



## Dinamik Demiryolu Kuvvetlerinin Darbe Simülasyonlarıyla İncelenmesi

Ferhat ÇEÇEN\*<sup>1</sup>, Bekir AKTAŞ<sup>2</sup>, Hakan ÖZTÜRK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası Müdürlüğü, Sivas, Türkiye

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

<sup>3</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

\*ferhatcecen@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 31.03.2022, Kabul/Accepted: 09.05.2022, Yayınlama/Published: 31.07.2022)

**Öz:** Bu çalışma kapsamında, demiryollarında meydana gelen statik, yarı-statik ve dinamik kuvvetlerin karakteristik özellikleri, geniş bir literatür taraması, basitleştirilmiş örneklendirmeler ve özgün darbe simülasyonları ile incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları esnasında, B70 tipi öngerilmeli beton demiryolu traversleri kullanılmış ve farklı ara yüzeylere yüksekte serbest kütle düşüşleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede dinamik kuvvetlerin, risk kontrol hiyerarşisine uygun olarak; ilk etapta nasıl kısıtlanabileceği ve demiryolu yapı elemanları dizayn edilirken, doğru dizayn felsefesinin nasıl olması gerektiği yönünde algısal farkındalık düzeyinin artırılması hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda, elastisite modülü ve rijitliği optimum düzeyde düşük ve deformasyon kabiliyeti yeterli derecede yüksek demiryolu yapı elemanlarının hem kendisine etkileyen hem de çevreye yayılan kuvvetlerin ivme değerlerinin şiddet ve frekans bileşenlerini düşürmeyi sağladığı, deneysel olarak ortaya konulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Demiryolu yükleri, Darbe testi, Dinamik kuvvet, Frekans bazlı tasarım

### Investigation of Dynamic Railway Forces with Impact Simulations

**Abstract:** Within the scope of this study, the characteristics of static, semi-static, and dynamic forces occurring in railways were investigated. For this purpose, an extensive literature review, simplified examples, and unique impact simulations were used. During the simulations, B70 type prestressed concrete railway sleepers were used and the effect of different interfaces was demonstrated. So, in accordance with the risk control hierarchy; attention has been drawn to how the dynamic forces can be restricted in the first place. In addition, while designing railway structural elements, it is aimed to increase the level of perceptual awareness of how the right design philosophy should be. As a result of the study, it was concluded that railway structural elements with low elasticity modulus and stiffness at an optimum level and high deformation ability can reduce the magnitude and frequency components of the forces acting on themselves and spreading to the environment.

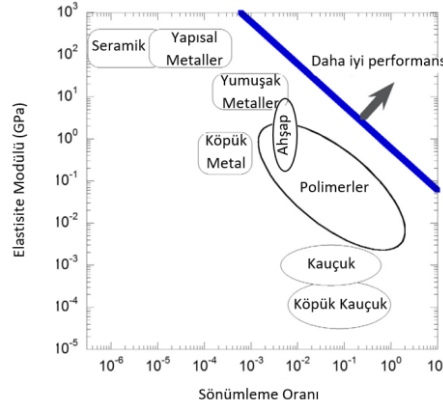
**Keywords:** Railway loads, Impact test, Dynamic force, Frequency-based design

## 1. Giriş

Demiryolu yapı elemanlarına etkileyen mekanik kuvvetler; statik ve yarı-statik kuvvetler ile dinamik kuvvetler olarak iki kategoriye ayrılabilir. İlk kategorideki statik ve yarı-statik kuvvetler, zamandan bağımsız olarak ifade edilebilmekte ve tesir ederken demiryolu yapı elemanlarının ivme değerlerinde kayda değer bir değişiklik oluşturmamaktadır. İkinci kategorideki dinamik kuvvetler etkisinde ise önemli düzeyde titreşimler meydana gelmekte ve zaman endeksli ifade edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Genel olarak gerek statik gerekse dinamik kuvvetler (force, F), Newton'un ikinci kanunu doğrultusunda, cismin kütlesi (mass, m) ve ivmesinin (acceleration, a) çarpımı ile ( $F=m.a$ ) hesaplanabilmektedir [1]. Buna göre, dinamik demiryolu kuvvetlerinde, hız ve ivme değeri arttıkça ortaya çıkan dinamik kuvvetlerin şiddeti (magnitude) de artmaktadır. Statik kuvvetlerin aksine, dinamik temas kuvvetlerinin değerini etkileyen bir diğer faktör, kuvvet uygulayan ve uygulanan nesnelere esneme özellikleridir. Genel olarak, diğer faktörler eşdeğer

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, "Dinamik demiryolu kuvvetlerinin darbe simülasyonlarıyla incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 23-35, July. 2022 doi: 10.47072/demiryolu.1096371

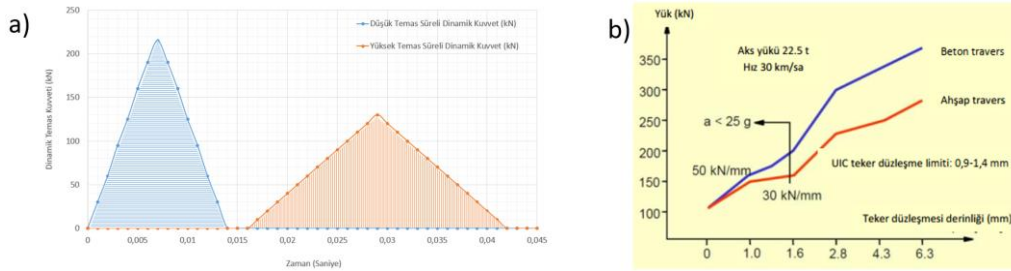
kalmak şartıyla; daha zor esneyen, elastisite modülü yüksek, rijit, yüksek yoğunluklu ve düşük boşluklu, penetrasyon ve deformasyona müsaade etmeyen nesnelere veya yüzeylere dinamik kuvvet uygulandığında, ortaya çıkan ivme değeri daha yüksek olmakta ve dolayısıyla daha yüksek kuvvetler ortaya çıkmaktadır. Bunlara örnek olarak; çelik ve benzeri yapısal metaller, bazı sert plastikler ve yüksek modüllü betonlar sayılabilir. Belirtilen bu özelliklerin aksinde karakter sergileyen ve dinamik kuvvetlerin ivme ve şiddetini düşüren yüzey ve nesnelere örnek olarak, bazı biyolojik kemik dokuları, yumuşak ve köpük metaller, bazı kompozitler, polimerler, kauçuk, ahşap malzemeler ve düşük modüllü betonlar sayılabilir. Bu geniş konu pek çok araştırmacı tarafından incelenmiş [2, 3, 4, 5] olup, konuyla ilgili örnek değerler Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Çeşitli malzemelerin elastisite modülleri ile sönümleme oranlarının ilişkisi [2]

Genel olarak daha düşük elastisite modülü veya rijitliğe sahip nesnelere, yeterli esneme kabiliyetine sahip olması şartıyla, daha fazla penetrasyon veya elastik/plastik deformasyona imkân sağlayarak, daha fazla süreli temas sağlamakta ve sonuçta daha düşük şiddette ivmeler meydana getirmektedir. Konu, detaya inilmeden fizik kuralları ile izah edilecek olursa, Şekil 2.a’da sunulan basitleştirilmiş grafik kullanılabilir. Bu grafikte, mavi ve turuncu renkli eğrilerle, iki eşdeğer (eşit impulsa sahip) kuvvetin, farklı rijitlikteki nesnelere uygulanması esnasında alınan şiddet ölçümlerinin zaman endeksli değişimleri sunulmuştur. Bu grafiklerde eğrilerin altında kalan alanlar hesaplanarak impuls (N.s) değerleri hesaplanmaktadır [6, 7]. Söz konusu impuls değerleri, kuvvet uygulayan ve uygulanan cisimlerin momentum’larındaki değişimi de göstermektedir. Eşit impuls değerine sahip bu iki kuvvetin, kuvvet-zaman eğrilerinin altında kalan alanlar da eşit olmaktadır. Ancak kuvvetlerin uygulandığı nesnelere rijitlikleri farklı olduğu için, temas süreleri değişmiştir. Bu durumda farklı temas sürelerine bağlı olarak, kuvvet şiddeti artıp azalmaktadır. Şekil 2.a’da görüldüğü üzere, yüksek temas süresi sağlayan, daha düşük rijitliğe sahip nesneye tesir eden kuvvetin zirve değeri (turuncu), düşük temas süresine neden olan rijit nesneye tesir eden kuvvetin (mavi) zirve değerinden düşük kalmaktadır. Birçok insan Şekil 1’deki gibi yüksekten düşen kütleler ile demiryolu taşıtlarının ray üzerinde hareket eden tekerleri gibi dönen aksamın ortaya çıkaracağı etkilerin birbirinden çok farklı olduğunu düşünebilir. Ancak Newton’un ikinci hareket kanununun dönel aksamlarda da uygulanabildiği, hatta dönel aksamın %10-30 arasında ilave etkiler meydana getirebileceği bilinmektedir [8]. Nitekim Şekil 2.b, 3 ve 4’te, bu teorik bilgilerin demiryollarında bizzat gerçekleştiği örnekler görülmektedir. Şekil 2.b’de, üstyapı elemanı olarak rijit (öngörülen beton) ve esnek (ahşap) traversler kullanılan iki farklı demiryolu hattından geçen eşdeğer iki trenin etkisi analiz edilmiştir [9, 10]. Öngörülen beton traversli hatların, daha rijit yapısı nedeniyle, ortaya çıkan dinamik kuvvet değerleri artmakta ve tren tekerinde meydana gelen geometrik bozulmalarla bu fark daha da açılmaktadır. Şekil 2.a’da izah edilen fizik kuralı nedeniyle, aynı hıza sahip eşdeğer iki araçtan kum yığınına çarpan (yüksek penetrasyon, uzun temas süresi, düşük ivme) önemli bir hasara uğramazken, sert bir duvara çarpan (düşük penetrasyon, kısa temas süresi, yüksek ivme) büyük hasara uğramaktadır. Yine bu yüzden Mimar Sinan, ustalık eseri olarak ifade ettiği Selimiye

Camisinin minarelerini çok yüksek dayanım ve rijitlik gösterecek şekilde değil, dinamik deprem yükleri altında esneyebilecek ve daha fazla temas süresi sağlayabilecek şekilde; düşük elastisite modüllü esnek özel bir harç ve esnek bağlantı usulleriyle inşa ettirmiş ve "yeterli derecede esneyemeyen hiçbir şey fazla süre ayakta kalmaz" demiştir [11]. Nitekim demiryollarında da geçmişte kullanılan rijit ray-travers bağlantı elemanları zamanla terk edilerek, yerini esnek bağlantı elemanlarına bırakmıştır. Yine bunun gibi yüksek rijitliğe sahip önerilmeli beton traversler, 1960'lı yıllar itibariyle en az 40-50 yıllık servis ömrü hedeflenerek dünya genelinde yaygınlaşmaya başlamıştır. Ancak söz konusu traverslerin bu servis ömrüne ulaşamadığı ve statik yükler altında sergilediği üstün performansı, dinamik yükler altında sergileyemediği birçok çalışmada dile getirilmiş ve günümüzde çok yüksek maliyetine rağmen izolasyon tedbirleri ile alternatif kullanımlar giderek artmıştır [9, 10, 12-20].

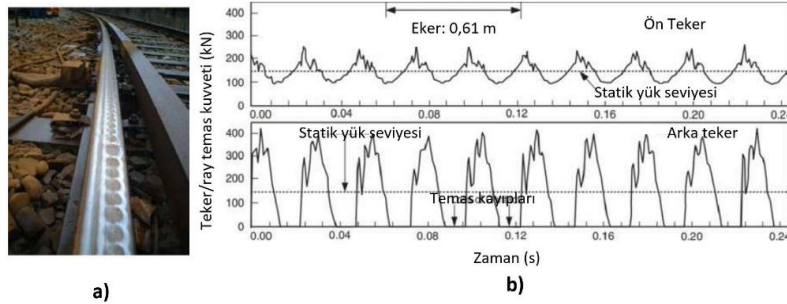


**Şekil 2. a.** Temas süresi ile maksimum kuvvet değerinin ilişkisini gösterir grafik **b.** rijit ve esnek demiryolunda meydana gelen dinamik kuvvetlerin farklılıkları [9, 10]

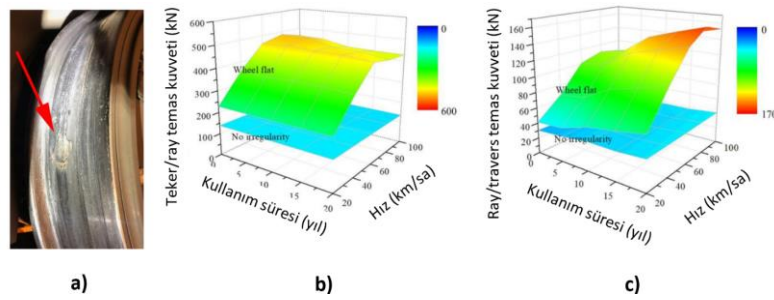
Karayolu veya demiryollarında belirtilen bu etkenler haricinde Şekil 2.b'de kısaca temas edildiği üzere bir başka etken daha büyük önem taşımakta olup, bu, tekerlerin yuvarlanma düzleminde meydana gelebilecek geometrik bozukluklardır. Ancak bu etki, demiryollarında çok daha önemlidir. Şöyle ki, karayolunda otomobilinizle ilerlerken, aracınızın küçük bir taş üzerinden geçtiğini çok zaman hissetmeyebilirsiniz. Ancak demiryollarında, karayolundaki esnek üstyapı veya hava dolgululu kauçuk tekerler yerine, ikisi de çok yüksek rijitliğe ve düşük penetrasyona sahip çelik tekerler, çelik raylar üzerinde ilerlemektedir. Bu rijitlik, balastsız hat tiplerinde ve/veya sürekli döşeme tipi beton üst yapı elemanları (slab-track vb) kullanımı halinde daha da artmaktadır. Bu yüzden demiryollarında, teker yuvarlanma düzlemini etkileyen en küçük bir bozulma dahi çok büyük ivmelere yol açmaktadır. Bu konu hakkında literatürde birçok örnek mevcut olup, iki adedi Şekil 3 ve 4'te sunulmuştur. Şekil 3.a'da raylarda meydana gelebilecek geometrik bozulmalardan birinin örneği (ondülasyon) [21] ve Şekil 3.b'de bu tarz bir demiryolunda ölçülen ray-teker temas kuvveti kaydının statik/yarı-statik kuvvetlerle karşılaştırması [22] mevcuttur. Şekil 4.a'da ise tren tekerindeki bozulma (apleti) örneği [23] ve bu etkiyle tren hızına ve hat kullanım süresine bağlı olarak dinamik kuvvetlerin artışının teker-ray (Şekil 4.b) ve ray-travers düzlemlerindeki (Şekil 4.c) analiz sonucu [24] görülmektedir.

Görüldüğü üzere, kuvvet -uygulanan- nesne veya yüzeylerin (raylar ve diğer yapı bileşenlerinin) özellikleri dinamik kuvvetleri etkilediği gibi, kuvvet -uygulayan- nesne veya yüzeyler de (tekerler ve taşıtlar) etkilemektedir. Sonuç olarak, kuvvet uygulayan veya uygulanan temas yüzeylerinin birlikte etkileşimi ile ortaya çıkan kuvvetin; etki hızı (strain rate), temas süresi (duration), ivme değeri (magnitude), frekans içeriği de değişmektedir. Bu nedenlerle örneğin modal testlerde kullanılan çekiçlerin başlıkları çeşitli rijitlik seçenekleriyle üretilmektedir. Daha rijit bir başlıkla çekiç darbesi uygulanınca, yüksek frekansları da içeren geniş bir aralıktaki frekanslar tahrik edilebilmekte, daha yumuşak bir başlıkla çekiç darbesi uygulanınca ise düşük bir ivme oluşmakla birlikte düşük frekanslar daha fazla tahrik edilebilmektedir. Sonuç olarak, dinamik kuvvetlerin, statik kuvvetlerden çok farklı olarak, çeşitli frekans içerikleri sayesinde, etkilediği cisimlerde çeşitli titreşimlere yol açma, çok sayıda yük tekrarına neden olma, çeşitli doğal frekansları tahrik edebilme ve rezonans hasarına uğratabilme kabiliyetleri bulunmaktadır [13, 16]. Demiryollarında

ise hem kuvvet uygulayan çelik teker aksamı, hem de kuvvet uygulanan çelik raylar, dinamik kuvvetlerin şiddet ve frekanslarını ve zararlı etkilerini artıran karakteristik bir özelliğe sahiptir.



Şekil 3. Ray ondülasyonu örneği [21] ve bu bozulma etkisinde dinamik kuvvetlerdeki artış [22]



Şekil 4. Tren tekerindeki apleti kusuru örneği [23] ve bu kusur nedeniyle dinamik kuvvetlerdeki artışın teker-ray düzleminde ve ray-travers düzleminde, hat kullanım süresi ve tren hızı endeksinde analizi [24]

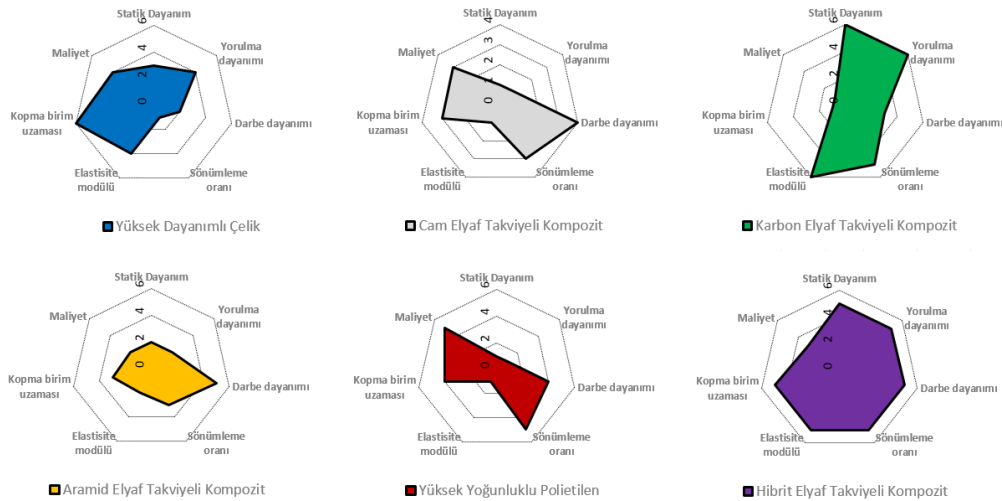
Demiryolu taşıtları -yalnızca- sabit durdukları esnada, altındaki yapı elemanlarına ve traverslere statik kuvvetler uygulamaktadır ve bu statik kuvvet değerleri, tıpkı karayollarında uygulanan istiap haddi uygulaması gibi belli değerlerle sınırlandırılmaktadır. Örnek olarak, Avrupa demiryollarında ana hatlarda izin verilen maksimum statik dingil yükü 22.5 ton.f (bazı kaynaklarda 25 ton.f) olup, bu değerler karayollarındaki ağır yüklü bir kamyonun yaklaşık 2 katıdır [25]. Söz konusu en yüksek statik tren yükü, traverslere, beton traversli ve 600 mm'lik travers aralığı (eker) mesafesi uygulanan bir hat için; teker yükünün %50'si mertebesinde etkimektedir (tek ray mesnedi için yaklaşık 55 kN) [9]. Bu değer demiryolu yapı elemanlarının ayrı ayrı ve toplu eğilme rijitliklerine ve kullanım şekline bağlı olarak kısmen artıp azalabilmektedir. Demiryollarında hat geometrisi ve yapı elemanları homojen ve ideal durumda olursa ve çelik raylar ile çelik tekerler arasında pürüzsüz bir seyir mümkün olursa, bu sürdürülmesi güç teorik demiryolu hattında, düşük hızla seyreden bir tren etkisiyle yalnızca statik ve yarı-statik (quasi-static) yükler meydana gelmektedir. Diğer bir ifadeyle bu hat'taki yapı elemanlarına bağlanan ivmeölçer sensörler, önemli bir ivme değişimi okumayacak, daha açık bir ifadeyle bu trende seyreden yolcuların bardaklarındaki kahvede hiçbir dalgalanma meydana gelmeyecektir. Bu hat'taki traverslerin ivme değerleri yer çekim ivmesine (1 G) çok yakındır ve oluşan kuvvetlerin frekans bileşenleri 0.1-0.2 Hz'i geçmemektedir. Demiryolu traverslerine laboratuvar ortamında uygulanan pozitif ve negatif moment tayini testlerinin, yükleme hızları (strain rate) oldukça düşük olduğundan ve traverslerde önemli bir ivme değişimi oluşturmadığından, statik ve yarı-statik demiryolu yüklerini temsil ettiği kabul edilmektedir. Bununla birlikte, demiryolu traversi dizaynında, nominal bağlamda en fazla 1,5-3 G'lik bir etki de oluşabileceği varsayılarak, çeşitli hat ve travers tipleri için 150 kN'a varan tek ray mesnedi yükü, travers dizayn yükü olarak ( $F_{r0}$ ) kabul edilmektedir [9, 14, 17]. Ancak belirtilen ideal demiryolunu inşa etmek, inşa edilse bile uzun süre bu halde korumak imkânsız gibidir. Gerçek dünyada demiryollarında gerek raylar gerek tekerler gerekse hat geometrisi çok zaman bu ideal mükemmelliğe sahip olmayabilmektedir. Tekerlerdeki ve raylardaki kusurlar (apleti, ondülasyon vb.), ray birleşim bölgelerindeki hatalar, hat rijitliği değişkenlikleri ve her tip geometrik ve

mekanik değişim ve bozulmalar, demiryolu kuvvetlerinin şiddet/frekanslarının artmasına ve statik/yarı-statik karakteristiklerinden çıkmasına neden olmaktadır. Bu durumun en büyük etkenlerinden biri, demiryollarına adını veren hareket tipi olan; çelik tekerlerin çelik raylar üzerinde ilerlemesidir. Çok yüksek rijitliğe ve düşük penetrasyon ve sönümlemeye sahip iki yüzey, çelik raylar ve çelik tekerler arasındaki dinamik etkileşim, çok minik bir ara yüz kusuru veya geometrik bozukluk olsa dahi dinamik yüklerin ivme ve frekanslarının katlarca artmasına neden olmaktadır. Nitekim günümüze kadar yapılan ve birkaç örneği Şekil 2, 3, ve 4'te sunulan sayısız saha ölçümlerinden de görüleceği üzere, demiryollarında geçmişte kabul edilenden çok daha yüksek şiddet ve frekansa sahip ivmeler meydana gelmekte, raylar üzerinden alınan ivme değerleri 50 G'nin dahi üzerine çıkabilmekte, frekans bileşenleri ise binlerce Hz'e varabilmektedir.

Günümüze kadar yapılmış ve halen devam eden saha ölçüm sonuçlarından elde edilen bu denli yüksek dinamik yüklerin, demiryolu elemanlarında kısa sürede ağır hasar vermemesinin nedenlerinden biri, demiryollarında etkiyen dinamik kuvvetlerin zirveye çıktığı (high strain rate) ve zirvede kaldığı (short duration) sürelerin, Şekil 3.b'den görüldüğü üzere, birkaç milisaniyeyi geçmemesidir. Örnek vermek gerekirse, bu durumum bir benzeri metal kaynağı yapan işçilerde görülmektedir. Kaynak işlemi esnasında meydana gelen zirve gürültü değeri (dB(A)<sub>peak</sub>) bir uçağın jet motorunun gürültü seviyesine yakındır. Ancak kaynak işlemi esnasında görülen bu zirve gürültü değerleri, çok kısa zamanda, birkaç milisaniye içerisinde meydana gelip kalkmaktadır. Ancak bu çok kısa süreli etkiler, beyin tarafından çok zaman yüksek gürültü olarak algılanmadığından, ilgili çalışanın kulak koruyucu kullanmaması halinde, kulak zarlarında zamanla ilerleyen önemli tahribatlara rastlanabilmektedir. Sonuç olarak, çelik raylar ve yüksek eğilme rijitliğine sahip traverslerden inşa edilmiş demiryollarında meydana gelen yüksek şiddet ve frekanslar, uzun zaman diliminde, nedeni çok defa anlaşılamayan, aşırı titreşimlere, geometrik bozulmalara, yorulma ve rezonans hasarlarına ve faydalı servis ömrünün erken vadede tükenmesine neden olmaktadır [13, 16]. Öyle ki; demiryolu bakım elemanlarınca bu durum olağan ve kaçınılmaz bir döngü olarak kanıksanabilmektedir. Dinamik kuvvetler, özellikle tren işletim sıklığı ve hızlarının artması ile günümüzde, geçmişten çok daha önemli hale gelmiştir [15, 18, 20]. Bununla birlikte dinamik kuvvetlerin üzerinde yeterince durulmamış, buna uygun testler ve dizayn yöntemleri yaygınlaşmamıştır. Mevcut traverslerin dizayn ve kabul aşamalarında kullanılan dinamik ve yorulma testlerinde yükleme-kaldırma-tekerrür yükleme esaslı hızlı yük çevrimleri (cyclic loading) uygulanmaktadır [9]. Ancak bu esnada uygulanan çevrim hızı 3-5 Hz dolaylarındadır. Bu deneylerle, yine nerdeyse kusursuz bir ray-teker etkileşimine sahip ve çok düşük hızlı ( $\approx 10$  km/sa) bir trenin etkisi simüle edilmektedir. Bu testler için dinamik test ibaresinin kullanılması doğrudur, çünkü traverslere etkiyen kuvvetler test müddetince artıp azalarak değişmektedir ve ivme değişimi de mevcuttur. Ancak ivme, frekans, şiddet ve çevrim sayısı bakımından oldukça düşük kalması gibi nedenlerle demiryolunu yeterli derece simüle etmediği ve yeterli dinamik etkiye sahip olmadığı yönünde eleştiriler oldukça fazladır [12].

Buraya kadar sunulan bilgiler ışığında, demiryolu yapı elemanlarının düşük eğilme rijitliğine ve yüksek esnekliğe sahip bir şekilde dizayn edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, demiryolu yapı elemanlarının gerekli -optimum- rijitlik ve uzama katsayısına (% elongation) sahip olmasıdır. Bu optimum değerlerden daha fazla veya daha düşük bir uygulama, bir açıdan avantaj sağlayabilecekken, başka açılardan büyük dezavantajlara neden olabilecektir. Yeterli çekme, basınç ve kesme dayanımı ile yeterli kopma uzaması yüzdesi elde edilmeksizin, tek başına düşük eğilme rijitliği veya tek başına yüksek uzama katsayısı elde edilmesinin, tüm faktörler göz önünde bulundurulduğunda, en iyi performansı sağlamayacağı aşikârdır. Bu konuda basit bir örnek olarak, saf cam malzemelerin ortalama 70 GPa elastisite modülü vardır. Bu değer, örneğin kurşun-geçirmez yelek imalatında yaygın olarak kullanılan aramid fiberli kompozitlerin elastisite modülüyle benzerdir. Ancak saf camın nihai birim deformasyonu çok düşük olduğundan ( $\approx 0,1$ ), en ufak bir darbeye dahi kırılabilir, oldukça gevrek malzemelerdir. Bu basit örnekteki gibi, yüksek uzama katsayısına sahip fakat ihtiyaç

duyulandan daha düşük eğilme rijitliğine sahip ve/veya çok hafif malzemelerin demiryolunda kullanımı uygun olmayabilecektir. Çünkü demiryolu traverslerinin en önemli görevi, iki ray arasındaki yatay ve dikey milimetrik mesafeleri (ekartman) korumaktır. Bu görevini yerine getirmesi için yeterli kütleye 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 neden olabilmektedir [15]. Gereğinden fazla düşük eğilme rijitliğine veya yetersiz kütleye sahip (örneğin bazı plastik/kompozit tipi) traversler, hat esneme direncinin gereğinden fazla düşük olmasına, yolun kaymasına veya havalanmasına, raydaki eğilmelerinin ve hat deformasyonunun artmasına neden olabilmektedir. Bunun zıddı olarak, optimum düzeyden daha yüksek eğilme rijitliğine sahip sürekli döşeme tipi (slab-track vb.) uygulamalarda ise, ray bağlantı elemanlarında, ray yüzeylerinde ve balast parçacıklarında erken dönemde hasarlar ve kırılmalara dikkat edilmelidir [26]. Özet olarak, her projede ihtiyaç duyulan parametreler ve önem sıralamaları değişkenlik göstermektedir. Birçok projede dinamik darbe veya titreşimlere dayanıklılık göstermenin yanı sıra, başka mühendislik özelliklerinin de sağlanması gerekmektedir. Örneğin korozyon ve benzeri çevresel etkenlere dayanıklılık (traversler [12], iskele yapıları vb.), düşük birim hacim ağırlık (güçlendirme, havacılık vb.) veya yeterli ağırlığa sahip olma (traversler [9] vb.), termal etkilere dayanıklılık (uzay, savunma, havacılık vb.), tekrarlı yükler etkisinde düşük plastik deformasyon ve yüksek yorulma direnci gösterme (traversler [17], rüzgâr panelleri, uzay, havacılık vb.) gibi birçok parametre de söz konusu olabilmektedir. Bu konuda örnek bir analiz Şekil 5'te sunulmuştur. Bu analizde 7 parametre dikkate alınarak, 6 malzeme alternatifi değerlendirmeye sokulmuştur. Görüldüğü üzere, her durum için mükemmel özelliklere sahip bir malzeme söz konusu olmayabileceğinden ve/veya bu malzemenin kullanımı ekonomik olmayabileceğinden, dizayn ve karar mercilerinin, Şekil 5'te örneği sunulduğu gibi, elindeki materyalleri karşılaştırarak, risk hiyerarşisine uygun bir şekilde ve karşılaşılabilecek sorunları ilk önce kaynağında çözmeye çalışarak [9, 13, 16], istenilen parametreleri optimum düzeyde sağlayacak malzemeyi veya hibrit uygulamayı kullanması gerekecektir.



Şekil 5. Çeşitli malzemelerin proje ihtiyaçlarını karşılama oranlarının radar analizleriyle karşılaştırılması

## 2. Metot

Giriş bölümünde aktarıldığı üzere demiryollarında yüksek değerli dinamik kuvvetler kaçınılmaz olarak meydana gelmektedir ve demiryolu traverslerinin dinamik kuvvetlere dayanımı, en az statik dayanımları kadar önemlidir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında Şekil 6'da fotoğrafı verilen cihazla, demiryolu darbe yüklerini temsil edecek darbe simülasyonları yürütülmüştür. Deney süresince mesnet aralığı, EN 13230 travers deneylerinde uygulandığı üzere 60 cm olarak

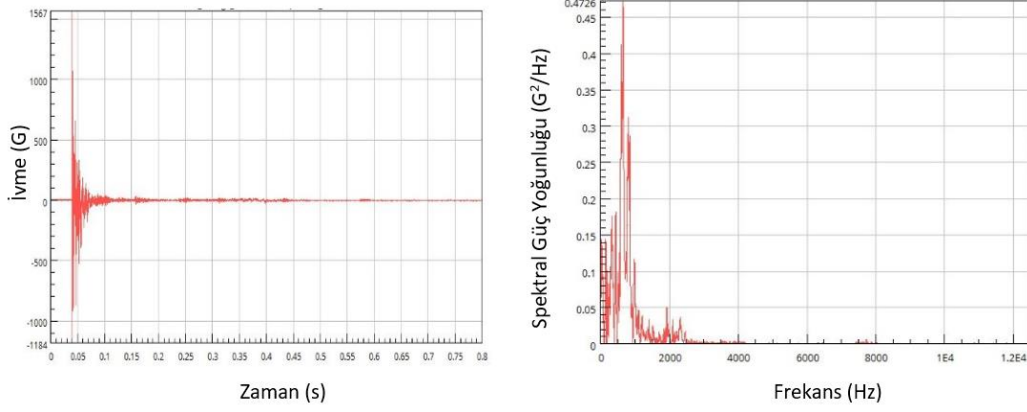
ayarlanmıştır. Demiryollarındaki yüksek hızlı (7500 mm/sn) darbe etkisini meydana getirmek için sabit 3,00 metre yükseklikten serbest kütle düşüşleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler esnasında veri örnekleme hızı 100 kHz'e ayarlı NI cDaq veri toplama sistemi kullanılmıştır. Yaklaşık 23 kg ağırlığa sahip kütlelerin 3 metre yükseklikten travers üzerine düşüşü esnasında, düşüş yapan kütle üzerine monte edilen piezorezistif ivmeölçer yardımıyla alınan ivme kaydı, nCode® analizleriyle, giriş kısmında belirtildiği şekliyle, Newton'un ikinci hareket kanunu doğrultusunda hesaplamaya tabi tutulmuştur. Düşen kütle etkisiyle üstte meydana gelen dinamik temas kuvvetleri bu şekilde hesaplanırken, enerji kayıpları ve deformasyonlar ardından travers tabanından ölçülen çevreye yayılan kuvvet etkisi, mesnetlere yerleştirilen 2 adet yük hücresi (loadcell) vasıtasıyla ölçülmüştür. Ayrıca travers üzerine yerleştirilen piezoelektrik ivmeölçer ile traversteki ivme değerleri de analiz edilmiştir. Çalışma süresince farklı şiddet, etki hızı, etki süresi ve frekans bileşenlerini elde etmek adına, eş yükseklikten bırakılan kütleler, farklı penetrasyon, esneklik ve eğilme rijitliğine sahip ara yüzeylere düştükçe, kuvvet uygulayan ve uygulanan elemanlar üzerindeki ivmeölçer sensörleriyle dalar toplanıp, ara yüzey etkisi ortaya konulmuştur. Bu kapsamda öngörülmesi ve öngörülmesi beton traverslere çıplak vaziyette iken ve plastik ve/veya metal ara yüzeyler konarak, ölçülen dinamik kuvvetlerin; hız (velocity), ivme (acceleration), temas kuvveti şiddeti (contact force magnitude) ve frekans içerikleri analiz edilmiştir.



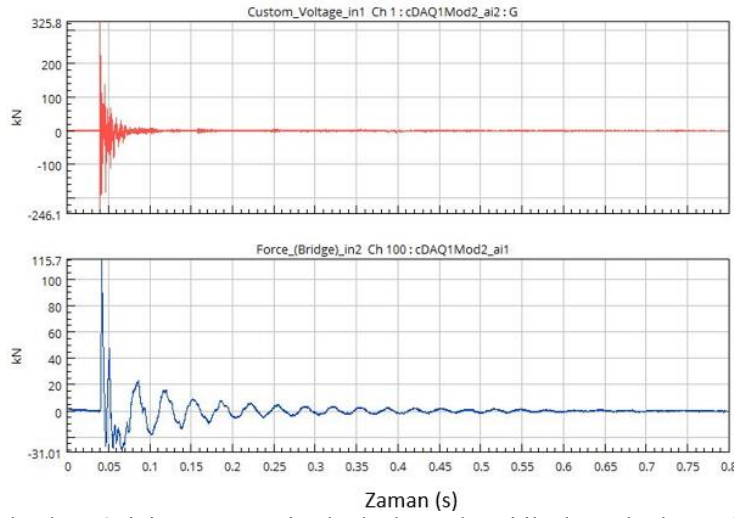
Şekil 6. Simülasyonlarda kullanılan çarpma çerçevesi, travers numunesi, ara yüzeyler ve sensörler

### 3. Bulgular

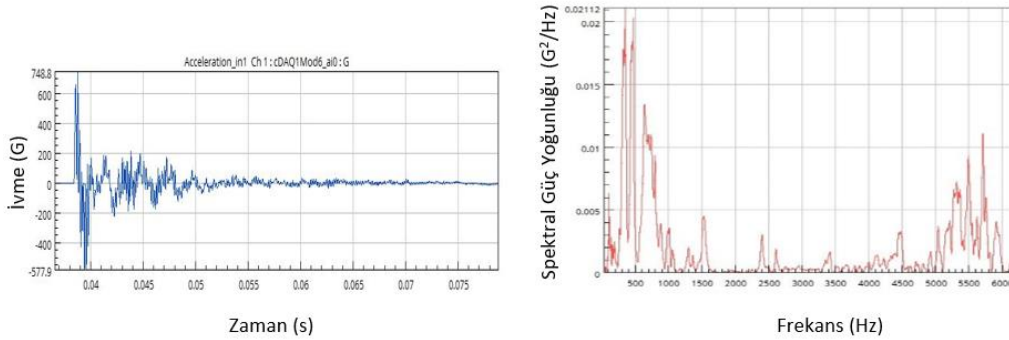
Simülasyonlar esnasında, direkt olarak B70 tipi beton travers üzerine kütle düşürülmesiyle elde edilen ivme kaydı (G) ve bu ivme kaydının frekans dağılımı PSD-RMS (karekök ortalaması cinsinden spektral güç yoğunluğu) cinsinden analiz edilerek Şekil 7'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere rijit karaktere sahip, yüksek dayanımlı (C50/60 basınç dayanımı sınıfında ve yaklaşık 36 GPa elastisite modülüne sahip) beton kullanılarak üretilen bu öngörülmesi beton traveste, 1567 G ivme meydana gelmiş, ivme kaydının frekans dağılımı ise 2400 Hz'lere kadar etkisini sürdürmüştür. Söz konusu ivme kaydının analizi ile elde edilen dinamik temas kuvveti ile mesnet reaksiyonları Şekil 8'de sunulmuş olup, en yüksek değerleri yaklaşık 325 kN olan temas kuvveti ve 115 kN mesnet reaksiyonu söz konusudur. Bu dinamik kuvvet etkisiyle travers üzerinden alınan ivme kaydı ve PSD-RMS cinsinden frekans analizi Şekil 9'da sunulmaktadır. Söz konusu ivme kaydı incelendiğinde, en yüksek ivme değerinin yaklaşık 750 G olduğu, 6000 Hz'lere kadar etkisini sürdürdüğü ve en yüksek RMS değerinin yaklaşık 0,021 G<sup>2</sup>/Hz olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Direkt olarak B70 tipi travers üzerine kütle düşürülmesi sonucunda elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G<sup>2</sup>/Hz, Hz)



Şekil 8. Direkt olarak B70 tipi travers üzerine kütle düşürülmesi ile düşen kütle üzerinden elde edilen temas kuvveti (kN, saniye) ve mesnet reaksiyon kuvveti (kN, saniye) grafikleri

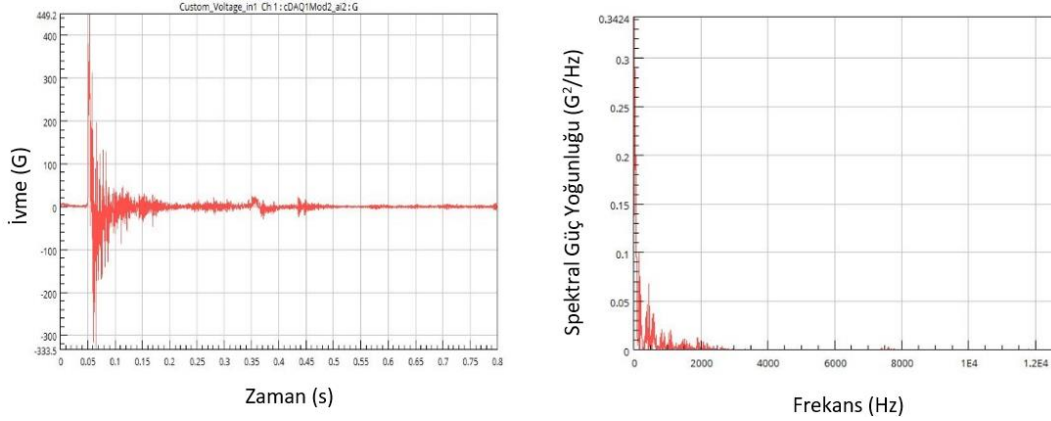


Şekil 9. Direkt olarak B70 tipi travers üzerine kütle düşürülmesi ile travers üzerindeki ivmeölçerden elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G<sup>2</sup>/Hz, Hz)

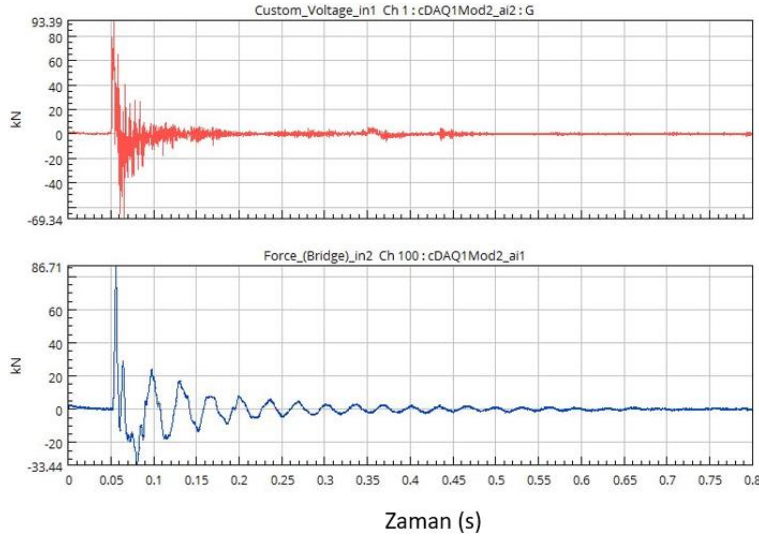
Travers üzerine, demiryolunda kullanılan Şekil 6'da görülen polyamid-6 elastik selet (elastisite modülü 2 GPa) konulması ardından, aynı kütle, eş yükseklikten serbest bırakılmıştır. Elde edilen ivme kaydı (G) ve bu ivme kaydının frekans dağılımı PSD-RMS cinsinden analiz edilerek Şekil 10'da sunulmuştur. Görüldüğü üzere rijit karaktere sahip öngerilmeli beton traversin üzerine düşük modüllü ve yüksek penetrasyon/deformasyon kabiliyetli bir malzeme konulunca, yalnızca 450 G ivme meydana gelmiş, bu durum ivme kaydının frekans dağılımını çok değiştirmezken şiddetini düşürmüştür. Hesaplanan temas kuvveti ile mesnet reaksiyonları Şekil 11'de sunulmuş



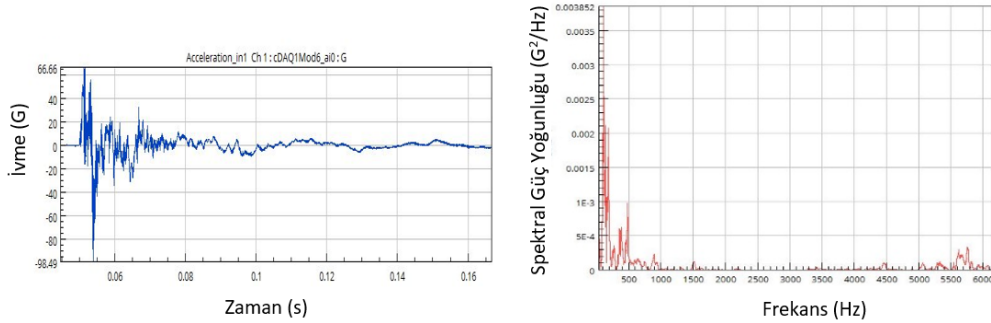
olup, en yüksek değerleri sırasıyla yaklaşık 95 kN ve 85 kN'dur. Bu dinamik kuvvet etkisiyle travers üzerinden alınan ivme kaydı ve PSD-RMS cinsinden frekans analizi Şekil 12'de sunulmaktadır. Söz konusu ivme kaydı incelendiğinde en yüksek ivme değerinin yaklaşık 100 G olduğu, 1000 Hz'lerden sonra etkisini kaybettiği ve en yüksek RMS değerinin 0,004 G<sup>2</sup>/Hz ile oldukça düşük olduğu görülmektedir. Görüldüğü üzere elastik selet etkisiyle, hem traverse etkileyen, hem de çevreye yayılan dinamik kuvvetlerin şiddet ve frekans dağılımı düşmüştür.



Şekil 10. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet konularak kütle düşürülmesi ile elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G<sup>2</sup>/Hz, Hz)

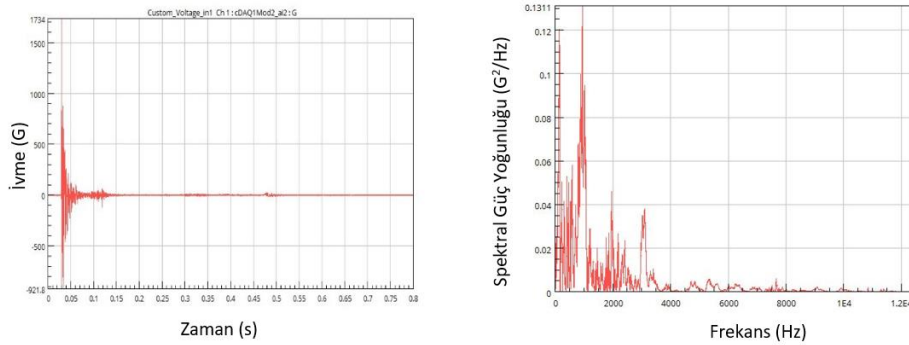


Şekil 11. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet konularak kütle düşürülmesi ile düşen kütle üzerinden elde edilen temas kuvveti (kN, saniye) ve mesnet reaksiyon kuvveti (kN, saniye) grafikleri

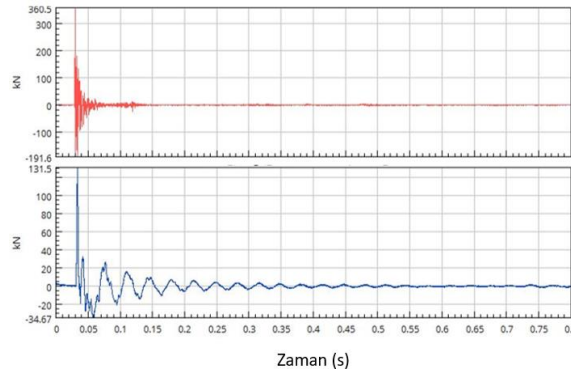


Şekil 12. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet konularak kütle düşürülmesi ile travers üzerindeki ivmeölçerden elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G<sup>2</sup>/Hz, Hz)

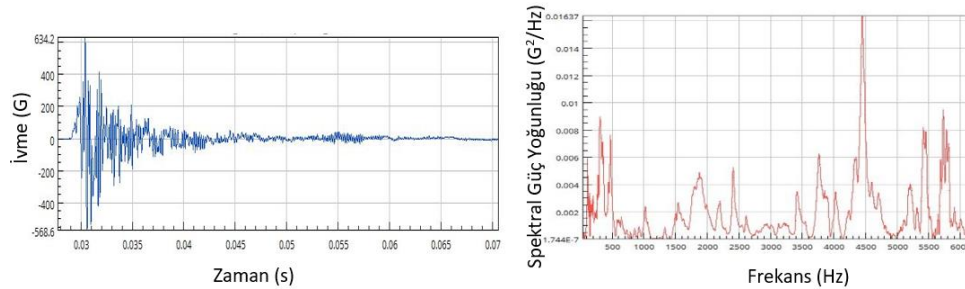
B70 tipi travers üzerine, Şekil 6'da görüldüğü şekilde, 1 adet elastik selet ve ray rijitliğini temsil edecek 1 adet EN 13230-2 standardında geçen 1/40 eğimli çelik ara plaka (elastisite modülü yaklaşık 200 GPa) konulması ardından, aynı kütle, eş yükseklikten serbest bırakılmıştır. Bu şekilde elde edilen ivme kaydı (G) ve frekans dağılımı PSD-RMS cinsinden analiz edilerek Şekil 13'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere travers üzerinde elastik selet bulunmasına rağmen yüksek modüllü ve düşük penetrasyon kabiliyetli çelik son-ara-yüzey etkisiyle, 1734 G'lik ivme meydana gelmiş, frekans dağılımı ise 8000 Hz'lere kadar etkisini sürdürmüştür. Söz konusu ivme kaydının analizi ile elde edilen dinamik temas kuvveti ve mesnet reaksiyonları Şekil 14'te sunulmuş olup, sırasıyla yaklaşık 360 kN ve 132 kN'dur. Bu dinamik kuvvet etkisiyle travers üzerinden alınan ivme kaydı ve PSD-RMS cinsinden frekans analizi Şekil 15'te sunulmaktadır. Söz konusu ivme kaydı incelendiğinde en yüksek ivme değerinin yaklaşık 635 G olduğu, 6000 Hz'lere kadar etkisini devam ettirdiği ve en yüksek RMS değerinin yaklaşık 0,016 G<sup>2</sup>/Hz olduğu görülmektedir. Tüm bu simülasyonlar esnasında traverslerde gözle görülebilir bir hasar meydana gelmemiştir.



Şekil 13. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet ve üzerine çelik plaka konularak kütle düşürülmesi ile elde edilen ivme kaydı (G, saniye) ve frekans dağılımı (G<sup>2</sup>/Hz, Hz)



Şekil 14. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet ve üzerine çelik plaka konularak kütle düşürülmesi ile düşen kütle üzerinden elde edilen temas kuvveti (kN, saniye) ve mesnet reaksiyon kuvveti (kN, saniye)



Şekil 15. B70 tipi travers üzerine 1 adet elastik selet ve üzerine çelik plaka konularak kütle düşürülmesi ile travers üzerindeki ivmeölçerden elde edilen ivme kaydı ve frekans dağılımı (PSD RMS)

Elde edilen tüm datalar toplu halde Tablo 1'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Dinamik demiryolu kuvveti simülasyonları sonucunda elde edilen örnek veriler

Travers tipi	Son ara yüzey tipi ve elastisite modülü	Hesaplanan Temas Kuvveti (kN)	Mesnet Reaksiyon Kuvveti (kN)	İvme (Düşen Kütle) (G)	Etkin Frekans (Düşen Kütle) (Hz)	İvme (Travers) (G)	Frekans Amplitude Değeri (RMS-PSD) (G <sup>2</sup> /Hz)	Etkin Frekans (Travers) (Hz)
B70 tipi travers	Beton (36 GPa)	325	115	1567	0-2400	750	0,021	0-6000
B70 tipi travers	Elastik selet (2 GPa)	95	85	450	0-2400	100	0,004	0-1000
B70 tipi travers	Çelik plaka (200 GPa)	360	132	1734	0-8000	635	0,016	0-6000

#### 4. Sonuç

Çalışma kapsamında yürütülen simülasyon çalışmaları neticesinde, dinamik kuvvet uygulayan veya uygulanan malzemelerin dinamik özelliklerine bağlı olarak, ortaya çıkan dinamik kuvvet ve ivme değerleri ile ve frekans dağılım ve şiddetinin, ayrıca kuvvet etki hızı ve temas süresinin oldukça değiştiği görülmüştür. Buna göre, 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, ortaya çıkan ivme değerlerinin daha yüksek olduğu ve dolayısıyla daha yüksek kuvvetler ortaya çıktığı görülmüştür. Nitekim uygulanan simülasyon çalışmalarında en şiddetli dinamik kuvvetler, öncelikle çelik ara yüzeylerde (1734 G, 360 kN), daha sonra ise yüksek dayanımlı betonlarda (1567 G, 325 kN) ölçülmüş, belirtilen bu özelliklerin aksinde karakter sergileyen elastik selet ara yüzünün ise dinamik kuvvetlerin değerini %70'in üzerinde düşürdüğü (450 G, 95 kN) görülmüştür. Bu durum söz konusu dinamik kuvvetlerin frekans dağılımı ve şiddeti için ve ayrıca çevreye yayılan dinamik kuvvetlerin değerleri için de benzerdir. Buna ilaveten, demiryollarına adını da veren çelik teker ve çelik rayların etkileşimi ile ortaya çıkan dinamik kuvvetlerin, diğer mühendislik sahalarından görülen dinamik kuvvetlerden farklılığı daha iyi anlaşılmıştır. Dolayısıyla, demiryolu yapı elemanlarının servis ömürleri boyunca üzerine etkiyen yüklerin tamamına yakınının da dinamik kuvvetler olması nedeniyle, bu kuvvetleri karşılayacak optimum yapı elemanları (örneğin demiryolu traversleri) dizayn edilirken, hemen izolasyon tedbirlerine başvurulması yerine, risk kontrol hiyerarşisine uygun dinamik dizayn yöntemleri kullanılarak; optimum elastisite modülü ve rijitlik ile yeterli esneklik ve yüksek sönümleme oranına sahip demiryolu yapı elemanları (örneğin optimum eğilme rijitliğine sahip traverslerin) dizaynının, tüm demiryolu yapı elemanlarının servis ömürlerini optimum şekilde artıracığı kanaatine varılmıştır. Ayrıca demiryollarındaki gerçek dinamik kuvvetleri temsil edebilecek dinamik test yöntemlerinin önemi ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, çalışmada kullanılan simülasyon yönteminin; demiryolu yapı elemanlarının dizayn ve kabulü aşamasında kullanılabilecek, demiryolu yüklerini simülasyona elverişli ve hızlı bir test metodu olduğu görülmüştür.

#### Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK Ardeb Dairesi Başkanlığı'nın 120M403/2020 sayılı projesi kapsamında desteklenmiştir. Çalışmadaki katkılarından dolayı Sakarya Üniversitesi Araştırma Görevlileri M. Burhan NAVDAR ve İrfan Ş. ÖZTÜRK'e teşekkürlerimizi bildiririz.

## Kaynakça

- [1] “Design Factors for Dynamic Loads,” [Online]. Available: <https://schaefer-inc.com/design-factors-dynamic-loads/> [09.03.2022]
- [2] L. Dong, R. Lakes, “Advanced damper with high stiffness and high hysteresis damping based on negative structural stiffness,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 50, pp. 2416–2423, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.03.018>
- [3] W. Woigk, K. Masania, F. Stork, A. Heusi, E. Poloni, A. R. Studart, Bio-Inspired Platelet-Reinforced Polymers with Enhanced Stiffness and Damping Behavior, *ACS Applied Polymer Materials*, vol. 2, pp. 3557-3565, 2020, doi: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsapm.0c00568>
- [4] “Viscoelastic Materials - Internal friction in solids – Viscoelasticity - Anelastic solids,” [Online]. Available: <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/VE.html> [09.03.2022]
- [5] “Impact Force from Falling Object,” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/flobi.html> [09.03.2022]
- [6] “Impulse - Force time graphs,” [Online]. Available: <https://sites.google.com/a/perthgrammar.co.uk/physics/courses/higher/our-dynamic-universe/13-collisions-explosions-and-impulse/135-force-time-graphs> [09.03.2022]
- [7] “What is Linear Momentum,” [Online]. Available: <https://pediaa.com/what-is-linear-momentum/> [09.03.2022]
- [8] M. K. Jain, “Train, grade, curve and Acceleration Resistance,” 2013. [Online]. Available: <https://www.railelectrica.com/traction-mechanics/train-grade-curve-and-acceleration-resistance-2/> [09.03.2022]
- [9] 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>
- [10] C. Esveld, *Modern railway track*. ISBN 978-1-326-05172-3, 2014
- [11] “Gizemli tarih: Mimar Sinan,” [Online]. Available: <https://www.trtizle.com/belgesel/gizemli-tarih/gizemli-tarih-mimar-sinan-4805412> [09.03.2022]
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] B. Aktaş, F. Çeçen, H. Öztürk, İ. M. B. Navdar, 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>
- [17] 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>
- [18] 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>
- [19] F. Çeçen, B. Aktaş, H. Öztürk, İ. M. B. Navdar, 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>
- [20] 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>
- [21] Z. Cai, “Modelling of rail track dynamics and wheel/rail interaction,” Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Queen’s University, Ontario, Canada, 1992.

- [22] H. Tsunashima, A. Matsumoto, T. Mizuma, H. Mori, Y. Naganuma, "Condition Monitoring of Railway Track Using In-Service Vehicle," *J. Mech. Syst. Transport. Logist.*, vol. 3 (1), 2012, doi: <https://doi.org/10.1299/jmtl.3.154>
- [23] "Trains get flat tires too," [Online]. Available: <https://www.valleymetro.org/blog/operations-service/2019/12/trains-get-flat-tires-too> [09.03.2022]
- [24] C. Ngamkhanong, K. Goto and S. Kaewunruen, "Dynamic responses of railway ballasted track considering rail pad deterioration," *Modern Practice in Stress and Vibration Analysis (MPSVA). IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, vol. 1106 (2018), no. 012006, 2018, doi :10.1088/1742-6596/1106/1/012006
- [25] E. Early, "Part II: That's a load ... off my mind," 2018. [Online]. Available: <https://www.conteches.com/pipe-article/article/147/part-ii-thats-a-load-off-my-mind> [09.03.2022]
- [26] E. Berggren, "Railway track stiffness. Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance," Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009.

### 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



#### **Hakan ÖZTÜRK**

Doktora Eğitimini Sakarya Üniversitesinde tamamlayan yazar, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Yapı alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan makaleleri bulunmaktadır.

E-Posta: hakanozturk@sakarya.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. Hakan ÖZTÜRK: Görselleştirme, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.