolculuk konforunu artırması, traversler üzerinde daha yaygın bir yük dağılımı sağlanarak traverslere gelen yüklerin azaltılması sayılabilir. Nitekim Şekil 4'te bu konuda yapılmış örnek çalışma sonuçları görülmektedir [15, 16]. Bu çalışmalarda hat rijitliği, hat esneme direnci yöntemi ile değil, hat modülü yöntemiyle değerlendirilmiştir. Görüldüğü üzere hat rijitliği, travers eğilme modülü arttıkça belli bir değere kadar artmakta (≈ 20 GPa) ve daha sonra yaklaşık sabit kalmaktadır. Buna benzer olarak, balast oturması da belli bir değerden sonra (≈ 20 GPa) sabit kalmaktadır. Düşük hat rijitliğinin çeşitli avantajları olduğu gibi, bazı önemli dezavantajları da söz konusudur. Hat rijitliği azaldıkça ray-travers çökmesi, ray eğilme momenti ve dolayısıyla ray gerilmeleri, balast titreşimleri ve hat'tın bozulma hızı, trenlerin harcandığı çekim gücü artmaktadır. Diğer açıdan, yeterli derecede yüksek yol rijitliği, demiryollarının olmazsa olmazı, taşıt stabilitesi açısından da gereklidir ki; ray mantarında dönme ve buna bağlı olarak ekartmanda artışlar önlenmelidir. Ayrıca Şekil 3.b'de görüldüğü üzere hat rijitlik katsayısı arttıkça, geometrik bakım maliyetleri düşmektedir. Sonuçta Şekil 3.c'den anlaşıldığı üzere, yol rijitliğinin optimum bir aralıkta tutulması gerekmektedir. Alman Demiryollarında yüksek hızlı demiryolu hatlarında optimum ray çökmesi 1,2-1,5 mm ve buna bağlı olarak optimum yol rijitliği 50-100 kN/mm olarak belirlenmiştir [16]. Bununla birlikte optimum yol rijitliği, tren hızına bağlı olarak da değişmektedir. Örnek bir çalışmada, 200 km/sa tren hızı için optimum değer 50 kN/mm olarak, 300 km/sa için bu değer artarak 78 kN/mm olarak hesaplanmıştır [9]. Buraya kadar sunulan teker yüklerinin ve hat rijitlik değerlerinin statik esaslı olduğuna dikkat edilmelidir.

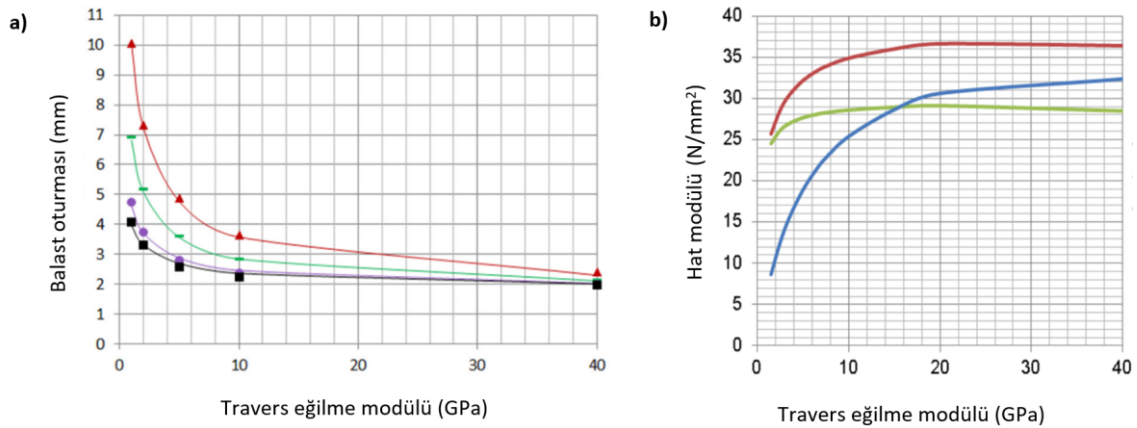
Günümüzde dünyada ve ülkemizde, en yaygın kullanılan travers tipi, öngerilmeli beton traverslerdir. Bu traversler yaklaşık 50 yıllık servis ömrü hedeflenerek üretilmektedir. Ancak 1960'lı yıllar itibarıyla kullanımına başlanılarak git gide yaygınlaşan bu travers tipi, günümüze (2022) kadarki yaklaşık 60 yıllık kullanım tecrübesi ışığında, son yıllarda sayısı giderek artan akademik çalışmalarda da belirtildiği üzere, statik yükler altında sergilediği üstün performansı, dinamik tren yükleri altında sergileyememiştir [12, 17-28]. Örneğin yakın zamanda yapılan bir araştırmada, öngerilmeli beton traverslerin fiili servis ömürlerinin, 20 yıl ile 41 yıl arasında oldukça değişkenlik gösterdiği ifade edilmektedir [29]. Öngerilmeli traverslerin demiryollarında hedeflenen yüksek servis ömrüne ulaşamamasında önemli bir etken, yüksek dayanımlı beton ve öngerilme kuvveti kaynaklı çok yüksek eğilme modülleridir. Literatürde belirtildiği üzere, öngerilmeli beton traverslerin eğilme modülleri gereğinden fazla yüksektir ve dizaynları esnasında ahşap traverslere göre daha yüksek en kesit boyutlarına ve daha fazla balast kalınlığına (yaklaşık 23 cm ilave) ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca düşük sönümleme özelliği gösterdiğinden

ray ve balast kalitesinin üst seviyede tutulmasına ihtiyaç duyulmaktadır [28, 30, 31]. Bu aşamada önerilmeli betonarme traverslerin neden yüksek elastisite modülü sergilediği akla gelmektedir. Bu durum basitçe şöyle izah edilebilir: Kompozit bir hammadde olan beton, çimento harcı ve agregaların çeşitli oranlarda karıştırılması ile üretilmektedir. Çimento harcının basınç yüklemesi altında elastisite modülü yaklaşık 10-30 GPa iken, beton üretiminde kullanılan agregaların basınç yüklemesi altında elastisite modülleri yaklaşık 45-85 GPa aralığındadır. Bu iki hammaddenin karışımı ile üretilen betonun basınç yüklemesi altındaki elastisite modülü ise, karışım oranlarına ve çeşitli diğer etkenlere bağlı olarak, her iki hammaddenin elastisite modüllerinin arasında bir değer almakta ve genel olarak 20-50 GPa aralığında değişmektedir [4]. Bilindiği üzere, beton hammaddenin basınç ve kesme dayanımı avantajları olsa da, çekme dayanımı düşüktür. Bu yüzden çekmeye maruz kalacak beton yapı elemanları, çelik donatılarla takviye edilerek "betonarme" hammaddeler meydana getirilmektedir. Söz konusu çelik donatıların Young elastisite modülleri ise 200 GPa dolaylarındadır. Bu şekilde üretilen klasik betonarme elemanların eğilme yükü altındaki elastisite modülleri, donatı konum ve oranına bağlı olarak donatısız beton hammaddenin çok üzerinde değerler almaktadır. Bu çelik donatılara ön-germe veya ard-germe uygulanarak üretilen önerilmeli betonarme elemanların eğilme yükü altındaki elastisite modülleri ise, önerilme kapasitesinin deformasyona karşı ilave bir kapasite sağlaması nedeniyle, bu sayılan elemanlar içerisinde en yüksek seviyeye çıkmaktadır. Öyle ki; önerilmeli betonarme traverslerin eğilme modülleri, diğer tüm (ahşap/kompozit/plastik/çelik/ betonarme) traverslere göre daha yüksek olmaktadır. Eğilme modülleri birbirinden farklı olan tüm bu traverslerin dizayn yükleri de birbirleriyle uyumsuz olmaktadır. Çünkü önerilmeli betonarme traverslere, yüksek rijitlikleri nedeniyle daha yüksek yükler transfer olmakta, bu nedenle de statik kapasiteleri yüksek olsa da, dinamik yükler altında çeşitli bozulmalar ortaya çıkmaktadır [28]. Örneğin, her ikisinde de yüksek modüllü beton kullanılan, önerilmeli beton traverslerin (B70 vb.), önerilmesiz beton traverslere (B450 vb.) göre %100 daha yüksek dizayn yükü ile üretilmek zorunda olduğu belirtilmektedir [17, 20]. Önerilmesiz beton traverslerin böyle bir avantajı söz konusu olsa da, içerdiği çelik donatı ve bağlantı çubuklarının yüksek korozyon riski nedeniyle servis ömrünün daha kısa olacağı düşünülerek yaygınlaşmamıştır. Bununla birlikte Paris-Londra arası yüksek hızlı demiryolu hatları da dâhil birçok projede kullanıldıkları da görülmektedir.





Şekil 3. Demiryolu hat rijitliğine bağlı olarak çeşitli parametrelerdeki değişim [9]



Şekil 4. Travers eğilme modülüne bağlı olarak, balast oturması (a) ve hat modülünün (b) değişimi [15]

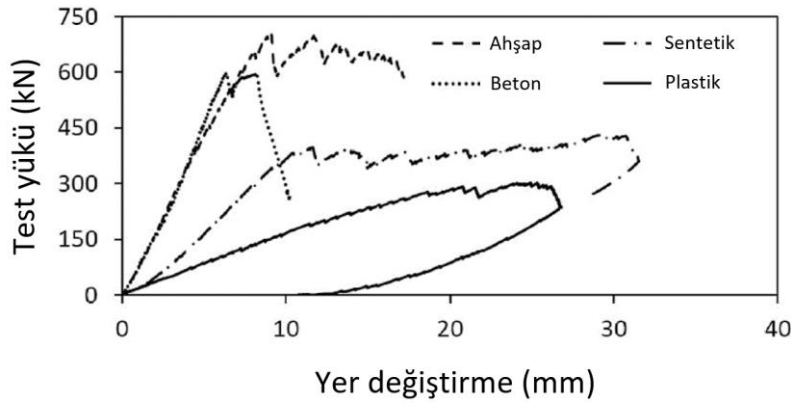
Günümüzde en yaygın kullanılan söz konusu önerilmeli betonarme traversler yaygınlaşınca kadar dünyada en yaygın kullanılan travers tipi bilindiği üzere geleneksel ahşap traverslerdir. Ahşap traverslerin en önemli avantajları düşük elastisite modülleri, yüksek sönümlenme katsayıları ve esnekliğidir [28]. Bu konuda örnek bir çalışmada, üstyapı elamanı olarak önerilmeli beton ve ahşap traversler kullanılan iki farklı demiryolu hattından geçen eşdeğer iki trenin etkisi analiz edilmiş ve önerilmeli beton traversli hatların, daha rijit yapısı nedeniyle, ortaya çıkan dinamik kuvvet değerlerinin arttığı belirlenmiştir [12, 17]. Bununla birlikte, beton materyalle üretilen traverslerin hat ve makas stabilitesini sağlamakta büyük paya sahip olduğu da ifade edilmektedir [28, 32, 33]. Beton traverslerin özellikle yüksek kütleleri ile yol geometrisinin stabilitesine katkıda bulunduğu belirtilmektedir [29]. Beton traverslerin yüksek kütlelerinin düz yolda (aliyman) dahi negatif defleksiyonları önlemeye yaradığı Şekil 2 kapsamında aktarılmıştı. Günümüzde dünya genelinde kullanılmakta olan traverslerin ortalama kütleleri şu şekildedir: ahşap travers 105 kg, standart önerilmeli yekpare beton travers 280 kg, önerilmeli ikiz blok betonarme travers 230 kg, çelik travers 110 kg, plastik/kompozit traversler 100 kg, düşük kesit yükseklikli önerilmeli beton travers 240 kg [28]. Görüldüğü üzere beton traverslerin, diğer tiplere göre önemli bir kütle avantajı söz konusu olup, yakın zamanda dizayn edilen yeni tiplerde bu kütleleri daha da yükselmiştir. Bu durum her ne kadar makineli tamirat zorunluluğu getirirse de, günümüzün yüksek hız ve işletim kapasitesi şartları altında, hat stabilitesi açısından çok zaman zorunlu bir ihtiyaç halindedir. Ahşap traverslerin düşük kütlelerinin haricinde, kesme dayanımının ve biyolojik etkilere dayanıklılığının düşük olması, hammadde kaynaklarındaki kısıtlar ve üretiminde kullanılan kreozotun zararlı çevresel etkileri düşünülerek, kullanımı birçok ülkede terk edilmiş veya minimum seviyelere çekilmiş, en yaygın kullanıldığı ülkelerde dahi alternatif traverslerin araştırıldığı belirtilmiştir [28]. Bu konuda tarihimizden bir örnek, 1300 kilometrenin üzerindeki uzunluğu ile birçok coğrafyadan geçen Hicaz demiryolu hattının inşası

esnasında yaşanmıştır. Ahşap traverslerin çeşitli bölgelerde, özellikle çöl iklimlerindeki dayanıksızlığı tespit edilerek, bu bölgelerde dönemin şartlarında alternatif bir travers olan çelik traversler kullanılmıştır [34]. Ahşap traverslerin belirtilen çeşitli dezavantajlarına rağmen, rijit zemin lokasyonlarında (köprü, makas, tünel vb.) beton traversler fazlasıyla yetersiz kaldığından, bu lokasyonlarda birçok ülkede halen ahşap traversler kullanılmaya devam etmektedir [31].

Görüldüğü üzere; gerek ahşap traverslerin, gerekse standart beton traverslerin çeşitli avantaj ve dezavantajları söz konusu olup, günümüzde, söz konusu avantajları bir araya getiren ve dezavantajları kısıtlayan, gerçek yüksek servis ömrüne ulaşacak alternatif travers tiplerine ihtiyaç vardır. Diğer bir ifadeyle, ahşap traversler gibi düşük elastisite modülüne, yüksek sönümleme oranına ve esneklik karakteristiklerine sahip, öte yandan öngörülmesi beton traversler gibi yüksek kütleyle, çevresel etkilere dayanıklılığa ve yüksek eğilme, basınç ve kesme dayanımına sahip traverslere ihtiyaç duyulmaktadır [28, 35]. Bu amaçla geçmişten günümüze dünya genelinde çeşitli alternatif travers tipleri geliştirilmeye çalışılmış ve halen çalışılmaktadır. Bunlardan ilki kompozit/plastik traverslerdir. Bu travers tipleri genellikle ahşap traverslerin yerini almak üzere geliştirilmiş/geliştirilmektedir. Bu bağlamda özellikle ahşap traversli hatlarda tamir/bakım/revizyon işlemlerinde veya beton traversli hatlarda makas/tünel/köprü vb. rijit lokasyonlarda kullanım alanına sahiptir. Polimer/plastik/kompozit sektörleri gibi çok büyük bir alan tarafından ar-ge çalışmaları desteklenen bu alternatif traversler, genel olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategori (Type 1) genellikle geri dönüştürülmüş polimerlerden üretilmekte olup, içerisinde elyaf takviye içermemekte veya kısa boylu dağınık elyaflarla (chopped fibers) takviye edilmektedir. Bu tipteki traversler, mekanik bakımdan genelde oldukça zayıf karaktere sahiptir [36]. İkinci tipteki traversler (Type 2) ise boyuna istikamette takviyelere sahip olup, genelde cam elyaf ve çelik donatılar kullanılmaktadır. Bu tip, ilk tipe göre daha yüksek eğilme dayanımı ve rijitliğe sahiptir, ancak kesme ve basınç dayanımı düşük kalmaktadır [28]. Son ve üçüncü tip ise (Type 3) hem boyuna hem enine istikamette takviyeler içerdiğinden, kesme ve basınç dayanımı öncekilere göre daha yüksektir [28]. Her üç tip traversin üretiminde kullanılan reçineler oldukça değişkenlik göstermekte olup, bunlardan biri olan sentetik kompozit reçinelerle üretilen traverslerin günümüze kadar Japonya, Avrupa ve Avustralya'da denenmiş olsa da, gevrek özellik gösterdiğinden demiryolları için çok uygun olmadığı literatürde belirtilmektedir. Geri dönüştürülmüş plastikten imal traverslerin ise kullanılan malzemeye bağlı olarak büyük değişkenliklere sahip olduğu, ilk etap laboratuvar testlerini geçebilmesine rağmen, sahada erken deforme oldukları raporlanmıştır [37-40]. Kompozit traverslerin düşük kütleli, gereğinden fazla düşük elastisite modülleri, reçine veya cam elyaf kaynaklı düşük yorulma dayanımları vb. diğer dezavantajları haricinde, günümüz maliyetleri ahşap traverslerin 5-10 katı kadar daha yüksektir [33]. Sonuç olarak dünya genelinde uzun süredir yürütülen birçok ar-ge çalışmaları söz konusu olmasına rağmen, bu alternatif traversler, günümüzde halen belirtilen lokasyonlar haricinde yaygınlaşmamıştır. Ayrıca bu travers tipleri hakkında dünya genelinde yaygın kabul gören elastisite modülü veya eğilme modülü değerleri de henüz yayımlanmamıştır. Örnek olarak AREMA normu (Chapter 30-35) bu alternatif traverslerin elastisite modülünün en az 1,17 GPa olmasını isterken, Japon standartları (JIS E 1203:2007) 6 GPa minimum değerini vermekte, yeni Avustralya standardı (AS1085.22:2020) ise herhangi bir elastisite modülü belirtmemektedir. ISO 12856 standardı ise 1,17 GPa ile 6 GPa şartlarına haiz 3 kategorili bir yöntem sunmaktadır [41].

Bu çalışmada incelenen ikinci alternatif travers tipi, kesit yüksekliği düşürülmüş öngörülmesi beton traverslerdir. Günümüzde ahşap traversler, belirtilen nedenlerle terk edilmektedir. Ancak binlerce kilometrelik ahşap traversli hat işleten bazı ülkeler, bir anda tüm ahşap traversli hatların beton traversli hatlara dönüşümünü sağlayamamaktadır. Bunun yerine, bu ülkelerde ahşap traversli hatların bakım-tamirat-revizyon işlemlerinde beton traversler kullanarak, kademeli bir geçiş hedeflenmiştir. Ancak mevcut öngörülmesi beton traverslerin, ahşap traverslerle önemli düzeyde elastisite modülü ve kesit boyutu farkı olduğundan, birlikte kullanılmaları halinde önce yüksek modüllü olana yük bineceğinden, erken sürede deforme oldukları görülmüştür. Bu nedenle, öngörülmesi beton traverslerin boyutları küçültülerek, ahşap traversli hatların tamir ve

bakımında kullanılabilir, ahşap traverslerle yakın kesit boyutlarına ve eğilme modülüne sahip, yeni bir öngerilmeli beton travers modeli oluşturulmuştur. Ancak bu traverslerin kesit yüksekliği düşürülse de, öngerilmeli beton demiryolu traverslerinin üretiminde yüksek dayanımlı beton (>45 MPa) kullanılması gerekmektedir. Bu durum üretim aşamasında betonun yüksek öngerilme kuvvetini emniyetli bir şekilde ve yorulma limiti aşılmadan taşıması için gerektiği gibi, öngerilme kuvveti kayıplarını azaltmak ve çatlak başlangıç yükünü artırmak da amaçlanmaktadır [42]. Yüksek dayanımlı betonun sönümlenme özellikleri ise ahşap malzemeye göre çok düşüktür. Öte yandan kesit boyutu düşürüldüğü için bu alternatif traversler, normal öngerilmeli beton traverslere göre önemli düzeyde kapasitesi düşürülmüş vaziyettedir. Dolayısıyla bu alternatif travers tipi, belirtildiği üzere ahşap traversli hatların tamir ve bakım çalışmalarında geçici süreli kullanım politikası haricinde yaygınlaşmamıştır. Buraya kadar değinilen ahşap, düşük kesitli öngerilmeli beton, sentetik ve plastik traverslere uygulanan 5 noktalı eğilme deneyleri sonucunda elde edilen yük, defleksiyon grafikleri Şekil 5'te sunulmaktadır [39]. Deney prosedürünün detayları çalışmada verilmekte olup, grafikte geçen test yükü iki ray mesnedine uygulanan değerlerin toplamıdır. Belirtilen bu alternatif travers tipleri haricinde, son birkaç yıl içerisinde Ar-Ge'si yapılmaya başlanılan hem yüksek dayanımlı düşük elastisite modüllü betonla üretilen öngerilmeli betonarme traversler de söz konusudur. Laboratuvar ortamında üretilen test numunelerinin seri üretime geçirilip geçirilmediği bilinmemektedir [43]. Ancak öngerilmeli travers üretim felsefesi devam ettirildiği için yapılan travers testlerinde de görüldüğü üzere, gerilme-deformasyon davranışında ve nihai travers ürününün eğilme modülünde büyük bir değişiklik elde edilmemiştir.



Şekil 5. Çeşitli traverslere uygulanan eğilme testleri sonucunda elde edilen yük, defleksiyon eğrileri [39]

Sonuç olarak; demiryolu hat rijitliği, üzerine gelen yüklerin şiddet ve frekanslarının değişiminde büyük öneme sahiptir [12]. Traverslerin elastisite modülleri ve kütleleri ise, hat rijitliğini ve tüm demiryolu sisteminin davranışını etkilemektedir ve gerek hat rijitliği açısından gerekse Şekil 1'de izah edilen yüksek etki hızlı dinamik yüklere dayanımı açısından büyük öneme sahiptir [39]. Birçok farklı travers üzerinde yapılan test ve analizler sonucunda, traverslerin eğilme modüllerinin, balast modülünden dahi önemli olduğu ve ray mesnedindeki eğilme momentinin (sagging), travers merkezindeki eğilme momentine (hogging) oranının, travers modülü gereğinden fazla yüksek veya düşük olması halinde arttığı belirlenmiştir [41]. Dolayısıyla yüksek servis ömrü ve performans için traverslerin optimum elastisite modülüne ve yeterli yüksek kütleyle sahip olması gerekmektedir. Ancak demiryolu traversleri hakkında dünya genelinde yaygın kabul gören eğilme modülü veya kütle değerleri henüz yayımlanmamıştır. Hâlbuki birbirinden çok farklı elastisite modülü ve kütleyle sahip mevcut traverslerin davranışları ve üzerlerine gelen yükler birbirlerinden çok farklı olmaktadır [41]. Bu durum, mevcut test ve dizayn yöntemlerinin yetersizliğini gözler önüne sermekte ve demiryolu kuruluşları açısından büyük endişe ve kararsızlığa neden olmaktadır [41, 44, 45].

Bu çalışma kapsamında, standartlardaki belirtilen eksikliğe rağmen, literatürde mevcut akademik çalışmalar baz alınarak çeşitli önerilerde bulunulacaktır. Şekil 3.c'den görüldüğü üzere, optimum

hat rijitliği aralığından daha fazla veya daha düşük bir uygulama, bir açıdan avantaj sağlayabileceken, başka açılardan büyük dezavantajlara neden olabilecektir. Bu bağlamda, Şekil 4'ten de görülebildiği gibi, yaklaşık 10 GPa değerinden daha düşük eğilme modülüne ve/veya gereğinden düşük kütleyle sahip traverslerin demiryolunda kullanımı, buraya kadar değinilen çeşitli dezavantajlara yol açacak olmasının yanı sıra, demiryolu seyrüsefer güvenliği açısından da problemlere yol açabilecektir. Çünkü demiryolu traverslerinin en önemli görevi, iki ray arasındaki yatay ve dikey milimetrik mesafeleri (ekartman) korumaktır. Bu görevini yerine getirmesi için yeterli kütleyle sahip olması ve aşırı elastik ve plastik deformasyona uğramaması gerekmektedir. Özellikle yüksek hızlı demiryolu hatlarındaki kritik mesafelerin dinamik demiryolu kuvvetleri altında birkaç milimetreden fazla değişmesi, yalpa hareketleri vb. nedenlerle dinamik kuvvetlerin artmasına, dahası deray denilen, tren tekerlerinin raydan düşmesine ve kazalara da neden olabilmektedir [22]. Gereğinden fazla düşük elastisite modülüne veya yetersiz kütleyle sahip (örneğin bazı plastik/kompozit tipi) traversler, hat esneme direncinin gereğinden fazla düşük olmasına, yolun kaymasına veya havalanmasına, raydaki eğilmelerin ve hat deformasyonunun artmasına neden olabilmektedir. Bunun zıddı olarak, optimum düzeyden daha yüksek elastisite modülüne sahip sürekli döşeme tipi (slab-track vb.) uygulamalarda ise, ray bağlantı elemanlarında, ray yüzeylerinde ve balast parçacıklarında erken dönemde hasarlar ve kırılmalara dikkat edilmelidir [46]. Öte yandan, örneğin yekpare travers kullanılması halinde, belirli bir aralıkta (eker) sabit kalınmak şartıyla, Şekil 4'ten de görüldüğü üzere, yaklaşık 20 GPa eğilme modülü değerinden sonra hat rijitliğinde yüksek düzeyde bir artış da görülmemektedir. Buna göre, Şekil 1'de örneği sunulan dinamik yük dayanıklılığı ve diğer birçok fayda gözetilerek traverslerin elastisite modüllerinin 10-20 GPa düzeylerinde olmasının optimum fayda sağlayacağı söylenebilir. Ancak daha önce belirtildiği üzere, her malzeme gibi, demiryolu traverslerinin de kullanım ömrü süresince elastisite modülleri belli bir miktarda düşmektedir. Bu düşüşün cüzi miktarda olması, traverslerin 40-50 yıllık servis ömürlerinin yorulma etkisinde fazla azalmayacağını işaret ettiği gibi, demiryolu rezilyansının da artacağını göstermektedir. Sonuç olarak basit bir yaklaşımla, demiryolu traverslerin eğilme modüllerinin ilk kullanım esnasında %20'lik bir emniyet payı bırakılarak örneğin 12-20 GPa aralığında kalması halinde, yaklaşık 40-50 yıllık planlanan servis ömrü sonunda optimum aralıkta kalması sağlanabilecektir. Hedeflenen bu değerlerin kullanım süresince ne denli düşebileceği, yükleme kaldırma yeniden yükleme (YKY) esaslı EN 13230 testleri veya dinamik ve yorulma testleriyle tahkik edilebilecektir.

Sonuçta, geniş literatür taraması ardından belirlenen bu eğilme modülü değerleri, günümüzde çoğunlukla ahşap traversler tarafından karşılanabilmektedir. Ancak ahşap traverslerin düşük kütleleri, çevresel dayanıksızlığı ve düşük kesme dayanımı gibi dezavantajlarının da giderilmesi gerekmektedir. Bu dezavantajların ise büyük ölçekte öngörülmesi betonarme traverslerde bulunmadığı, sunulan literatür özetinden görülmektedir. Sonuçta her iki traversin avantajlarını toplamak adına, geliştirilecek traverslerin; 12-20 GPa eğilme modülüne ve en az 230 kg kütleyle sahip, çevresel etkilere dayanıklı bir betondan imal edilmesinin, her iki travers tipinin avantajlarını toplayarak, dezavantajlarını kısıtlayabilecek bir çözüm olacağı düşünülmektedir. Ancak, bu çalışmada örnek bir yaklaşım olarak sunulan bu değerlerin; hat işletim hızları ve diğer tüm faktörler gözetilerek, her demiryolu kuruluşunun, farklı hat lokasyonları için; çeşitli iklim özellikleri ve işletim etkenleri gözetilerek detaylı analizlerle belirlenmesi gerekmektedir.

2. Metot

Bu çalışmada, buraya kadar sunulan literatür bilgilerinin analizi ile belirlenen 12-20 GPa aralığında eğilme modülüne ve en az 230 kg kütleyle sahip alternatif bir travers tipi belirlenmeye çalışılacaktır. Bu bağlamda, ülkemizde geliştirilmeye başlanılan yeni bir travers tipi olan LCR tipi traversler ele alınacaktır. Söz konusu yeni tip traversler, öngörülmesi beton traverslerle yaklaşık eşit kütleyle sahip olup, bu açıdan belirlenen minimum 230 kg'lık kütle şartını fazlasıyla sağlamaktadır. Söz konusu traverslerin hedeflenen eğilme modülü kriterlerini sağlayıp sağlamadığının tahkiki için ise, eşdeğer kalıp boyutlarında (B70 tipi) ve eşdeğer dayanımdaki

betonla, standart B70 tipi ard-germe metoduyla üretilen öngerilmeli betonarme traversler ve yeni 30-VRTC-SND-PP tipi LCR traversler üretilmiştir. Bu şekilde LCR tipi traverslerin yeni beton donatılandırma yönteminin eğilme modülü bağlamında sağlayabileceği potansiyel faydaların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Söz konusu traverslerin üretimi ve deneyler esnasında alınan örnek görsel Şekil 6'da sunulmakta olup, yeni üretim tekniği ve günümüze kadar uygulanan testler literatürde mevcuttur [21-26].



Şekil 6. Yeni geliştirilen 30-VRTC-SND tipi L-CFRPU donatılı betonarme demiryolu traversinin üretimi

Literatür özetinde detaylı sunulduğu üzere, elastisite modülü ve rijitlik kavramları birbirinden farklıdır ve her ikisinin belirlenmesi ve kullanımı esnasında bu farklılığa dikkat edilmelidir. Örneğin Şekil 5'te, ahşap ve düşük kesit boyutlu öngerilmeli beton traverslerin yük-defleksiyon davranışları verilmiş olup, görüldüğü üzere mesnet aralığı değişmediği için traverslerin tip ve boyutlarına bağlı olan eğilme rijitlikleri birbirine oldukça benzer sonuçlanmıştır. Zaten literatür özetinde sunulduğu üzere, düşük kesit yükseklikli beton traversler, ahşap traverslerle benzer rijitliğe sahip olacak şekilde dizayn edilmektedir ve bu durum beklenen bir davranıştır. Ancak çalışmada, elastisite modülü hesaplaması yapılırken, büyük bir farklılık ortaya konulmuştur. Bunun ilk nedeni elastisite modülü hesaplama formülasyonlarında, deney mesnet aralığı ve numune boyut etkisinin ortadan kaldırılması için kullanılan çeşitli faktörlerdir. Diğer nedeni ise, betonarme ve ahşap malzemeler için kullanılan atalet momenti hesaplama yöntemlerinin bu iki farklı ürünü karşılaştırmaya müsait olmamasıdır. Dolayısıyla araştırmacılar, düşük kesit yükseklikli öngerilmeli beton travers için, ahşap rakibine göre çok daha yüksek elastisite modülü hesaplamışlardır. Gerek elastisite modülü, gerekse rijitlik değerleri demiryollarının dizayn ve kullanım sürecinde ihtiyaç duyulan önemli parametrelerdir. Bununla birlikte elastisite modülü daha çok dizayn, rijitlik değerleri ise kullanım aşamasında daha yaygın kullanıma sahiptir. Nitekim literatürdeki bu çalışmada da görüldüğü üzere; çeşitli formülasyonlara bağlı olarak az-çok boyut etkenlerinden arındırılan elastisite modülü değerleri, demiryollarında hâlihazırda kullanılan farklı tip ve boyutlardaki traverslerin sergileyeceği farklı direnimsel davranışlarını değerlendirmekte yeterli ve doğru bilgi sağlamayacaktır.

Bu çalışmada, demiryolu traverslerinin deforme olmaya karşı gösterdikleri dirençler değerlendirilirken, Şekil 6'da sunulan EN 13230 standardında geçen travers merkezinde negatif moment tayini deney düzeneği kullanılacaktır. Çünkü özellikle beton traverslerin kesit boyutları her üç ekseninde de oldukça değişken olduğundan ve ray bağlantı elemanları bağlamak için çıkıntı-girintiler bulunduğundan, traverslerin istenilen her noktasına deney yükü uygulanamamakta ve/veya mesnetleme yapılamamaktadır. Öte yandan mesnet açıklığının belli bir minimum değer üzerinde olması da gerekmektedir. Çünkü giriş bölümünde belirtildiği üzere, eğilme deneylerinde mesnet aralığı birbirine yaklaştırıldıkça rijitlik artmakta, betonarme elemanlarda kemerleme etkisi (arch action) meydana gelmekte, sonuçta öngerilmeli ve öngerilmemiş betonarme elemanların rijitlikleri yaklaşık eşit hale gelmektedir. Bu yüzden eğilme direnci ölçümlerinde, doğru bir elastisite modülü veya rijitlik değeri tespit ve karşılaştırması yapılması için, “kesme açıklığı/betonarme eleman derinlik ölçüsü” (shear span/effective depth ratio) oranının yüksek olması (>6) gerekmektedir [26]. Bu bağlamda mesnetler arası mesafenin travers yüksekliğinin (175-215 mm) 6 katından fazla olduğu (1500 mm) EN 13230 negatif moment dayanımı tayini deney düzeneği, eğilme direnci ölçümleri açısından oldukça uygun görülmüştür. En yüksek deney

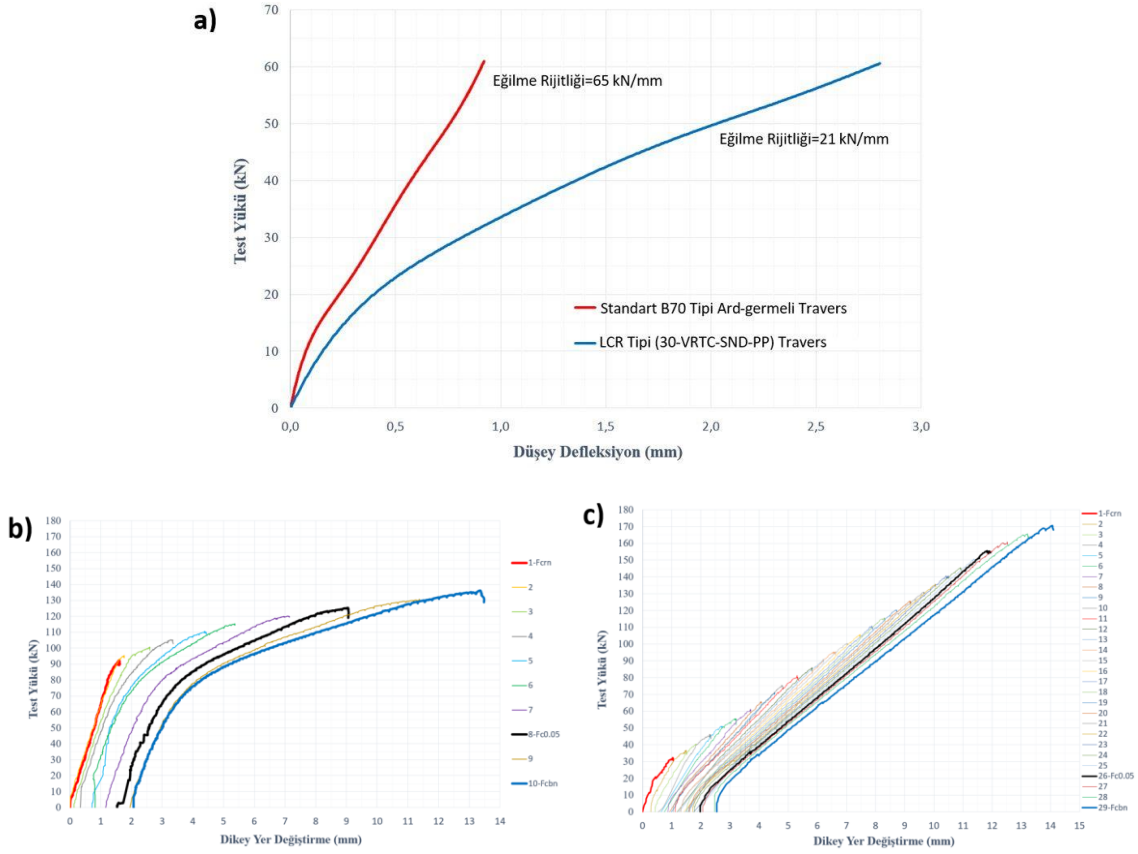
yükü ise, demiryolu servis yüklerini temsil etmesi ve betonun %30-40'lık lineer kapasitesi içerisinde kalınması durumları gözetilerek 60 kN olarak belirlenmiştir. Buraya kadar sunulan tespit ve yöntemler, literatürdeki çeşitli çalışmalarda da benzer şekilde yürütülmüştür [47, 48]. Sonuç olarak, karşılaştırma yapılacak traverslere 60 kN'luk test yükü uygulanarak, LVDT yardımıyla test başlangıcından sonuna dek traverslerin orta-düşey defleksiyon (mid-span deflection) değerleri kayda alınmıştır. Elde edilen test grafikleri ve maksimum test yükü ve karşılık gelen defleksiyon değerleri belirlenerek, iki farklı hesaplama yürütülmüştür. İlk hesaplamada eğilme rijitliği (R), 60 kN'luk test yükünün, karşılık gelen maksimum defleksiyon değerine (mm) oranlanmasıyla "kN/mm" cinsinden kolayca hesaplanabilmektedir. İkinci hesaplamada ise, literatürde mevcut çeşitli eğilme rijitliği hesaplama yöntemlerinden biri kullanılmış olup, formülasyonu Denklem 1.'de sunulmuştur [49]. Bu çalışmada travers boyutları değiştirilmeden her iki travers tipinde de B70 tipi travers kesit boyutları kullanıldığından, her iki travers tipi için elde edilen rijitlik ve eğilme modüllerinde eşit oranda artış/azalış elde edilmiştir.

$$E_{flex} = \frac{L^3 R}{4 w h^3} \quad (1)$$

- E_{flex} : Eğilme modülü
L : Deney mesnet aralığı (1500 mm)
R : Eğilme rijitliği (N/mm)
w : Travers Genişliği (\approx 185 mm)
h : Travers Yüksekliği (175 mm)

3. Bulgular

Yapılan testler sonucunda elde edilen yük-defleksiyon eğrisi örneği Şekil 7.a'da sunulmuştur. Buna göre traverslerin eğilme rijitliği ve eğilme modülleri, B70 tipi önerilmeli betonarme travers için sırasıyla 65 kN/mm ve 55 GPa; yeni LCR tipi (30 VRT SND PP) traversler için ise sırasıyla 21 kN/mm ve 18 GPa olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere, literatür özetinde aktarıldığı gibi, önerilmeli betonarme traverslerin eğilme modülleri oldukça yüksektir. Yeni LCR tipi traverslerin eğilme modülleri ise, önerilmeli traverslerin yaklaşık üçte biri düzeyinde olarak, hedeflenen yaklaşık 12-20 GPa'lık eğilme modülü aralığı içindedir. Söz konusu traverslerin sergiledikleri bu eğilme modüllerini, demiryolu servis yükleri altında ne denli koruyabilecekleri ise bu traversler için geçmişten günümüze uygulanan çeşitli testlerden anlaşılabilir. Örnek bir çalışma sonucu Şekil 7.b (B70 tipi) ve 7.c'de (LCR tipi) sunulmuştur. Şekillerden görüldüğü üzere LCR tipi traverslerde, önerilmeli traverslerle benzer şekilde, her defasında artan yüklere rağmen grafik eğimlerinde (R) önemli bir değişiklik meydana gelmemekte, ayrıca grafiklerin sol-alt köşelerinden görülebilen plastik deformasyon düzeyleri oldukça düşük kalmaktadır. Buna göre, yeni tip traverslerin mevcut elastisite modüllerini 40-50 yıllık servis ömürleri boyunca korumakta en az önerilmeli rakipleri kadar başarılı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7. a) B70 tipi ve 30-VRTC-SND-PP modeli LCR tipi traverslere bu çalışma kapsamında uygulanan eğilme deneyi sonuçları, b) B70 tipi traverslere uygulanan EN 13230 negatif moment deneyi sonuçları [26], c) LCR tipi traverslere uygulanan EN 13230 negatif moment deneyi sonuçları [26]

4. Sonuç

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

Literatürde traverslerin elastisite modüllerinin ve rijitliklerinin belirlenmesi ve yorumlanması esnasında çeşitli yanılgılar mevcut olduğu tespit edilerek, çalışmada uygulanan negatif moment tayini test düzeneğinin, travers tiplerinin eğilme rijitliklerinin belirlenmesi ve karşılaştırılmasında başarıyla kullanılabileceği belirlenmiştir.

Dünya genelinde yaygın kullanılan travers tiplerinin ve yerlerine geliştirilmeye çalışılan alternatif travers modellerinin avantaj ve dezavantajları ortaya konularak, tüm bu traverslerin avantajlarını birleştirerek dezavantajlarını kısıtlayabilecek yeni travers modellerinin kütle ve eğilme modüllerinin nasıl olması gerektiği ortaya konulmuştur.

Uygulanan deney ve analizler sonucunda, ülkemizde son yıllarda geliştirilmeye alınan LCR tipi travers modellerinden biri olan 30-VRTC-SND-PP modeli traverslerin, ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan B70 tipi öngerilmeli beton traverslerin yaklaşık üçte biri seviyesinde eğilme modülüne sahip olduğu belirlenmiştir.

Yeni tip traverslerin kütlesi (≈ 280 kg) ve eğilme modülü (≈ 18 GPa) bakımından, günümüze kadar çeşitli travers tipleriyle yürütülen akademik çalışmalar doğrultusunda belirlenen en az 230 kg kütle ve 12-20 GPa aralığında eğilme modülü kriterlerini sağladığı, bu özellikleriyle ahşap

traverslerin elastisite modülü avantajları ile betonarme traverslerin yüksek kütlesi ve çevresel dayanıklılığını bir araya getirdiği görülmüştür.

Yeni tip traverslerin sahip olduğu bu optimum elastisite modülünü, servis ömrü boyunca koruyup koruyamayacağı, uygulanan EN 13230 standardında geçen yükleme-kaldırma-tekrar yükleme esaslı negatif moment tayini testleriyle incelenmiş ve eğilme rijitliğini tekrarlı yükleme adımlarında büyük oranda koruduğu ve yüksek değerli yüklere rağmen plastik deformasyonlarının en az öngörülen rakipleri kadar iyi olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; yeni LCR tipi milli travers modelinin, geçmişte yürütülen çeşitli statik ve dinamik testlerin yanı sıra, bu çalışmada incelenen eğilme modülü ve kütle özellikleri bakımından da avantaja sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yeni tip traversler, hem traverslerin hem de diğer demiryolu yapı elemanlarının servis ömürlerinin artırılmasında faydalar sağlayabilecek olup, bu durumun yorulma testleri ve saha uygulamalarıyla teyit edilmesine ihtiyaç vardır.

Kaynakça

- [1] “Elastic modulus,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Elastic_modulus [22.03.2022]
- [2] “Stiffness,” [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stiffness> [22.03.2022]
- [3] “Flexural modulus,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Flexural_modulus [22.03.2022]
- [4] “Concrete,” [Online]. Available: <https://testbook.com/question-answer/consider-the-following-statements-concerning-elast-5f1c4ac72d4b290d0e7eaeafa/amp> [22.03.2022]
- [5] “Modül,” [Online]. Available: <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/modul-modulus.html> [22.03.2022]
- [6] E. B. Türkel, “Betonda Basınç Dayanımı İle Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002
- [7] P. H. Bischoff, S. H. Perry, “Compressive behaviour of concrete at high strain rates,” *Materials and Structures*, vol. 24(6), pp. 425-450, 1991, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02472016>
- [8] F. Çeçen, B. Aktaş, “Dinamik Demiryolu Kuvvetlerinin Darbe Simülasyonlarıyla İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı: 16, Sayfa: 23-35. Temmuz 2022, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1096371>
- [9] Z. Öztürk, V. Arlı, *Demiryolu Mühendisliği*, İstanbul, ISBN 978-605-60958, 2009
- [10] E. Balcı, E. Yalçın, T. U. Yelce, N. Ö. Bezzin, “Bir Demiryolu Hattının Birim Esneme Direnci Üzerinde Etkisi Olan Mekanik Ve Geometrik Niteliklerin İncelenmesi,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 9(4), pp. 1408 – 1423, 2021
- [11] “The contact patch,” [Online]. Available: <https://the-contact-patch.com/book/rail/r1412-track-behaviour> [22.03.2022]
- [12] C. Esveld, *Modern railway track*. ISBN 978-1-326-05172-3, 2014
- [13] G. Michas, “Slab track systems for high-speed railways,” Master Degree Project, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012
- [14] V. A. Profillidis, *Railway management and engineering*, Aldershot: Ashgate, 3rd Edition, 2006
- [15] A. V. Belkom. “A simplified method for calculating load distribution and rail deflections in track, incorporating the influence of sleeper stiffness,” *Advances in Structural Engineering*, Vol. 23(11), pp. 2358–2372, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/1369433220911144>
- [16] B. Lichtberger, *Track Compendium; Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*, Hamburg, Germany, ISBN 3-7771-0320-9, 1st Edition, 2005
- [17] F. Çeçen, “Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforced concrete railway sleepers,” Master Thesis, Gazi Osman Paşa University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 156 pages, Tokat, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22723.43049>
- [18] 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>
- [19] 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>
- [20] 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]
- [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>
- [28] A. Manalo, T. Aravinthan, W. Karunasena, A. Ticoalu, "A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers," *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 603–611, 2010
- [29] C. A. Bolin, S. T. Smith, "Life Cycle Assessment of Creosote-Treated Wooden Railroad Crossties in the US with Comparisons to Concrete and Plastic Composite Railroad Crossties," *Journal of Transportation Technologies*, Vol: 3, pp: 149-161, 2013
- [30] R. C. Sharma, S. Palli, S. K. Sharma, M. Roy, "Modernization of Railway Track with Composite Sleepers," *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, Vol: 9(5), pp. 321-329, 2017
- [31] M. Siahkouhi, X. Lia, V. Markine, G. Jinga, "An experimental and numerical study on the mechanical behavior of Kunststof Lankhorst Product sleepers," *Scientia Iranica*, Vol: 28(5), pp. 2568-2581, 2021
- [32] A. M. Remennikov, S. Kaewunruen, "A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction," *Struct. Control Health Monit.*, Vol. 15, pp. 207–234, 2007
- [33] T. Koh, S. Hwang, "Field evaluation and durability analysis of an eco-friendly pressurised concrete sleeper," *J. Materials in Civil Eng.*, vol. 27(7), 2015
- [34] K. L. Auler, *Hicaz Demiryolu İnşa Edilirken*, İş Bankası Kültür Yay., ISBN 9786052951255, 2017
- [35] V. Lojda, A. Belkom, "Fire safety of polymer sleepers in terms of fire propagation," *19th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference*, SGEM 2019, pp. 247-256, doi: 10.5593/sgem2019/1.2/S02.032
- [36] R. Lampo, T. Nosker, H. Sullivan, "Development, Testing and Applications of Recycled Plastic Composite Cross Ties," *Us Army Engineer Research and Development Center*, Champaign, 2003
- [37] T. Nosker, R. Renfree, J. Lynch, M. Lutz, B. Gillespie, R. Lampo, K. E. Van Ness, "A performance-based approach to the development of a recycled plastic/composite crosstie," *Proceedings of the Technical Papers of The Annual Technical Conference- Society of Plastics Engineers Incorporated; Society of Plastics Engineers Inc.: Brookfield, CT, USA*, pp. 2912–2915, 1998
- [38] S. Ju, J. Yoon, D. Sung, S. Pyo, "Mechanical Properties of Coal Ash Particle- Reinforced Recycled Plastic- Based Composites for Sustainable Railway Sleepers," *Polymers*, vol. 12, pp. 2287, 2020
- [39] C. Salih, A. Manalo, W. Ferdous, R. Abousnina, P. Yu, T. Heyer, P. Schubel, "Behaviour of timber-alternative railway sleeper materials under five-point bending," *Construction and Building Materials*, Vol: 316, ID: 125882, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125882>
- [40] W. Ferdous, A. Manalo, G. Van Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. M. Remennikov, "Composite railway sleepers—Recent developments, challenges and future prospects," *Compos. Struct.*, Vol. 134, pp. 158–168, 2015
- [41] C. Salih, A. Manalo, W. Ferdous, R. Abousnina, P. Yu, T. Heyer, P. Schubel, "Novel Bending Test Method for Polymer Railway Sleeper Materials," *Polymers*, vol. 13, pp. 1359, 2021
- [42] J. Nairn, N. Stevens, "Rational design method for prestressed concrete sleepers," *CORE 2010: Rail, Rejuvenation and Renaissance Engineers*, pp. 174, Wellington, Australia, 2010

- [43] A. I. Zeitouni, D. C. Rizos, Y. Qian, “Benefits of high strength reduced modulus (HSRM) concrete railroad ties under center binding support conditions,” *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 210–223, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.124>
- [44] M. McHenry, Y. Gao, J.P. Billargeon, “Implementing Improved Composite Tie Design and Testing Guidelines” *Proceedings of the American Railway Engineering and Maintenance- of- Way Association Annual Conference*, Chicago, IL, USA, pp. 206–227, 2018
- [45] S. Kaewunruen, C. Ngamkhanong, P. Sengsri, M. Ishida, “On Hogging Bending Test Specifications of Railway Composite Sleepers and Bearers,” *Front. Built Environ*, vol. 6, ID:592014, 2020
- [46] E. Berggren, “*Railway track stiffness. Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance.*” Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009
- [47] W. Ferdous, “Static Flexural Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Composite Beam: An alternative railway sleeper,” Master thesis, School of Engineering and Information Technology, University of New South Wales, Canberra, Australia, 2012
- [48] R. D. Mindlin, “Influence of rotatory inertia and shear in flexural motions of isotropic elastic plates,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 31–38, 1951
- [49] “Three point flexural test,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Three-point_flexural_test [22.03.2022]

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.