



DEPREM ETKİSİ ALTINDA DEMİRYOLU ÜSTYAPISI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Fatma DEMİR*, Mehmet SALTAN

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Özet
<i>Deprem</i> <i>Demiryolu Üstyapısı</i> <i>Sonlu Elemanlar Yöntemi</i>	Demiryolu taşımacılığı çevreye olan uyumu, kullanım hızı, ekonomik ve güvenli olması bakımından günümüzde çok önemli bir sistem haline gelmiştir. Bu sistemin güvenli bir şekilde işleyebilmesini sağlayabilmek; düzenli bakım ve onarımları zamanında yaparak büyük kazalara sebep olacak ray geometrisinin bozulması gibi deformasyonların önüne geçecektir. Trenlerin raydan çıkmalarının temel nedeni olan demiryolu hat geometrisinin bozulması sonucunda can kayıpları ve ağır yaralanmalar olmakta, ülke ekonomisi büyük zarara uğramaktadır. Hat geometrisinin bozulmasının birçok nedeni vardır. Bunlardan biri de deprem olarak bildiğimiz yer hareketleridir. Yüksek şiddetli depremler, demiryolu hat geometrisinde ani bozulmalara neden olmaktadır. Bozulmalar sonucunda ciddi kazalar olabilmektedir. Bu yüzden deprem etkisindeki üstyapı davranışının araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada demiryolu üstyapısı Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak modellenmiş ve üstyapının deprem etkisi altında davranışı incelenmiştir. Raylar çerçeve eleman; traversler, balast tabakası, subbalast tabakası ve zemin katı eleman olarak tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında raydaki eğilme momenti, çökme değerleri ve yatay deplasmanlar hesaplanmıştır.

INVESTIGATION OF RAILWAY TRACK BEHAVIOR UNDER EARTHQUAKE

Keywords	Abstract
<i>Earthquake</i> <i>Railway Track</i> <i>Finite Element Method</i>	Railway transportation has become a very important system in terms of compatibility with the environment, speed of use, economic and safety. To be able to operate this system safely; regular maintenance and repairs will be done in time to prevent deformation such as distortion of the rail geometry which will cause big accident. As a result of the corruption of the railway line geometry, which is the main reason for the trains leaving the railroad, there are life losses and serious injuries, and the country's economy is undergoing major damage. There are many reasons for the deterioration of the line geometry. One of these is the ground movements we know as earthquakes. High-intensity earthquakes, railways cause sudden deterioration in line geometry. As a result of corruption, serious accidents can occur. Therefore, the behavior of the superstructure affected by earthquake must be investigated. In this study, railway superstructure was modeled by using Finite Elements Method and superstructure behavior under earthquake effect was investigated. The rails are defined as frame elements, sleeper, ballast layer, subballast layer and floor as solid element. Within the scope of the study, bending moment, collapse values and horizontal displacements were calculated.

Alıntı / Cite

Demir F., Saltan M. (2017). Deprem Etkisi Altında Demiryolu Üstyapısı Davranışının İncelenmesi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5(3), 615 – 620.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

F. Demir –

M. Saltan – 0000-0001-6221-4918

Başvuru Tarihi /Submission Date | 03.01.2017

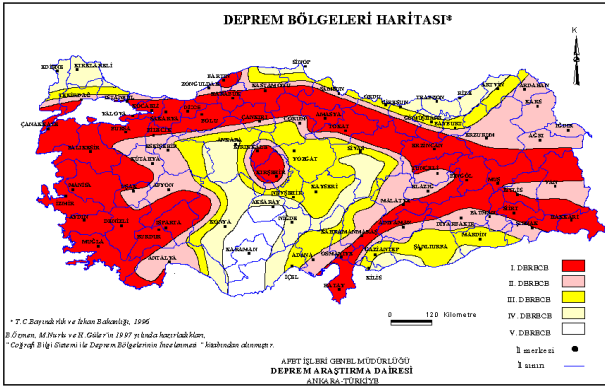
* İletişim yazarı / Corresponding author: fatmademir.fd11@gmail.com, +90-246-211-0833

Revizyon Tarihi / Revision Date	23.10.2017
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.12.2017
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2017

1. Giriş

Çevreye olan uyumu, kullanım hızı, ekonomik ve güvenli olması bakımından günümüzde çok önemli bir sistem haline gelen demiryolu taşımacılığının güvenli bir şekilde işleyebilmesini sağlayabilmek için düzenli bakım ve onarımları zamanında yapmak büyük kazalara sebep olacak ray geometrisinin bozulması gibi deformasyonların önüne geçecektir. Demiryolu hatlarında karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi de üstyapı deformasyonudur. Bu deformasyonlara neden olan etkenlerden biri de depremlerdir.

Yurdumuz, dünyanın en etkili deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Geçmişte yurdumuzda birçok yıkıcı deprem olmuştur. Gelecekte de deprem gerçeği ile iç içe yaşayacağımız gayet iyi bilinmelidir. Coğrafi konumu, jeolojik ve topoğrafik yapısı incelendiğinde; ülkemiz topraklarının %92'sinin deprem bölgeleri içinde olduğu bilinmektedir (Şekil 1). Bu nedenle ülkemizdeki demiryollarının depremden etkilenme olasılığı çok yüksektir. Dolayısıyla demiryolları için deprem faktörü büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1. Deprem bölgeleri haritası (Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2017)

Hareket halinde olan trenlerin güvenliği önemlidir. Özellikle de yolcu trenlerinin deprem anında yavaşlatılması ya da durdurulması yolcuların can güvenliği açısından gereklidir. Belirli bir hızla hareket eden trenlerin deprem anında raydan çıkması halinde çok büyük kazalar meydana gelebilir. Bunun sonucunda can kayıpları ve ağır yaralanmalar olmakta, ülke ekonomisi büyük zarara uğramaktadır.

Trenlerin raydan çıkmalarının temel nedeni demiryolu hat geometrisinin bozulmasıdır. Hat geometrisinin bozulmasının birçok nedeni vardır. Bunlardan biri de deprem olarak bildiğimiz yer hareketleridir. Yağmur gibi, rüzgar gibi doğal bir olay olan depremler esnasında, demiryolu trafiğini

durdurmak ve güvenli bir hıza düşürmek, olası ray, köprü ve viyadük deformasyonlarını en aza indirerek demiryollarında güvenliği sağlamaktadır.

Demiryollarında karşılaşılan önemli sorunlardan biri de üstyapı deformasyonudur. Deformasyon sonucu derayman gibi kötü sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Ülkemizin büyük bir kısmı birinci derece deprem kuşağı içindedir. Çalışma kapsamında örnek bir Yüksek Hızlı Tren (YHT) hattı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş ve deprem etkisi altında üstyapıda meydana gelen değişimler gözlemlenmiştir.

2. Deprem ve Demiryolu

Deprem etkisi, demiryolu üstyapısı için yeterince araştırılmış bir konu değildir. Özellikle ülkemizde son dönemde demiryoluna yapılan yatırımlar depreme karşı daha dikkatli olmamız gerektiğini göstermektedir. Bu önemli projeleri korumak ve deprem anında nasıl davranış göstereceğini tespit etmek ülkemiz için hem maddi hem de manevi bir fayda sağlayacaktır. Literatürde görülen yetersizlik bu çalışmayı daha da anlamlı kılmaktadır.

Özellikle Uzakdoğu ülkelerinde depreme önlem olarak erken uyarı sistemleri geliştirmişlerdir. Raylı sistemler için oldukça kullanışlı olan bu sistem, Büyük Japonya Depremi sırasında faydalı olmuştur.

11 Mart 2011 Japonya Depremi sırasında Tohoku Shinkansen sisteminde kurulmuş deniz kıyısındaki 9 sismometre ile raylarda kurulu olan 44 sensör ilk titreşimleri algılayarak otomatik olarak enerjiyi kesmiş ve güvenlik frenleri devreye girmiştir. Böylelikle deprem sırasında çalışır durumda olan 24 tren raylardan çıkmadan durdurulmuştur. Ayrıca trenler tünellerde ve köprülerde büyük bir hasara uğramamış ve faaliyetlerini hızlı bir şekilde yerine getirebilmişlerdir.

Deprem dalgaları fay çatlağının olduğu yerden yayılmaktadır. P dalgası ve S dalgası olmak üzere iki çeşit deprem dalgası vardır. P dalgaları S dalgalarından daha hızlı hareket etmektedirler. Erken uyarı sistemleri depremi tespit etmek, sarsıntıların büyüklüğünü ve gücünü tahmin etmek için P dalgalarını kullanırlar ve gerekli durumda trenlere acil dur sinyali gönderirler (Takagi, 2012).

Depremde erken uyarı sistemi depremi algılamış S dalgası kıyıya ulaşmadan önce merkez üssüne yakın bölgelerde uyarı verilmiş ve pek çok kişinin kendisini korumasına olanak sağlamıştır. Bu açıdan sistem başarılı bir şekilde çalışmıştır (Yenilmez, 2011).

Japonya'da 11 Mart 2011'de meydana gelen deprem ve tsunami istasyonlara, demiryolu hatlarına, lokomotif ve vagonlara çok fazla zarar vermiştir. Japonya'nın kuzeydoğusundaki birçok elektrik üretim santrali büyük oranda hasar görmüştür. Sonrasında tren seferleri için gerekli olan elektrik güç kaynağında ciddi bir kesinti meydana gelmiştir (Samuel, 2011).

11 Mart 2011 tarihindeki Büyük Doğu Japonya Depreminde, demiryolu hat geometrisi bazı yerlerde bozulmuş, birçok elektrik direği kırılmış ya da devrilmiştir (Fischer, 2011).

Genel olarak demiryolu hat hasarları, toprak kayması, kaya düşmesi, sıvılaşma gibi kalıcı yer hareketlerinden dolayı oluşmaktadır. Böyle kalıcı yer hareketleri depremlerin dörtte üçünde meydana gelmektedir. 1999 Kocaeli Depremi'nde fay çatlakları, Haydarpaşa-Ankara demiryolu hattını üç yerde kesmiştir (Byers, 2008). (Şekil 2)



Şekil 2. 1999 Kocaeli Depremi'nde hasar gören demiryolu üstyapısı

3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislikte problemlerin çözümü analitik ya da sayısal yöntemlerle yapılmaktadır. Analitik çözümde, çözüm aralığı içerisinde herhangi bir noktada sonucu verebilen matematiksel ifadeler belirlenir. Pratikte karşılaşılan birçok problem için böyle bir analitik çözüm metodu mümkün olmamaktadır.

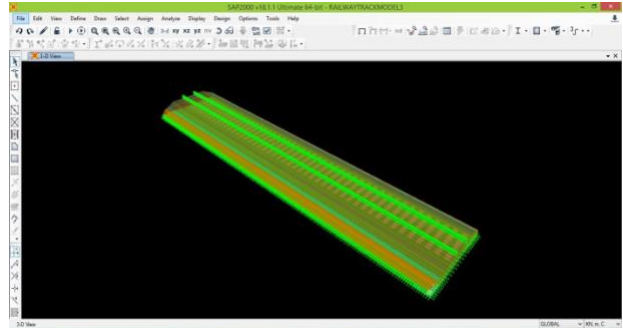
Sonlu eleman analizinde; öncelikle sonlu sayıda elemanlara ayırma ya da idealleştirme denilen işlem uygulanır. Yani sistem sonlu elemanlara bölünerek bir sonlu eleman ağı oluşturulur. Şekil fonksiyonları seçilir (Yapı problemleri için yer değiştirme olayını ifade eden fonksiyonun belirlenmesi). Eleman davranış matrisi (rijitlik) elde edilir. Tüm elemanların denklemleri bir araya getirilerek, sınır koşulları uygulanır. Tüm sistem çözülerek bilinmeyenler (Yer değiştirmeler) tespit edilir. Elde edilen bilinmeyenlerden hareketle diğer aranan büyüklükler (Gerilmeler vs.) hesaplanır.

4. Araştırma Bulguları

4.1. Demiryolu üstyapısının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi

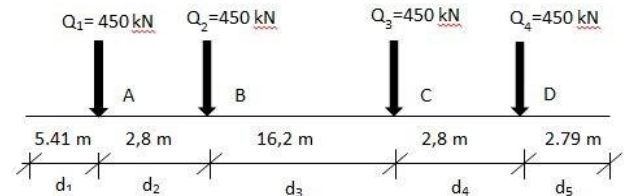
Çalışma kapsamında basit bir yük katarı etkisiyle şekil değiştiren balastlı üstyapıda tekerlek ve deprem yükleri altında meydana gelen çökme değerleri ve eğilme momentleri SAP2000 programı ile hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizi, daha karmaşık ve daha fazla zaman gerektirmesine karşın, gerçeğe daha yakın olduğu için analitik çözüme çok daha doğru sonuçlar vermektedir.

Raylar, çerçeve eleman olarak; travers, balast, alt balast ve zemin tabakası ise katı eleman olarak tanımlanmıştır ve demiryolu üstyapısına gelen yükü doğal zemine aktarmak için zemin tabakasının altına yay elemanlar tanımlanmıştır.



Şekil 3. Balastlı üstyapıya ait üç boyutlu model gösterimi

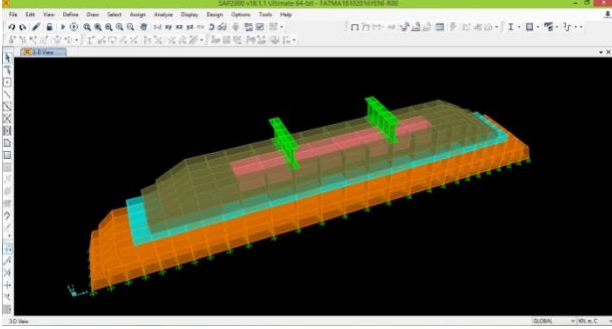
Şekil 3'de SAP2000 programında balastlı üstyapıya ait üç boyutlu model gösterilmiştir. Lokomotifin tekerlek yükleri tekil yük olarak alınmıştır. Sekiz adet tekerlek yükü altındaki balastlı demiryolu üstyapısı sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş, analiz sonucunda çökme değerleri ve momentler belirlenmiştir. Demiryolu üstyapısı tasarımında düşey yükler olarak zati yükler ve hareketli yükler, yatay yükler olarak ise deprem etkileri dikkate alınmıştır. Şekil 4'de basit bir lokomotif etkisiyle şekil değiştiren balastlı üstyapıya ait dingil yükleri verilmiştir.



Şekil 4. Balastlı üstyapıya ait dingil yükleri

Model kurulurken hesaplanmış demiryolu üstyapısı enkesit boyutları ve enkesite ait malzeme karakteristikleri programda tanımlanmış ardından demiryolu enkesiti farklı boyutlarda sonlu elemanlara bölünmüştür (Şekil 5). Modellenen demiryolu üstyapısında 20800 adet solid eleman, 400

frame eleman ve 27336 nokta bulunmaktadır. Demiryolu üstyapısı eleman sayısı, mevcut donanımın analiz yapabileceği maksimum ölçüye göre belirlenmiştir. Ayrıca enkesit, tekerlek yükünü zemine doğru biçimde aktarabilecek şekilde elemanlara bölünmüştür.



Şekil 5. Demiryolu üstyapısı için SAP2000 ile oluşturulmuş enkesit modeli

SAP2000 programında modellenen demiryolu üstyapısı yol uzunluğu $L = 3000$ cm, yolcu için seçilen HT65000 YHT setinin lokomotif uzunluğu 2740 cm, iki dingil arası mesafe 280 cm olarak belirlenmiştir. Enkesit genişliği $b = 700$ cm, balast tabaka kalınlığı 40 cm, alt balast tabaka kalınlığı 10 cm, zemin tabaka kalınlığı 50 cm olarak kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan lokomotif 4 adet dingile sahiptir. Dolayısıyla 8 adet tekerlek ray yüzeyine temas etmektedir. Raylı sistemlerde kullanılan maksimum dingil yükü 225 kN olmakla birlikte çalışmada raya etkiyen statik düşey tekerlek yükü $Q = 225$ kN, dolayısıyla dingil başına 450 kN olarak kabul edilmiştir. Demiryolu üstyapı tabakaları ile ilgili malzeme parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

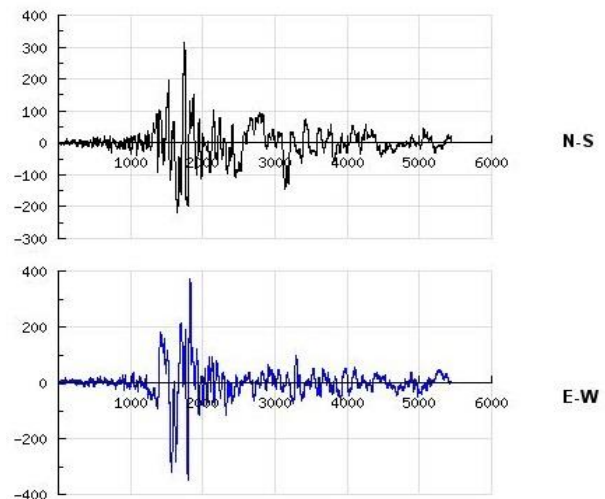
Tablo 1. Demiryolu üstyapısı tabakaları ile ilgili malzeme parametreleri

	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Poisson Oranı	Elastisite Modülü (kN/m^2)
Ray	77	0,3	$207 \cdot 10^6$
Travers	25	0,2	$37 \cdot 10^6$
Balast	30	0,35	$31 \cdot 10^4$
Subbalast	30	0,35	$31 \cdot 10^4$
Zemin (Z3-kum çakıl)	17	0,40	$55 \cdot 10^3$

Çalışmada kullanılan ray boyutları UIC 60 rayını temsilen hesap kolaylığı açısından ray kesiti, I profil olarak alınmıştır. Programın içinde var olan çelik eleman olarak tanımlanmıştır. Çalışmada B70 traversini temsilen, travers boyutları 280, 30, 25 cm olarak belirlenmiştir. Travers beton sınıfı C50 olan betonarme eleman olarak programda tanımlanmıştır. Modellemede travers aralığı 60 cm olarak belirlenmiştir.

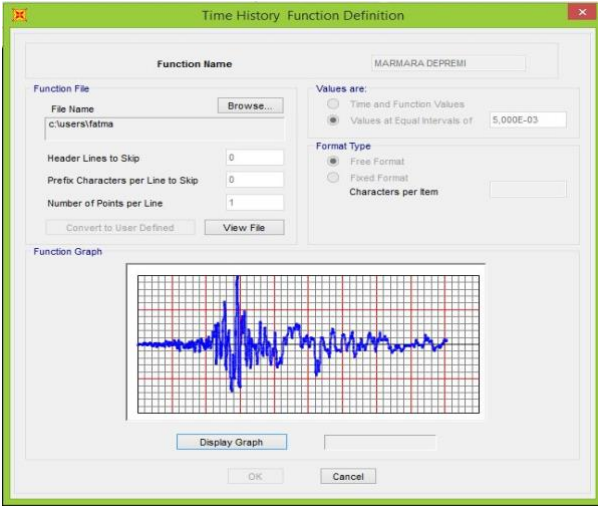
4.2. Zaman tanım alanında dinamik analiz

Bu analiz türü, demiryolu üstyapısının deprem yer hareketi altındaki hareket denkleminin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme bağıntıları kullanılarak zaman tanım alanında doğrudan entegrasyonuna karşılık gelmektedir. Zaman tanım alanında analiz için demiryolunun geçtiği yerin depremsellik ve zemin özelliklerini temsil eden gerçek veya benzeştirilmiş deprem kayıtlarının elde olması veya türetilmiş olması gereklidir. Çözümler kullanılan kaydın özelliklerine göre değişim göstereceğinden, bu tür analiz yaklaşımında birden fazla kaydın kullanılması ve elde edilen sonuçların bir istatistik süreçten geçirilmesi öngörülmektedir. Zaman tanım alanında dinamik analiz için çalışmada, 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi kaydı ve SAP2000 programı kütüphanesi içinde bulunan Array Deprem kaydı olmak üzere 2 adet deprem kaydı kullanılmıştır. İç kuvvetler ve şekil değiştirmeler elde edilirken bu 2 deprem kaydının sonuçlarından büyük olanı kullanılmıştır. Marmara Depremi kayıt sonuçları büyük olduğundan analizde bu deprem kaydı kullanılmıştır. Marmara Depremi ivme zaman kayıtları Şekil 6'da gösterilmiştir. N-S kuzey-güney (North-South) yönünü, E-W ise doğu-batı (East-West) yönünü göstermektedir.



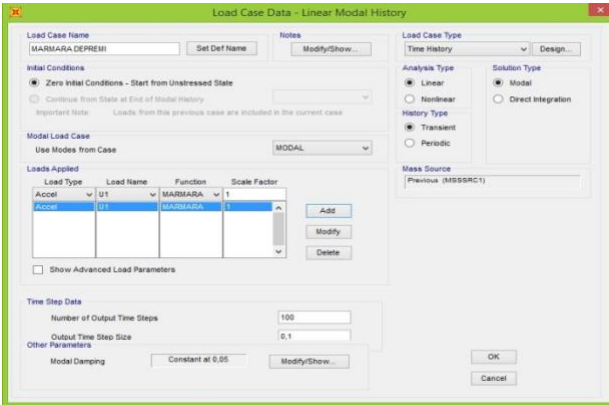
Şekil 6. Marmara Depremi ivme zaman kayıtları

Şekil 7'de Marmara Depremi'ne ait zaman tanım alanında dinamik analiz fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 7. Zaman tanım alanında dinamik analiz fonksiyonu

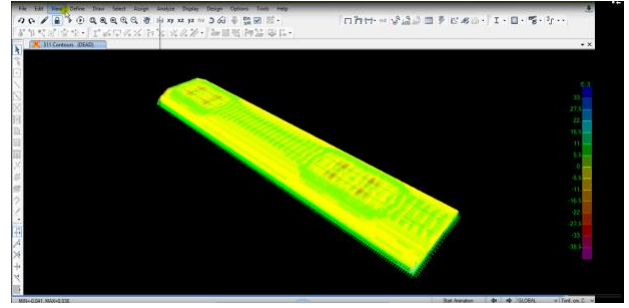
Zaman tanım alanında dinamik analiz fonksiyonunda ivme grafiğine bakarak pik noktalar seçilir. Bu değerler en büyük yer ivmesi değerleridir. Seçilmiş olan Marmara depremi için en büyük yer ivmesi değerleri 3,113 m/s² ile 3,656 m/s² arasında değişmektedir.



Şekil 8. Zaman tanım alanında analiz için yük tanımları

Şekil 8'de Marmara Depremi için zaman tanım alanında dinamik analiz için deprem yükü tanımlanmıştır.

Analiz sonucunda; tekerlerin temas ettiği noktalarda düşey yük gerilmeleri ve deprem etkisi sonucu basınç oluşurken, balast tabakası yana doğru şişmektedir. Gerilmeler temel tabakasına inmemekte, balast ve subbalast tabakasında sönümlenmektedir (Şekil 9). Ray yüzeyinde A, B, C ve D noktalarında çökme değeri 0,73 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 9. Deprem etkisi sonucu demiryolu üstyapısının durumu

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonucunda, düşey doğrultudaki çökme (deformasyon) değeri $y = 0,7309 \cong 0,73$ mm, yatay doğrultudaki deformasyon değeri $x = 0,0261 \cong 0,03$ mm ve eğilme momenti değeri 2190 N.m olarak bulunmuştur. Deprem etkisi sonucu oluşan yatay deformasyon miktarı oldukça küçük bir değerdir ve demiryolu üstyapısı açısından tehlike arz etmemektedir.

5. Sonuç ve Tartışma

Demiryolu üstyapısının dinamik davranışı tamamen çözümlenmiş değildir ve araştırılması gereken birçok konu vardır. Ülkemizde demiryolu üstyapısının deprem etkisi altındaki davranışı konusunda yeterli bilgiye sahip değiliz. Demiryolu üstyapısı hesaplanırken yapılan dinamik analize göre tasarım, deprem etkisini azaltmaya yardımcı olacaktır. Buna ek olarak, demiryolu üstyapısı için eksik yapılan tasarım sonucunda, yanlış eleman ve tabaka kalınlığı seçimi ile daha sonra oluşacak bakım onarım masrafları da yükselecektir.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında demiryolu üstyapısı elastik zemine oturan sürekli kiriş olarak modellenmiştir. Ancak bu gerçeği yansıtmamaktadır. Bu çalışma kapsamında demiryolu üstyapısı gerçeğe uygun modellenmiş ve deprem etkisi altında davranışı incelenerek değerlendirilmiştir. Çalışmada balastlı demiryolu üstyapı elemanları modellenmiş, modellenen balastlı demiryolu üstyapı kesimine dinamik analiz uygulanmış ve üstyapının sonlu elemanlar yöntemine göre dinamik etkileri, düşey ve yatay ray deformasyonları, ray eğilme momentleri araştırılmıştır.

Analiz sonucunda tekerlerin temas ettiği noktalarda basınç oluşurken, balast tabakası yana doğru şişmektedir. Düşey gerilmeler temel tabakasına inmemekte, balast ve subbalast tabakasında sönümlenmektedir. Yapılan analiz sonucunda, düşey doğrultudaki çökme (deformasyon) değeri $y = 0,7309 \cong 0,73$ mm, yatay doğrultudaki deformasyon değeri $x = 0,0261 \cong 0,03$ mm ve eğilme momenti değeri 2190 Nm olarak bulunmuştur.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı,
Erişim Tarihi: 20.10.2017.
<http://www.deprem.gov.tr/tr/kategori/deprem-bolgeleri-haritasi-28841>

Byers, W. G., 2008. Impacts of a M7.8 Southern San Andreas Earthquake on the Railway Network. The ShakeOut Scenario, Canada.

Fischer, E., 2011. How Japan's Rail Network Survived The Earthquake. Erişim Tarihi: 30.11.2016.
<http://www.railway-technology.com/features/feature122751/>

Samuel, A., 2011. East Japan Railway Company Reports Enormous Losses Following Earthquake. Erişim Tarihi: 03.12.2016.
<https://www.globalrailnews.com/2011/03/16/east-japan-railway-company-reports-enormous-losses-following-earthquake/>

Takagi, R., 2012. The 2011 Tohoku Earthquake and Japanese Railways: An Overview.

Yenilmez, G., 2011. Japonya' daki Deprem ve Tsunami Erken Uyarı Sistemleri ve 11 Mart 2011 "Büyük Doğu Japonya Afeti"ndeki Performansları. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim, Ankara, 1-9.