

BALASTLI HATTA RAY-TEKERLEK TİTREŞİMLERİNİN DEMİRYOLU DİNAMIĞINA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF THE EFFECT OF RAIL/WHEEL VIBRATIONS ON RAILWAY DYNAMIC ON BALLASTED LINE

Veysel ARLI¹, Zübeyde ÖZTÜRK^{2*}

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34496, İstanbul.

arli@istanbul-ulasim.com.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, İstanbul.

ozturkzu@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 07.05.2013, Kabul Tarihi/Accepted: 23.07.2013

doi: 10.5505/pajes.2014.39306

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Özet

Demiryolu tasarımında kullanılan klasik yöntem statik analiz yapmak ve dinamik etkileri hesaba katmak için dinamik etki katsayısı oranında sonuçları büyütür. Ancak bu yöntemin özellikle yüksek hızlı demiryolu hatları için uygun olmadığı ve dinamik analiz yapılması gerektiği bilinmektedir. Çünkü klasik yöntemde demiryolunun doğal frekansları ile trenin tahrik frekanslarının çakışması ile ortaya çıkan rezonansı ve çok yüksek olan dinamik yükleri hesaplamak mümkün değildir. Bu nedenle, çalışmada örnek bir balastlı hat üstyapısı için ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak nümerik analiz yapılmış ve rezonans durumundaki dinamik etkiler belirlenmiştir. Ayrıca sahada ölçüm yapılarak yolun öz frekansları ile dinamik tepkileri ölçülmüş ve bu değerlere göre model doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Dinamik etki, Demiryolu titreşimi, Nümerik analiz, Çekiç darbe testi.

Abstract

The classical method used in railway design is to increase the results in the ratio of dynamic effect coefficient in order to make static analysis and consider dynamic effects. However, it is known that this method is not available for high speed railway lines and that it is necessary to make dynamic analysis; as it is impossible, in classical method, to calculate the very high dynamic loads and the resonance which occurs when the natural frequencies of railway coincide with the driving frequencies of train. Therefore, numerical analysis was made using ANSYS finite element program and the dynamic effects in resonance situation were determined for a sample ballasted line superstructure. Besides, the natural frequencies and dynamic effects of the road were measured on the field, and the sample was validated in accordance with these values.

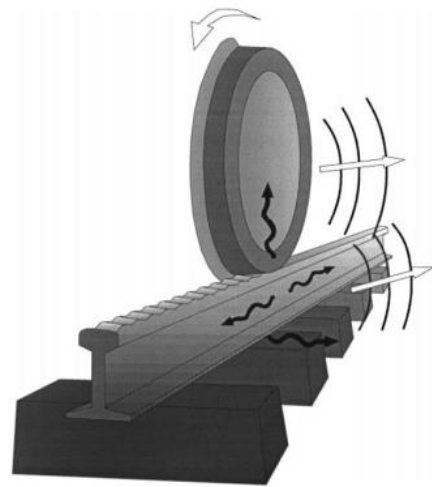
Keywords: Dynamic effect, Railway vibration, Numerical analysis, Hammer impact test.

1 Giriş

Potansiyel ve kinetik enerji içeren tüm sistemler dinamik yüklerle tahrik edilmesi halinde titreşim hareketi yaparlar. Titreşim, bir sistemin denge konumu etrafında yapmış olduğu hareket olup, her üç ekseninde hem taşıta hem de üstyapıya iletilir (Şekil 1). Bu konuda önemli olan nokta, sistemin doğal frekanslarını ve sistemin titreşime olan tepkisini belirlemektir. Çünkü titreşim kaynağının tahrik frekansı ile sistemin doğal frekansları arasında bir fark olmalıdır. Eğer tahrik frekansı ile sistemin doğal frekanslarından biri eşit olursa rezonans meydana gelir. Bu durumda taşıt stabilitesi, yolcu konforu, taşıt ve yol birleşenlerinde olumsuzluklar, bozulmalar ve hasarlar oluşmaktadır. Örneğin, İsveç Devlet Demiryolları Göteborg-Malmö arasında 1997 yılında açılan Batı Sahili yüksek hızlı hattının 200 km/saat hız uygulanan bazı kesimlerinde aşırı titreşim nedeniyle dolgu deformasyonu, ray yorulması, taşıt enerji beslemesinin kesilmesi gibi sorunlar ortaya çıkmış ve bu kesimlerde hız sınırlandırılmasına gidilmiştir. Daha sonra 1997-1998 yıllarında dinamik ölçümler yapılmış ve zemin iyileştirmesi yapılarak yeniden işletme hızı artırılmıştır [1, 2].

Demiryolu tasarımında kullanılan klasik yöntem, statik analiz yapmak ve dinamik etkileri hesaba katmak için dinamik etki katsayısı ile büyütür. Ancak artan hızlarla bu yöntemin özellikle yüksek hızlı demiryolu hatları için uygun olmadığı ve dinamik analiz yapılması gerekliliği belirlenmiştir. Çünkü

klasik yöntemde demiryolunun doğal frekansları ile trenin tahrik frekanslarının çakışması ile ortaya çıkan rezonansı ve çok yüksek olan dinamik yükleri hesaplamak mümkün değildir. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemini kullanan nümerik analizlerin yapılması ve rezonans durumundaki dinamik etkilerin belirlenmesi gereklidir.



Şekil 1: Ray-tekerlek temasında titreşimler.

Bir dinamik sistem lineer bölgede, belirli bazı frekanstaki harmonik yüklerle maruz kalırsa o sisteme has belirli bir deformasyon şeklinde titreşir. Bu frekansların dışındaki harmonik zorlamalarda ise yeni bir deformasyon şekli oluşmaz, fakat daha önce ifade edilen deformasyon şekillerinin zaman içinde bir kombinasyonu meydana gelir. Dinamik sistemin kendisine has bu titreşim şekillerine serbest titreşim modları ve bu modlara karşı gelen frekanslara da sistemin öz frekansları denir. Yolun dinamik davranışını kütle elemanları (ray, tavers, beton vs.) ve yay elemanları (elastik tabaka, balast, zemin) belirler. Balastlı ve balastsız hatlarda yol, ray, mesnet ve anti-rezonans öz frekansları, balastsız yollarda mühendislik yapısından dolayı ilave olarak yapısal öz frekansı vardır. Balastlı yollarda ise seletli bir üstyapı varsa, ilave olarak selet öz frekansı ve buna bağlı olarak anti-rezonans frekansı oluşmaktadır. Taşıtta, yolda ve çevrede titreşimlere neden olan çok fazla sayıda tahrik kaynağı vardır. Bunlar için; yol geometrisi bozuklukları, ray ve tekerlek yüzeyindeki düzensizlikler, cebireli ray contaları, makas ve kruvazman geçişleri, yol rijitliğinin değişmesi gibi bir çok neden sayılabilir. Ray tekerlek temasında değişken travers aralığı, makas geçişleri, lokal yol oturmaları gibi periyodik olmayan nedenlerden dolayı harmonik olmayan yükler oluşurken, ray ondülasyonları, ray contaları, tekerlek aplatısı (yassılaştırma) gibi periyodik nedenlerden dolayı harmonik yükler oluşmaktadır [3, 4].

En düşük öz frekans, tüm yol çerçevesinin öz frekansıdır. Yol öz frekansı (ft), yol yapısının tüm asılı kütlelerinin sonsuz rijit sınır şartlarına göre düşey yöndeki hareketi ile karakterize edilir. Yol öz frekansında raylar ve traversler kütleli sağlar ve balast da büyük oranda sönümlü yay görevini yapar, bundan dolayı bu rezonans çok iyi sönümlüdür. Başka bir öz frekans da, 200-600 Hz frekans aralığında ray öz frekansı (fr) olup, bu büyük ölçüde ray altı elastik tabaka özelliklerine bağlıdır.

Ray altı elastik tabaka, ray ve travers kütleleri arasında "yay" gibi hareket eder. Burada ayrıca balast, sönümün çoğunu sağlar. (Anti) öz frekans sayısı kütle ve rijitliğe sahip tabaka sayısına bağlıdır. Her çift öz frekansa bir anti öz frekans beklenir ve anti öz frekans, ray yerine travers veya bloğun öz frekansıdır. Mesnet öz frekansı dar bir aralıkta pik değere çıkmaktadır ve bu da rezonansın çok düşük sönümlü olduğunu gösterir. Mesnet titreşimi ray boyunca çok kolay ilerler, bundan dolayı rayın geometrik sönümü çok sınırlıdır [5-7].

2 Titreşim Azaltma Uygulamaları

Demiryolunda farklı nedenlerle meydana gelen titreşimleri azaltmak için, titreşim kaynağında, iletim hattında veya titreşim alıcısında bazı önlemlerin alınması gerekir. Kaynağında alınan önlemler en ekonomik ve en efektif olanlardır, demiryolunda titreşim kaynakları demiryolu taşıtı ve yoldur. Bu kaynaklarda alınabilecek etkili önlemlere çalışmada özet olarak değinilmektedir.

2.1 Taşıttan Kaynaklanan Titreşimleri Azaltmak İçin Alınacak Önlemler

Taşıttan kaynaklı titreşimleri azaltmak için yapılabilecek uygulamalar aşağıda sıralanmaktadır;

- Yaylandırılmayan kütleleri azaltmak,
- Primer süspansiyon (amortisör) rijitliğini azaltmak,
- Uygun damper sistemi seçmek,
- Esnek tekerlek kullanmak,
- Tekerlekleri tornalamak,
- Kayma kontrol (anti-slip) sistemi kullanmak,
- Taşıttan hızını değiştirmek.

2.2 Yoldan Kaynaklanan Titreşimleri Azaltmak İçin Alınacak Bazı Önlemler

Demiryolu kaynaklı titreşimleri azaltmak için uygun yöntemler aşağıda özetlenmektedir;

- Uzun kaynaklı ray kullanmak: Cebireli raylar yerine uzun kaynaklı rayların kullanılması darbe yüklerini azaltır,
- Oynar göbekli makas kullanmak: Makaslar ve kruvazmanlar zemin titreşimlerini 10-15 dBV arttırır. Bu nedenle özellikle yüksek hızlı hatlarda oynar göbekli makaslar darbe yüklerini ve titreşimleri önemli miktarda azaltırlar,
- Rayları düzleştirmek: Rayların daha yüksek standartlarda üretilmesi haddeleme işleminden kaynaklanan düşük frekanslı titreşimleri azaltır. Avrupa'da yüksek hızlı hatlar için daha yüksek standartlarda ray düzleştirme prosesi kullanılmaktadır,
- Ray taşlaması yapmak: Ray ondülasyonlarını temizlemek ve daha düzgün ray profili elde etmek için ray taşlaması yapılmaktadır. Ray ondülasyonları titreşimleri ve yapısal gürültüyü 10-15 dBV arttırır,
- Elastik ray bağlantısı kullanmak: Esnek pedler rayın altında veya selet altında kullanılabilir, standart pedlerden daha esnek pedler 30-40 Hz frekansın üstünde yaklaşık 5dBV kadar titreşimi azaltabilir. Ancak, daha düşük frekanslarda (<30 Hz) zemin titreşimlerini 2-3 dBV arttırabilir. Esnek elemanlar için seçilen yumuşaklık, aynı zamanda ray gerilmesini ve hat ekartmanını (iki ray arası açıklık) arttırdığı için sınırlandırılmaktadır,
- Travers altında ped kullanmak: Balast ile travers arasına yerleştirilen esnek pedler hat çökmesini azaltırken, balast ile travers arasındaki temas alanını % 20-35 arttırır ve balast basıncını da travers tipine bağlı olarak % 15-35 azaltır. Hat geometri bozulma hızını 3-4 kat azaltır. Ayrıca 30 Hz frekansın üstünde zemin titreşimlerini azaltır. Travers altı pedler sayesinde titreşim seviyesi 8-12 dBV azaltılabilir.
- Bohçalı travers kullanmak: Özellikle tünellerde üstyapı yüksekliğini düşürmek için tercih edilen balastsız hatlarda beton traverslerin etrafı kauçuk botlarla sarılır, bohçalanır. Kauçuk botlar sayesinde titreşim seviyesi 8-12 dBV azaltılabilir. Ancak bu sistem, açık yollarda travers ile esnek bot arasına suyun sızması ve suyun donması sonucu hacimsel genişleme ile birlikte betonda çatlama gibi sorunlara neden olduğu için tercih edilmemektedir,
- Balast kalınlığını arttırmak: Balast tabakası traverslerle beraber tren yüklerini taşır ve normal yüksekliği 30cmdir. Alman Demiryolları (DB) testlerde balast yüksekliğini 75 cm'ye çıkartarak 10 Hz'in altındaki frekanslarda 6 dBV kadar titreşimi azaltmıştır ama bu çözüm ek maliyet, ilave yükseklik ve ağırlıktan dolayı uygun değildir. Tabaka kalınlığını arttırmanın hissedilebilir bir faydası yoktur, fakat balast tabakası kalınlığının 30 cm'den az olması önemli stabilite bozulmalarına neden olur,
- Balast altı beton döşeme kullanmak: Açık yollarda zemin yumuşak ise balast altına beton döşeme kullanılabilir. Beton döşeme rezonans frekansını arttırdığı için düşük frekanslı titreşimleri azaltır, ancak bu sefer de yüksek frekanslı titreşimleri arttırma ihtimali kontrol edilmelidir,

- Balast altı elastik tabaka kullanmak: Tipik kalınlığı 25-60 mm olan esnek tabakalar balast altında zemin üstüne (veya alt balast tabakası üstüne) serilebilir. Ancak esnek tabakanın yatak modülü zeminle karşılaştırıldığında hemen hemen hiç bir faydası yoktur. Alternatif olarak, beton döşemeli balastlı hatlarda kullanıldığı zaman, klasik balastlı hatta göre 30 Hz frekansın üstünde titreşimleri 10dBV azaltır, ancak kütle-yay rezonans frekansı (<30 Hz) civarında titreşimleri bir miktar artırır, Açık hatlara göre, tünel beton rijitliği daha yüksek olduğu için balast altı elastik tabakaların performansı daha iyidir. Daha homojen balast çökmesi sağlar ve daha düzgün araç geçişi sağlar. Yüksek elastikiyete sahip elastik tabakalar titreşimi 16-18Hz frekansta azaltmaya başlar ve 50 Hz'de titreşimi 20 dBV azaltır ve bu da yapısal gürültü seviyesini 30-35 dB(A) kadar azaltır. Elastik tabaka rayda ilave eğilme gerilmelerine ve balastta stabilite bozulmalarına neden olabilir. Ayrıca elastik tabakayı balast danelerinden korumak için üzerine kumdan koruma tabakası serilmelidir veya elastik tabakanın üzeri sertleştirilmelidir,
- Zemini iyileştirmek: Bunun için zemin bazı yöntemlerle sıkılaştırılır. Çimento bazlı groutlar granüler zemin içine enjekte edilir. Kil-organik zeminlerde, çimento ve kireç karışımı kullanılır. Eğer zemin çok yumuşak ise zemin iyileştirme yöntemi düşük frekanslı titreşimleri azaltır. Ancak rezonans frekansının artması daha yüksek frekanslardaki titreşimde artışa neden olabilir,
- Sürekli döşenmiş ray uygulamak: Ayrık mesnetli yol üstyapısı mesnet geçiş frekansından dolayı düşük frekanslı tahrike neden olur. Bu tahrik frekansını önlemek için sürekli mesnetli yollar kullanılmaktadır. Sürekli döşemeli sistemle titreşim seviyesi 10 dBV kadar azaltılır. Sürekli mesnetli yol döşeme için değişik yöntemler kullanılır. Örneğin Edilon sisteminde beton için açılan kanal içine raylar yerleştirilip, rayların etrafına mantar ve polimer karışımı malzeme sıvı halde dökülmektedir,
- Kütle-yay sistemi kullanmak: Özellikle tünel içindeki balastsız üstyapıda titreşimi azaltmak için en çok kullanılan yöntem kütle-yay sistemidir. Özellikle tünel içindeki metro hatları balastsız üstyapı olarak inşa edilmektedir. Tünel yakınındaki binalara iletilen titreşimleri sönmölemek için geliştirilen yöntem kütle-yay sistemidir. Burada yol çerçevesi esnek yay elemanları ile desteklenerek istenmeyen titreşimleri ve yapısal gürültüyü önlemek mümkündür. Bunun için tünel tabanı ile prekast veya yerinde döküm beton döşemeli yol çerçevesi arasına sentetik, doğal kauçuk tabaka veya çelik yay malzemeleri ilave edilir. Beton döşeme kütleli oluştururken, elastik tabakalar da yay gibi davranmaktadır [6, 7, 8].

2.3 Ondülasyonun Düzeltilmesi için Ray Taşlama Yöntemi

Genel olarak ray üst yüzeyi üzerinde az ya da çok periyodik biçimlerde oluşan düzlemsel bozukluklar olarak tanımlanan ondülasyonlar, demiryolu mühendislerinin en önemli problemidir (Şekil 2). Ondülasyonlar tüm demiryollarında ve kentsel raylı sistemlerde, dingil yükünden bağımsız, değişik hızlarda oluşabilmektedir.

Ondülasyonun dalga derinliği 0,05 mm'ye ulaştığında gürültünün ve 0,1 mm'yi geçtiğinde ise, üstyapı bakım maliyetlerinin artmasına neden olmakta ve genelde dalga boylarına ve nedenlerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Ancak, bu sınıflandırmalar demiryolu mühendisleri için pek fazla bir şey ifade etmez, çünkü onlar için önemli olan aşınmanın ortadan kaldırılması ya da en azından azaltılması için ne yapılması gerektiğidir.



Şekil 2: Ray Ondülasyonları.

Ondülasyon oluşumunu azaltmak için alınabilecek önlemler;

- Taşıtlarda yaylandırılmamış kütlelerin azaltılması,
- Dingil ara uzaklığı küçük olan ve yönlendirilebilen bojiler kullanılması,
- Dingillerin paralelliğinin iyileştirilmesi,
- Tek motorlu bojilerden kaçınılması,
- Dingil yüklerinin azaltılması,
- Yolda daha yüksek yanal rijitlik sağlanması,
- Daha küçük travers aralığı seçilmesi,
- Özellikle kurbalarda çizmeli travers tipi yapıdan kaçınılması,
- Sertleştirilmiş raylar kullanılması,
- Raylarda doğrultma ve genleşme nedeniyle oluşan alt gerilmelerin azaltılması,
- Kaynakların ray çeliğinin sertliğinde yapılması,
- Yeni döşenen rayların taşlanması ve kaynaktaki eğrilikler ile pürüzlüklerin giderilmesi,
- Sürtünme katsayısının kontrolü,
- Ray iç yanağının (özellikle dış rayda) ve budenlerin yağlanması,
- Üst yüzey çatlakların düzenli şekilde giderilmesi ve rayların temiz tutulmasıdır.

Bazı iyileştirme yöntemlerinin ondülasyonları azaltma etkileri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1: Bazı iyileştirme yöntemlerinin ondülasyonları azaltma etkileri.

İyileştirme yöntemi	Ondülasyon Tipi ve Nedeni				
	Tip 1 P rezonansı	Tip 2 2.Tekerlek takımı burulma rezonansı	Tip 3 Kurplarda kılavuz ray	Tip 4 Bohçalı travers	Tip 5 Mesnet rezonans frekansı
Esnek ray bağlantı sistemi-balastsız	++ (k=30MN/m c=7,4kNs/m)	-	-	-	+
Esnek ray pedi	+	+	-	+	+
Ray flanşı yağlama	-	++	-	++	-
Tekerlek buden yağlama	-	+	-	+	-
Ray mantarı sürtünme modifiyeri	+	+	+	+	+
Tekerlek bandajı sürtünme modifiyeri	+	+	+	+	++
Mantarı sertleştirilmiş ray	++	++	+	+	+
Kılavuz rayı	-	-	+	-	-
Asimetrik profil taşlama	-	+	+	+	-
Minimum yatay kurp yarıçapını 400 m ile sınırlandırma	-	+	+	+	-
Çekim ve frenlemeyi sınırlandırma	+	+	-	-	-
Değişken travers aralığı	-	-	-	-	+
Esnek tekerlek takımı	+	+	+	+	+

++ = Bir veya daha fazla raylı sistemde başarılı kullanılmaktadır;
+ = Başarılı olması muhtemel, ama henüz test edilmedi;
- = Tavsiye edilmez.

Uygulamada ray-travers bağlantı aralığı 75 cm'den 60 cm'ye düşürülerek mafsalsız-mafsalsız mod rezonans frekansı 750 Hz'den 1000 Hz'e çıkarılmıştır ve bu sayede en çok doğru yol kesimlerinde ya da buden sürtünmesi oluşmadan seyredilebilen büyük yarıçaplı kurplarda görülen uğuldayan raya neden olan (roaring rail) ondülasyon dalga boyu azaltılmaktadır. Dalga boyu, tekerlek bandajının ray mantarına temas genişliğinin iki katından daha az olduğunda ondülasyon oluşmaz. Amerika'da yapılan bir araştırmada ondülasyonları azaltmak için bazı yöntemler kullanılmıştır ve bu yöntemlerin yıllık maliyetleri ray taşlama ile karşılaştırılmıştır. İyileştirme yöntemlerinin maliyetleri her sistemin kendine özgü şartlarından dolayı değişmektedir, ancak maliyet oranı karşılaştırma için anlamlı sonuç vermektedir [8, 9].

Tablo 2'de ray taşlama yönteminin diğer yöntemlere göre maliyeti verilmektedir, yağlama yöntemi dışında verilen diğer yöntemlerin daha pahalı olduğu bu değerlerden görülmektedir.

Tablo 2: Diğer ondülasyon azaltma yöntemlerinin ray taşlama maliyetine oranları.

İyileştirme yöntemi	Ray taşlama maliyetine oranı
Esnek ray pedi (balastlı hat)	31,3
Esnek ray pedi (balastsız hat)	11,3
Ray flanşı veya tekerlek buden yağlama	0,5
Ray mantarı sürtünme modifiyeri	1,8
Mantarı sertleştirilmiş ray	2,0

Ray Taşlamanın Faydaları:

- Ray profilinin sağlanması: Bu yöntemle raydaki profil bozuklukları giderilerek, ray gerekli forma kavuşturulur.
- Ray ömrünü arttırması: Ray profilinin düzgünlüğünün sağlanması budenin (tekerlek dışı) ray iç köşesine olan temasını önlemekte ve bu sayede yanıl kusur oluşmasını azaltmakta dolayısıyla ray ömrünü arttırmaktadır. Avusturya Demiryollarına göre taşlama çalışması dar kurplarda ray ömrünü 5-8 yıl kadar arttırır [10, 11].
- Tekerlek hareketini iyileştirmesi: Newman maden hatlarında buden aşınması nedeniyle profilendirilen veya değiştirilen tekerleğin ömrü taşlama sonrası artmıştır.

3 Sayısal Yöntemle Dinamik Analiz

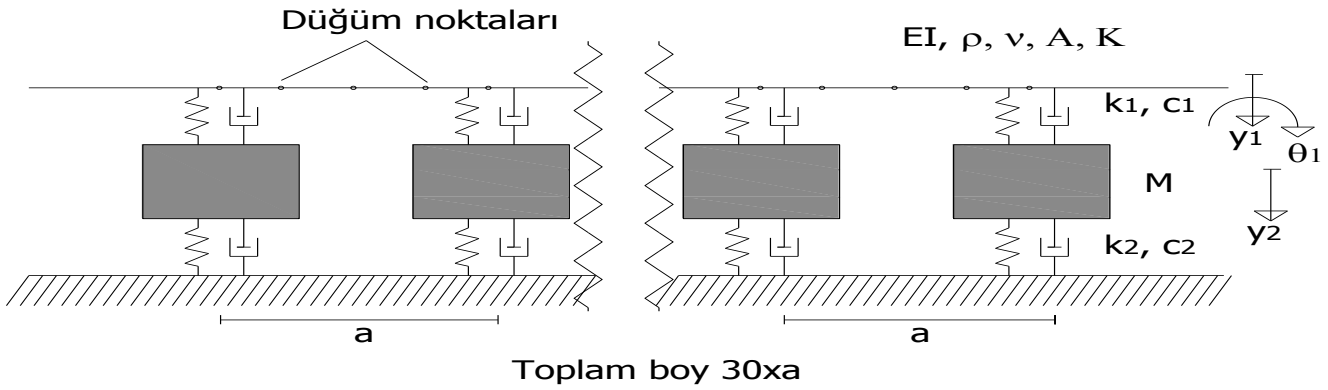
Çalışmanın devamında, titreşimlerin etkisini de dikkate alarak üstyapıyı incelemek için; örnek hat olarak seçilen İstanbul Aksaray-Yenibosna metro hattının balastlı üstyapısı sonlu elemanlar programı ile modellenmiştir. Demiryolu üstyapısı yol eksenine göre simetrik bir yapıya sahip olduğu için hesaplamada kolaylık sağlamak amacıyla tek ray ve yarım traversten oluşan yol sistemi olarak alınmıştır. Demiryolunun öz frekanslarını ve dinamik tepki davranışını tespit etmek, ayrıca ölçüm sonuçlarına göre sonlu eleman modelini doğrulamak amacıyla ölçüm de yapılmıştır. Arazide ray mantarına çekik darbe yükü uygulanarak rayın ve mesnetin

(beton travers) dinamik tepki davranışı ölçülmüştür. Böylece dinamik analiz sonuçları doğrulanmaya çalışılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde, raylar sonlu uzunlukta iki boyutlu kiriş elemanları olarak belirlenir. Travers kütleleri kiriş elemanın düğüm noktalarına bağlanır. Raylar BEAM3 iki serbestlik dereceli (düşey öteleme ve dönme) elastik kiriş elemanları ile, traversler eşdeğer tekil kütle elemanlarıyla, elastik tabakalar ve balast tabakası COMBIN14 yay-sönüm elemanları ile modellenmiştir. Her iki mesnet arasındaki ray kısmı, dört eşit parçaya bölünmüştür. Modelde 30 travers aralığı için 183 eleman kullanılmış ve 152 düğüm noktası

oluşturulmuştur. Her düğüm noktasında iki serbestlik derecesi olduğu düşünülürse, bu yaklaşık olarak 304 serbestlik derecesine karşılık gelmektedir.

Sonlu elemanlar modeli Şekil 3'te gösterilmiştir, ANSYS 9.0 programı ile harmonik tepki analizi yapılmıştır. Harmonik bir yük yapısal sistemde harmonik tepkiye yol açacaktır. Harmonik tepki analizi, aracın devamlı dinamik davranışını dolayısıyla tasarımın rezonans, yorulma ve zorlanmış titreşimin diğer zararlı etkilerine başarıyla karşı koyup koyamayacağını belirlemeyi sağlamaktadır [12-15].



Şekil 3: Sonlu elemanlar için yol modeli.

Harmonik tepki analizi lineer bir yapının zamanla sinüzoidal (harmonik) olarak değişen yüklere karşı sürekli durum tepkisini belirlemekte kullanılan bir tekniktir. Bu analizde amaç, çeşitli frekanslarda yapının tepkisini hesaplamak ve grafiğini elde etmektir. Uyarımın başlangıcında ortaya çıkan geçici (transient) titreşimler harmonik tepki analizinde hesaba katılmazlar. Harmonik tepki analizi lineer bir analizdir. Her türlü gayri lineerlik (plastisite ve temas elemanları gibi) sonlu eleman modelinde bulunsa bile analizde gözardı edilir. Bu analizde, dinamik tepki grafiğinde pik değerler rezonans olayını ve dolayısıyla yolun öz frekanslarını göstermektedir. Bu grafiklerden yol, ray ve mesnet öz frekansları hesaplanmıştır.

Nümerik analizde, 0-1500 Hz frekans aralığında 3 Hz frekans aralığında toplam 500 frekans değerine göre dinamik hesaplama yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde, tekerlek yükü hem travers üstünde hem de iki travers ortasında uygulanarak çözümlenmiştir. Birim tekerlek yükü travers üstünde uygulanırken, ray ve traversin dinamik tepkisi belirlenmiş ve dinamik tepkilerinin farklı olduğu görülmüştür.

Harmonik tahrik yükü altında ray çökmesi ve ray eğilme momenti önemli oranda artmaktadır. Balastlı yolun öz frekansları ile tahrik yükünün frekansı aynı olduğu zaman rezonans olayı ile birlikte dinamik etkiler de artmaktadır. Statik değerlerle karşılaştırıldığında, ray çökmesi balastlı yolun öz frekanslarında % 60'a varan oranda artmaktadır. Travers üstündeki ray eğilme momentinde, yol öz frekansına yakın frekanslarda % 40'a varan oranlarda artış olmuştur.

Mesnet öz frekansında iki mesnet arasındaki ray eğilme momenti 8-9 kata varan oranlarda artmaktadır. Yani trenin tahrik frekansı yolun mesnet öz frekansı ile çakışırsa, rezonans olayı ile birlikte ray eğilme momenti hiç tahmin edilemeyecek kadar büyük düzeylerde olacaktır.

Tekerlek yükünün mesnet üstünde olması ve iki mesnet arasında olmasına göre hesap sonuçları değişmektedir. İki mesnet arasında ray daha elastik olduğu için ray çökmesi % 2-4 kadar daha fazla, ancak iki travers arasındaki dinamik ray eğilme momenti, travers üstündeki eğilme momentinden 7-8 kat daha fazla olmaktadır.

Tablo 3. Statik ve dinamik hesap sonuçları.

Yol parametresi	Statik analiz		Dinamik analiz	
	Ray çökmesi y(mm)	Ray eğilme momenti M(kNm)	Ray çökmesi y(mm)	Ray eğilme momenti M(kNm)
Mesnet üstünde	0,768	8,654	0,889	9,264
İki mesnet arasında	0,777	10,245	0,906	85,007

Sonlu elemanlar yönteminde, ray ve traversin dinamik tepki davranışları ve çökme değerleri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Ray ile travers arasındaki elastik tabakadan dolayı ray ve travers çökmesi aynı olmamakta, çok az da olsa bir fark bulunmaktadır. Ayrıca frekans-dinamik tepki grafiklerinden traversin dinamik tepki davranışı ile rayın tepki davranışının birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür.

Rayın tepki grafiğinden yol, ray ve mesnet öz frekansları, travers tepki grafiğinden yol ve travers öz frekansları belirlenmiştir. Mesnet noktasında ray ve traversin dinamik tepki grafiğinden ilk pik değer yol öz frekansını, ikinci pik değer ise ray ve travers öz frekansını göstermektedir, (Şekil 4-7'de çalışmada elde edilen grafikler verilmektedir).

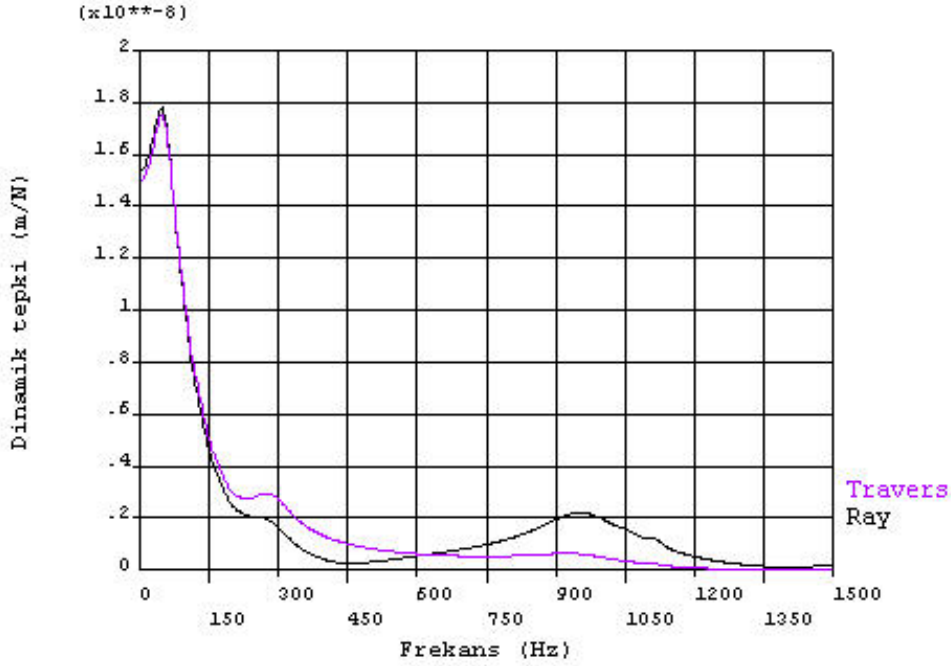
Balastlı yolun öz frekansları Tablo 4’de gösterilmiştir ve elde edilen bazı önemli sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Balastlı yol öz frekansı, zemin-balast tabaka rijitliğine bağlı olarak değişmektedir. Diğer yol parametrelerinin yol öz frekansına bir etkisi yoktur.
- Ray ve travers öz frekansları ray tipine, travers tipine, travers aralığına, ray altı elastik tabaka rijitliğine bağlı olarak değişmektedir. Zemin-balast tabaka rijitliğinin bir etkisi yoktur.

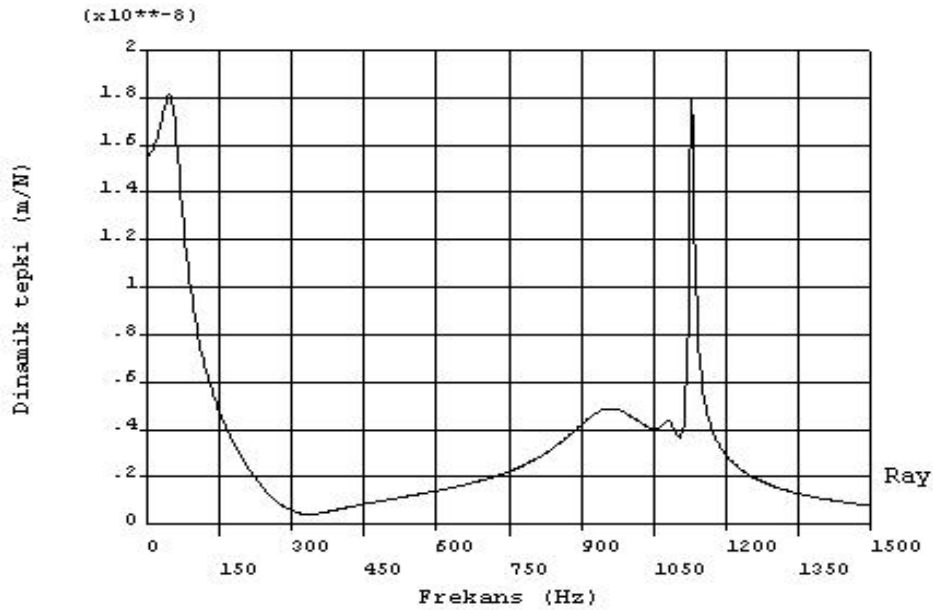
- Mesnet öz frekansı ray tipine, mesnet aralığına ve elastik tabaka tipine bağlı olarak değişmektedir. Zemin tipinin ve travers kütesinin etkisi olmamaktadır.

Tablo 4: Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için öz frekanslar.

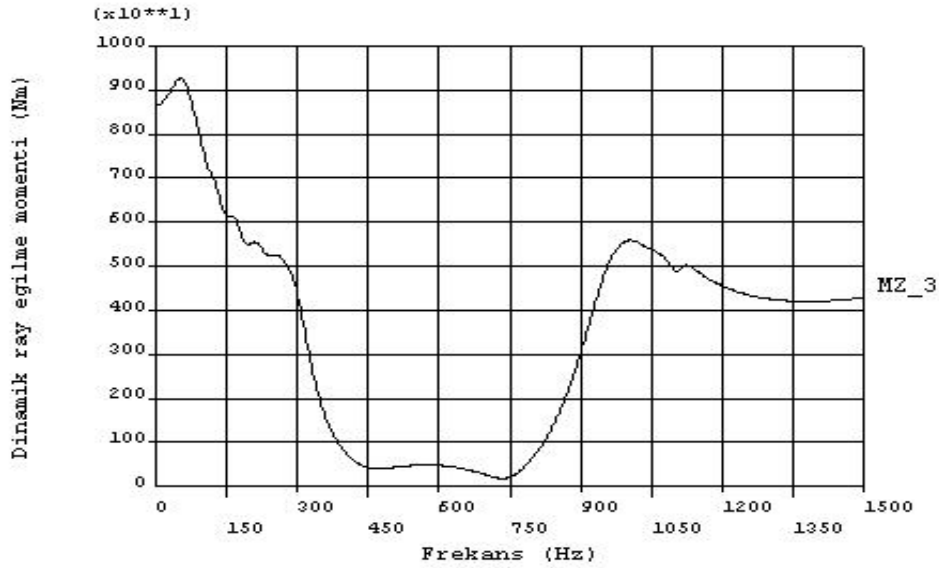
Yol öz frekansı	Travers öz frekansı	Ray öz frekansı	Mesnet öz frekansı
48 Hz	273 Hz	951 Hz	1128 Hz



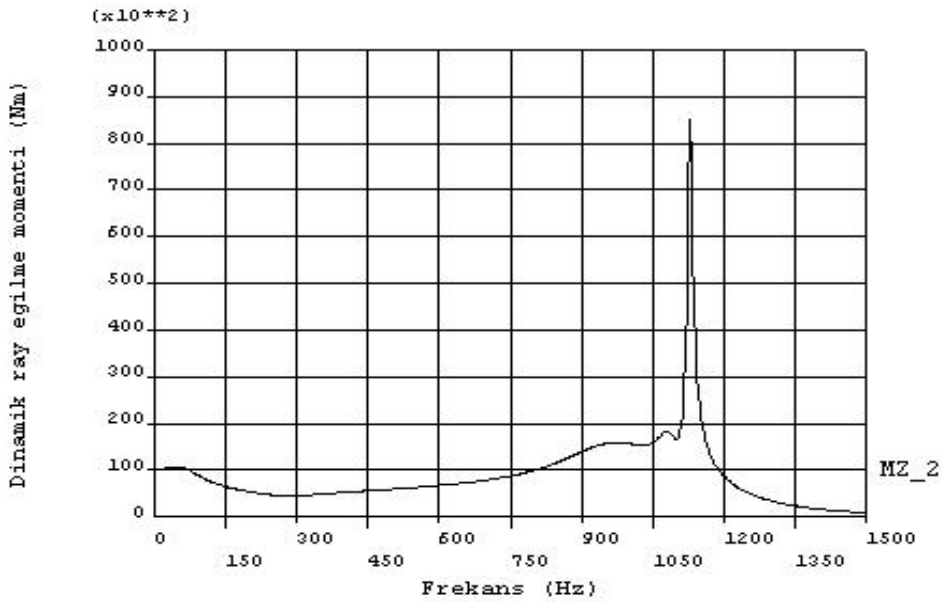
Şekil 4: Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki grafiği.



Şekil 5: İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki grafiği.



Şekil 6: Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği.



Şekil 7: İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği.

4 Doğal titreşim frekanslarının ölçümü

Demiryolunun öz frekanslarını ve dinamik tepki davranışını tespit etmek, ayrıca ölçüm sonuçlarına göre sonlu eleman modelini doğrulamak amacıyla ölçüm yapılmıştır. Balastlı yol modelinde elastik tabakaların ve balast tabakasının dinamik özellikleri bilinmediği için bazı kabuller yapılmıştır. Daha sonra arazide ray mantarına çekiç darbe yükü uygulanarak rayın ve mesnetin (beton travers) dinamik tepki davranışını ölçülmüştür.

Bir demiryolunun tepki davranışını belirlemek için, ray üstüne yük uygulanır ve bu yük altında ray ve traversteki yer değiştirme ölçülür. Yük ve titreşim sensörleri ile frekansa bağlı olarak uygulanan yük ve ivme verileri elde edilir. Sonra bu verilerin Fourier dönüşümleri ile yolun yer değiştirmesinin yüke oranı olan tepki fonksiyonları bulunur. Frekans tepki

fonksiyonları yol yapısının rijitlik özelliğini gösterir. Demiryolunun tepki fonksiyonu bulunurken, taşıt yükünden bağımsız olduğu yani, yolun rijitlik ve sönüm özelliklerinin taşıt yükünden bağımsız olduğu kabul edilmektedir. Ancak, Almanya'da yapılan ölçümlerde tren yükünün yolun rijitliğini ve sönümünü arttırdığı sonucuna varılmıştır. 1991 yılında Berlin Teknik Üniversitesi balastlı bir yolda statik tren yükü ile yüklenmiş ve yüklenmemiş yol için ayrı ayrı tepkileri ölçmüştür. Öz frekanslar çok değişmemekle birlikte ön yüksüz durumda iken, maksimum tepki değerlerinin yüklü duruma göre % 10-20 arasında fazla olduğu görülmüştür.

Yük, 200 Hz frekansa kadar hidrolik pistonla sinüzoidal bir şekilde uygulanırken, daha yüksek frekanslar için çekiç darbe yükü uygulanır. Çekiç darbe testi yol yapısını veya numuneyi titreştirmeyi amaçlar. Belli bir yönde ve belli bir noktada uygulanan darbe yükü kısa bir süre için yapının dengesini

bozar. Yükün süresi ve büyüklüğü tüm frekans aralığında darbe enerjisinin dağılımını belirler. Ayrıca çekiç ile yapı arasındaki temas yüzeyi ve çekiç ucunun bu dağılımda bir rolü vardır. Çekiç darbesi data kayıtının başlamasına neden olur ve titreşim durup, denge konumu tekrar oluşana kadar kayıt devam eder. Titreşimler bir veya daha fazla ivme ölçerle kaydedilir.

İvme ve yük ölçümlerinin tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini belirlemek için koherens'ine (tutarlılığına) bakılır. Koherens değeri 1'e yakın ise iyi bir koherens, 0-0,8 arasında ise koherensin iyi olmadığı yani sonuçların kullanılmasının uygun olmadığı anlaşılır. Rezonans frekansları normalde 1'e çok yakın korelasyon değeri verirken, anti-rezonans frekansları genelde sıfıra yakın korelasyon verir. 40 Hz'in altında küçük çekiç testi, 1400 Hz'in üstünde büyük çekiç testi yetersiz korelasyon verecektir.

Ölçümler için Brüel&Kjaer PULSE çok kanallı ölçüm sistemi, Dytran 5803A Sledge Hammer darbe çekici ve kuvvet sensörü Tip 4396 ivme ölçer kullanılmış, titreşim sinyalleri bir bilgisayar yardımıyla kaydedilmiş ve analizleri yapılmıştır. Ölçümler, Bakırköy-Zeytinburnu arası 2. yol, Km 5+510'da rayların alt kısmına ve traversin üst kısmına manyetik olarak yapılandırılan ivme ölçer ile düşey doğrultularda kaydedilmiştir.

Ölçümlerde her çekiç darbesinde koherens grafiği incelenmiş ve uygun koherens değerinin yakalanması durumunda titreşim tepki davranışı kaydedilmiş, uygun değer yakalanmadı ise uygun koherens değerleri elde edilene kadar darbe denemeleri tekrarlanmıştır. Ölçümler büyük çekiç ile 0-1600 Hz frekans aralığında yapılmıştır. Ölçümler trenden kaynaklanan tahrik titreşimlerinin olmaması için işletme seferlerinin olmadığı 01.00-05.00 saatlerinde yapılmıştır, Şekil 8.



Şekil 8: Çekiç darbe testinin uygulanması.

4.1 Ölçüm Sonuçları İle Sayısal Modelin Doğrulanması

Balastlı ve balastsız yol modelleri için elastik tabakaların dinamik özellikleri dışındaki diğer parametreler bilinmemektedir. Ancak balast ve ray altı elastik tabakanın rijitlik katsayı ve sönüm oranları bilinmemektedir. Sonlu eleman modelindeki ray altı elastik tabakanın ve balast tabakasının rijitlik katsayısı ve sönüm oranı değerleri değiştirilerek, ölçülen öz frekans değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Modelin öz frekansı ile ölçülen öz frekansın hemen hemen aynı olması için en uygun rijitlik ve sönüm parametreleri belirlenmiştir.

Doğrulanmış modelin öz frekansları ve maksimum dinamik tepki katsayıları Tablo 5'de, doğrulanmış modellerin yol parametreleri Tablo 6'da verilmiştir. Doğal zeminli balastlı yol için, mesnet noktasında ölçüm sonuçları ile çok uyumlu bir sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir. Öz frekans ve dinamik tepki değerleri hemen hemen aynı, ancak mesnet öz frekansı ve bu frekanstaki dinamik tepki değeri bir miktar farklı bulunmuştur.

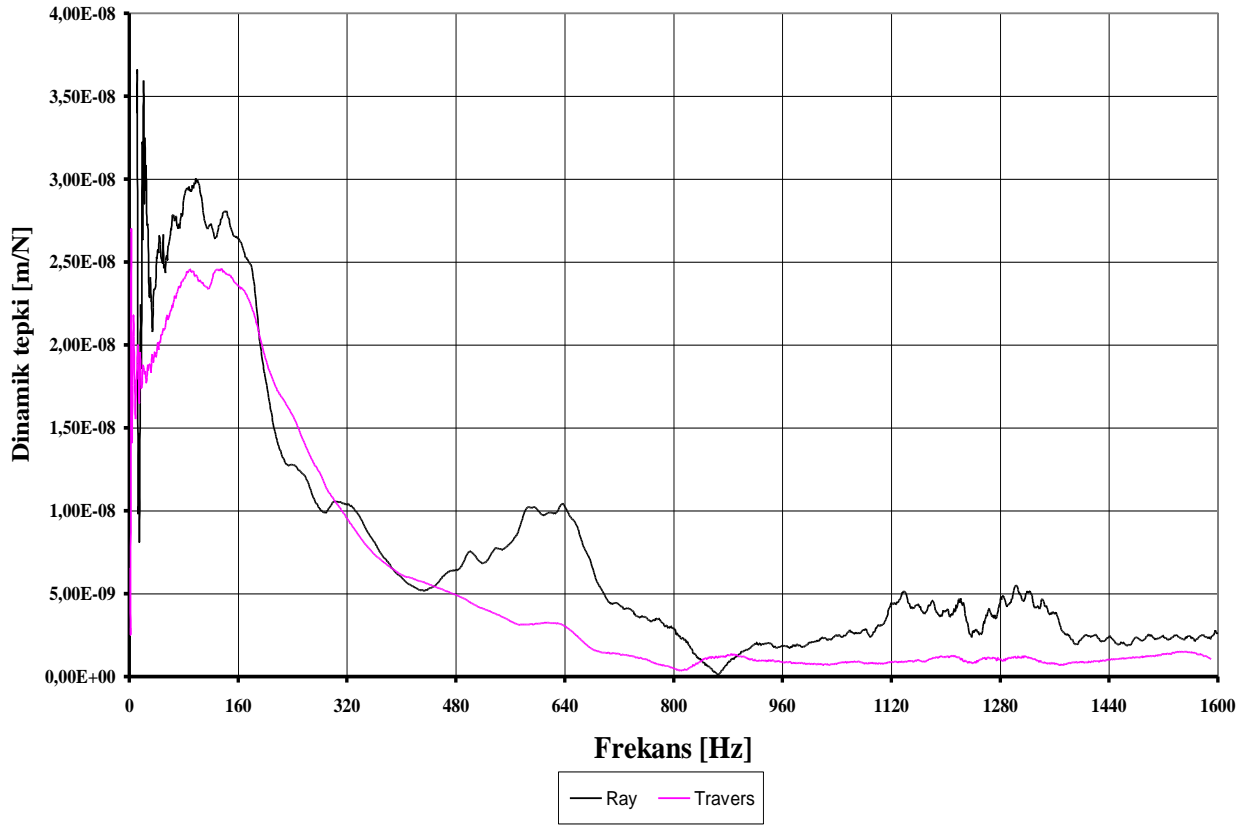
E-B kirişi ile hesaplanan mesnet öz frekansı, gerçek öz frekandan % 9 oranında büyük elde edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi balastlı yolun kontrol edilemeyen çok sayıda parametresinin olması nedeniyle bazı farklı sonuçlar olabilmektedir. Yani tam kontrol edilemeyen parametreler nedeniyle dinamik tepki değerleri arasında kabul edilebilecek derecede bir farkın olması kaçınılmazdır (Şekil 9-12).

Tablo 5: Ölçülen ve doğrulanmış sonlu elemanlar modelinin öz frekans değerleri.

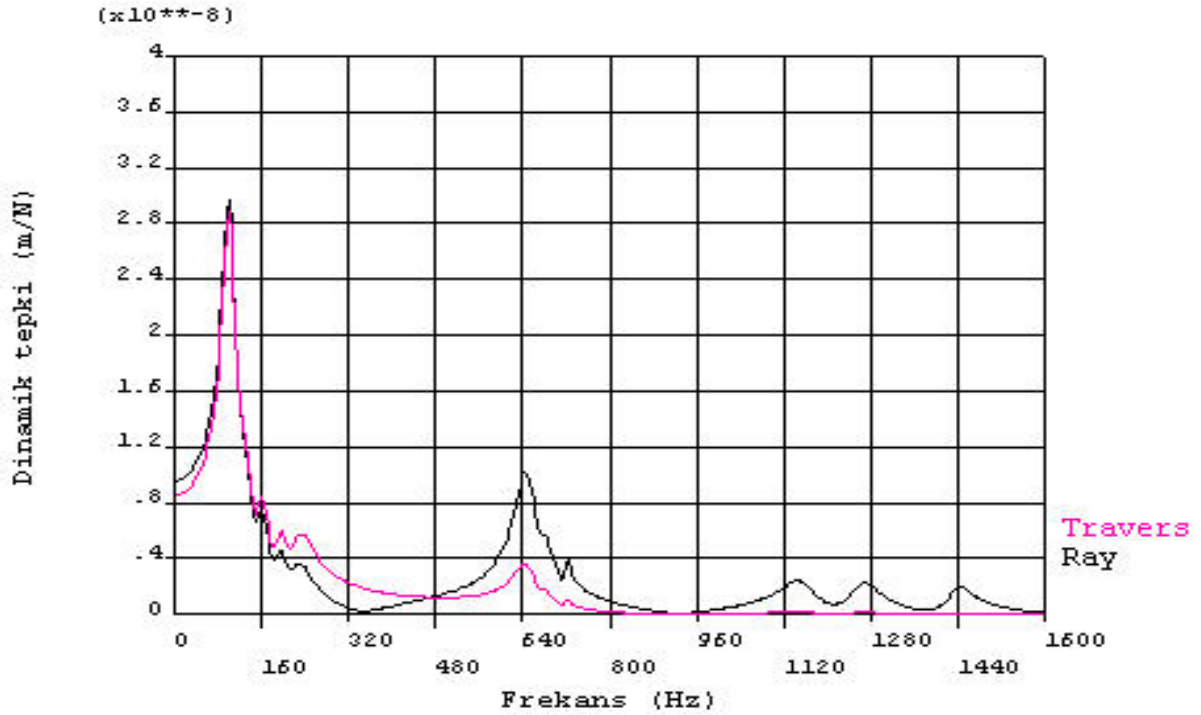
	Yol öz frekansı (Hz)	Ray öz frekansı (Hz)	Mesnet öz frekansı (Hz)
Ölçüm	100	640	674
Model	100	640	736

Tablo 6: Balastlı yol için doğrulanmış modelin parametreleri.

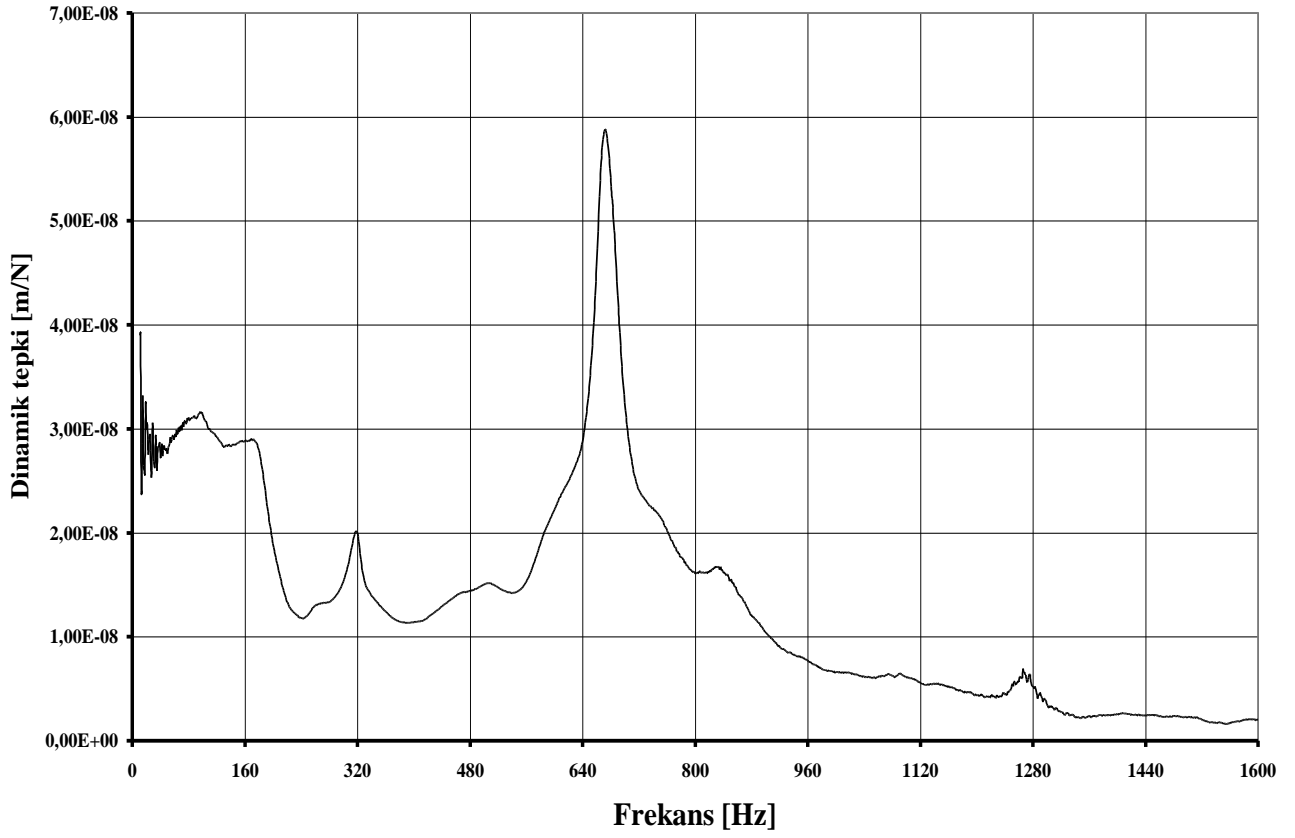
Parametre	Sembol	Değer	Birim
Ray tipi	S49		
Rayın atalet momenti	I	1819e-8	m ⁴
Rayın kesit alanı	A	6297e-6	m ²
Rayın kesme katsayısı	K	0.35	-
Ray çeliğinin elastisite modülü	E	2.1e11	N/m ²
Ray çeliğinin yoğunluğu	ρ	7850	kg/m ³
Rayın poisson oranı	ν	0.3	-
Rayın birim kütlesi	m	49.43	kg/m
Travers aralığı	a	75	cm
Yarım travers kütlesi (B58 monoblok beton)	m	124.5	kg
Ray altı elastik tabakanın rijitlik katsayısı	k	520e6	N/m
Ray altı elastik tabakanın sönümleme katsayısı	c	7e3	Ns/m
Tabii zeminli balast tabakasının rijitlik katsayısı	k	65 e6	N/m
Tabii zeminli balast tabakasının sönümleme katsayısı	c	32e3	Ns/m



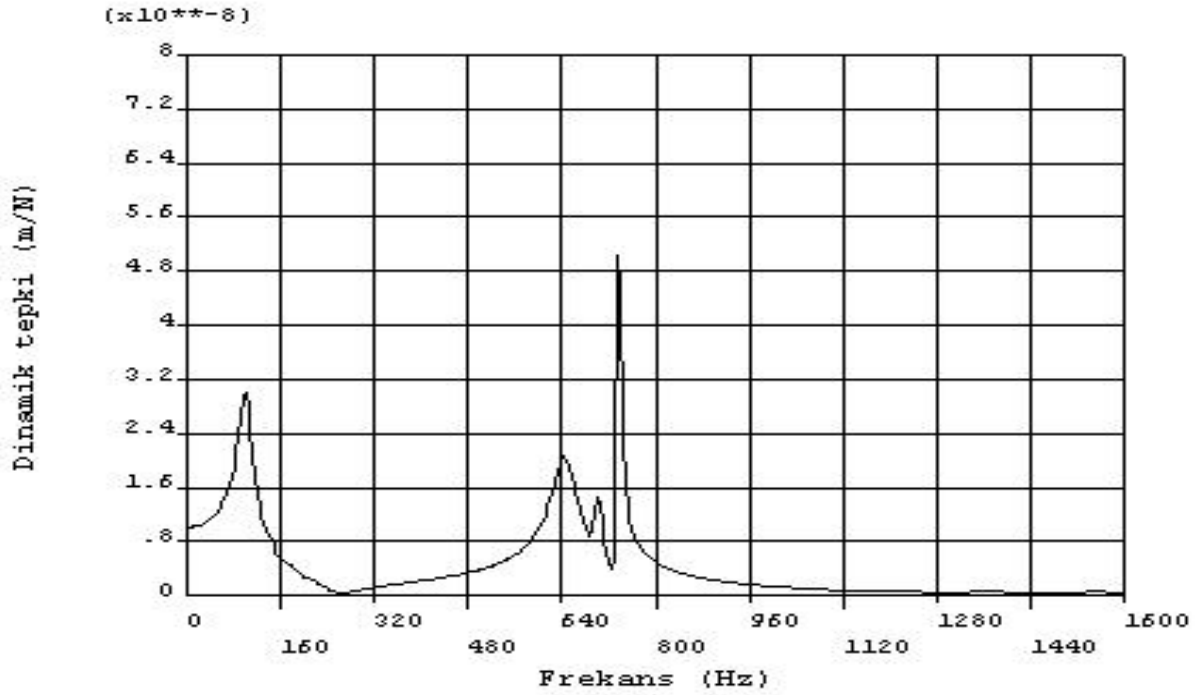
Şekil 9: Balastlı yolda mesnet noktasında dinamik tepki ölçüm değerleri.



Şekil 10: Doğrulanmış sonlu elemanlar balastlı yol modeli dinamik tepki değerleri.



Şekil 11: Balastlı yolda iki mesnet arasında ray dinamik tepki ölçüm değerleri.



Şekil 12: Doğrulanmış sonlu elemanlar balastlı yol modeli ray dinamik tepkisi.

5 Sonuçlar

Demiryolu titreşimlerini azaltmak için, titreşim kaynağında, iletim hattında veya titreşim alıcısında bazı önlemlerin alınması gerekir. Kaynağında alınan önlemler en ekonomik ve en efektif olanlardır. Demiryolunda titreşim kaynakları demiryolu taşıtı ve yoldur. Titreşimin azaltılması bakım, konfor ve güvenlik açısından önem taşımaktadır. Demiryolunda taşıttan kaynaklanan tahrik frekansı ile yolun doğal frekanslarından biri eşit olduğunda rezonans meydana gelmekte, bu durumlarda taşıt stabilitesi, yolcu konforu, taşıt ve yol birleşenlerinde istenmeyen bozulmalar ve hasarlar oluşmaktadır.

Çalışmada örnek alınan balastlı yol modelinde yapılan dinamik analiz sonucunda, ray çökmesi ve ray eğilme momentinin statik hesaba göre büyük bulunduğu görülmüştür. Statik değerlerle karşılaştırıldığında, ray çökmesi balastlı yolun öz frekanslarında % 60'a varan oranda artmakta, transvers üstündeki ray eğilme momentinde, yol öz frekansına yakın frekanslarda ise % 40'a varan oranlarda artış olmaktadır. Mesnet öz frekansında iki mesnet arasındaki ray eğilme momenti 8-9 kata varan oranlarda artabilmektedir. Yani trenin tahrik frekansı yolun mesnet öz frekansı ile çakıştığında, rezonans olayı ile birlikte ray eğilme momenti tahmin edilenden büyük olmaktadır.

Doğal zeminli balastlı yol için, mesnet noktasında ölçüm sonuçları ile sonlu elemanlar modeli sonuçlarında uyum elde edilmiştir. Öz frekans ve dinamik tepki değerleri hemen hemen aynı, ancak mesnet öz frekansı ve bu frekanstaki dinamik tepki değeri biraz farklı bulunmuştur. Balastlı yolda kontrol edilemeyen çok sayıda parametrenin olmasından dolayı bazı farklılıklar olağandır. Ray bağlantı elemanlarının sıklığı, transvers altında boşluk olup olmaması, balast tabakasının temiz olması, balast malzemesinin köşeli veya oval olması gibi bir çok parametre sonuçları etkilemektedir.

6 Kaynaklar

[1] Fryba, L., Vibration of solids and structures under moving loads. 1st edition, Nordhof International

- Publishing, Groningen, Netherlands, ISBN 90-01-32420-2, 1972.
- [2] Garg Vijay and Dukkipati Rao, V., Dynamics of Track Vehicle Sytems, Academic Pres, Ontario, Kanada, ISBN: 0-12-275950-8, 1984.
- [3] UIC International Eisenbahnverband., Katalog der Schienenfehler, Utrecht, UIC, 1979.
- [4] Grassie, S.L. and Kalousek, J., Rail corrugation: characteristics, causes and treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 207 (F1), 57-68, 1993.
- [5] TCRP Report 23., Wheel/Rail Noise Control Manuel, 203, Transport Research Board, 1997.
- [6] TCRP Research Results Digest., Sayı 26, Transport Research Board, 1998.
- [7] Boggott, M.G., Railway Gazette International, 1984.
- [8] Scroba Peter and Roney Mike., Rail Grinding Best Practices, National Research Council of Canada., 1999.
- [9] Alias, J., Le Rail, Rail Engineering International, 1996.
- [10] Semionov, V.T., International Railway Journal.
- [11] Dahlberg, T., Vertical dynamic train-track interaction- verifying a theoretical model by full-scale experiments, *Vehicle System Dynamics*, 24 (Supplement), 45-57, 1995.
- [12] Dahlberg, T., Dynamic interaction between train and non-linear track model. In *Grundmann and Schuëller (editors), Proceedings of the 4th, International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN2002*, Munich, Germany, 2-5 September, 2002. Swetz & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 510X, 2002.
- [13] De Man Amy., Dynatrack, A survey of dynamic track properties and their quality, Delft Teknoloji Üniversitesi, Hollanda, 2002.
- [14] Diana, G, Cheli, F, Bruni, S, and Collina, A., Interaction between rail-road superstructure and track vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 23, 75-86, 1994.
- [15] Fröhling, R, D., Deterioration of track due to dynamic vehicle loading and specially varying track stiffness. *PhD thesis*, Faculty of Engineering, University of Pretoria, Pretoria, South Africa, 1997.