

## SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANARAK DEMİRYOLU BOJİLERİNİN TİTREŞİM ANALİZİ

Mustafa EROĞLU<sup>1</sup> İsmail ESEN<sup>2</sup> Mehmet Akif KOÇ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78100, Karabük, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, TÜRKİYE

mustafaeroglu@sakarya.edu.tr

**Özet-** Demiryolu araçlarında vagon titreşimleri önemli parametredir. Vagon titreşimleri direkt olarak yolcu konforunu etkiler. Bundan dolayı demiryolu araçlarında farklı bojiler kullanılır. Bojiler içerisinde vagon titreşimlerini etkileyen sönüm ve yay elemanı bulundurulur. Bu çalışmada trenin gerçek parametreleri alınmıştır ve sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları ve elde edilen titreşimler karşılaştırılmalı olarak grafiklerle verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler-** Titreşim, Boji, Ansys, FEM

## VIBRATION ANALYSIS OF RAILWAY BOGIES USING FINITE ELEMENT METHOD

**Abstract-** Wagon vibrations in railway vehicles are an important parameter. Wagon vibrations affect passenger comfort directly. Therefore, different bogies are used for railway vehicles. The rail system bogies include spring and damping elements which significantly affect the wagon vibrations. In this study, bogies used in railway were modelled and analyzed using a finite element method considering the real parameter of the vehicle and the different speed of vehicle. The results of the study were interpreted by finding the vibration values of the bogies.

**Key Words-** Vibration, Bogie, Ansys, Finite Element Analysis

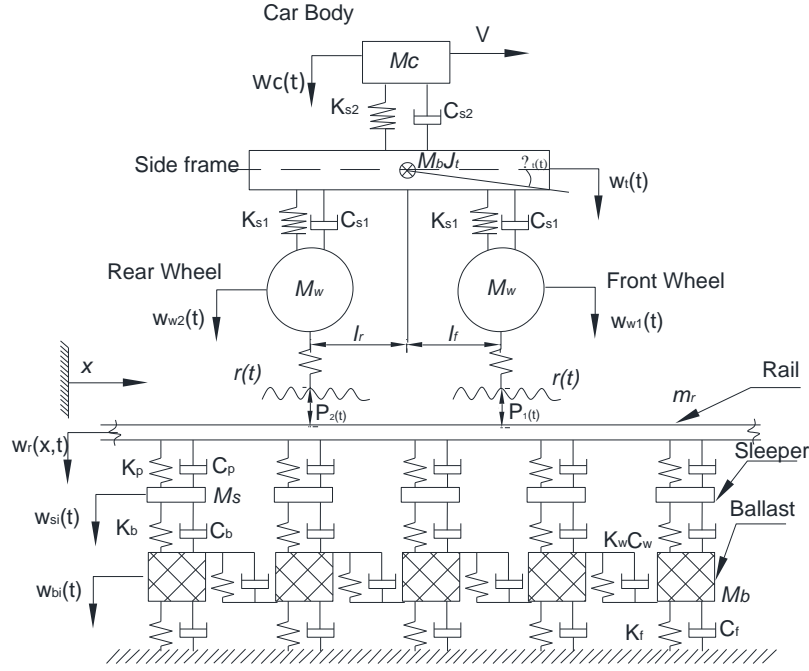
### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Demiryolu araçların da artan hız ve taşınan yük miktarı raylı sistem mühendisliği açısından önemlidir. Artan yük ve hız değerleri trenin dinamik davranışını etkilemektedir. Bunların yanında bir diğer önemli durum ise demiryolu aracının titreşimleridir. Raylı araç hareket ettikçe oluşan bozucu etkiler demiryolu aracını titreşime sevketmektedir. Bunlar ray teker etkileşimi sonucunda oluşan bozucu etkiler olabilir ray yüzeyinin düzgünsüzlüğü veya teker yüzeyindeki düzlükler en basit bozucu etkilerin başında gelmektedir. Titreşimlerin en büyük olumsuz etkisi yolcu konforunun azalması ve raylı aracın sürüş güvenliğinin tehlikeye girmesidir.. Bunun için raylı aracın titreşimlerini sönümleyebilmek için bazı iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir.

Demiryolu aracı teker, aks, vagon gibi birkaç önemli parçadan oluşmaktadır. Burada vagon ile tekerlekler arasındaki bağlantıyı yapan eleman ise bojidir. Demiryolu aracında ihtiyaca göre farklı bojiler üretilip kullanılmaktadır. Yolcu taşımakta kullanılan ve yük veya eşya taşımakta kullanılan bojiler birbirinden farklıdır. Yük ve eşya taşımada vagon titreşimleri yolcu taşımada vagonun ki vagon titreşimleri kadar önem arz etmemektedir. Yolcu bojilerinin yük bojilerine göre önemli farkı fazladan bir süspansiyon sisteminin bulunmasıdır. Yük bojilerinde sadece boji kısmında süspansiyon sistemi bulunurken yolcu bojilerinde hem boji de hemde boji ile teker arasında süspansiyon sistemi bulunmaktadır. Yolcu bojilerinde hareket sırasında raydan gelen bozucu etki bojiye iletilmeden önce bir miktar sönümlenmektedir. Raylı araç titreşimleri iyileştirilmesi gereken bir durumdur. Bu konuda literatürde çalışılmış birkaç çalışma bulunmaktadır. Demiryolu aracının titreşimlerini belirlemek için gerçek modelin belirli ölçülerde küçük modelini yaparak test ünitesi oluşturulmuş ve ivmelenme değerleri belirlenmiştir [2]. Aynı zamanda test ünitesi yapmadan sadece bilgisayar analizleri de mevcuttur. Raylı aracın bilgisayar ortamında katı modeli oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar yöntemi ile raylı araca ait parçaların ivmelenme değerleri bulunmuştur [1,3,4].

## **2. MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMİ (MODELING AND ANALYSIS METHOD)**

Bu çalışmada raylı aracı temsil eden matematik model şekil 1'deki gibidir. Burada raylı aracın tüm parçaları görülmektedir. Sırasıyla en üstten  $M_c$  kütlesi raylı aracın vagonunu  $M_b$  bojiyi,  $M_w$  tekerlekleri  $M_r$  ve  $M_s$  demiryolu hattında bulunan ray ve traversi temsil etmektedir. Bu kütlelerinin birbirleri arasında yay ve sönüm elemanı bulunmaktadır. Vagon ile boji arasında bulunan ikincil süspansiyon sistemi olarak adlandırılırken boji ile tekerlekler arasında bulunan birincil sönüm elemanı olarak adlandırılmaktadır. Bu sönüm sistemlerinde  $K_{s2}$  ikincil süspansiyon sisteminin rijitlik katsayısı  $C_{s2}$  ise ikincil süspansiyon sönüm katsayısıdır. Benzer şekilde  $K_{s1}$  ve  $C_{s1}$  de birincil süspansiyon sisteminin rijitlik ve sönüm katsayılarıdır. Ayrıca ray ve teker arasında tekerden gelen kuvvetleri sönümleyecek elastic ped bulunmaktadır. Bu elastik pedi rijitlik ve sönüm katsayısı  $K_p$  ve  $C_p$  dir. Demiryolu hattında en altta bulunan eleman ise balasttır balast araçtan gelen ani kuvvetleri titreşimleri geniş alana yayarak azaltır. Balastın rijitlik ve sönüm katsayısı ise  $K_b$  ve  $C_b$  dir.



Şekil 1. Raylı aracın matematik modeli (Mathematical model of railway vehicle)

Daha önceden belirtildiği gibi yolcu bojisinde her iki süspansiyon sistemi bulunurken yük bojisinde sadece ikincil süspansiyon sistemi bulunur. Yük ve yolcu bojisi örneği şekil 2’de gibi görülmektedir.



Şekil 2. Yük bojisi (soldaki) ve yolcu bojisi (sağdaki) (Freight bogie (left) and passenger bogie (right))

Şekil 1’deki matematik modeldeki sistemi vagonun dikey hareketi, bojinin dikey ve dönme hareketi ve her iki tekerin dikey hareketi olmak üzere 5 serbestlik dereceli olarak hareket denklemlerini çıkartırsak eğer vagona, bojiye ve tekerleklere ait hareket denklemlerini aşağıdaki gibi buluruz.

Vagonun dikey hareketi

$$M_c \ddot{w}_c + C_{s2} \dot{w}_c + K_{s2} w_c - C_{s2} \dot{w}_s - K_{s2} w_s = 0 \quad (1)$$

Bojinin dikey hareketi

$$M_t \ddot{w}_t + K_{s1}(w_t + l_f \psi_t - w_{w1}) + K_{s1}(w_t - l_f \psi_t - w_{w2}) + K_{s2}(w_t - w_c) + C_{s1}(\dot{w}_t + l_f \dot{\psi}_t - \dot{w}_{w1}) + C_{s1}(\dot{w}_t - l_f \dot{\psi}_t - \dot{w}_{w2}) + C_{s2}(\dot{w}_t - \dot{w}_c) = 0 \quad (2)$$

Ön tekerin dikey hareketi

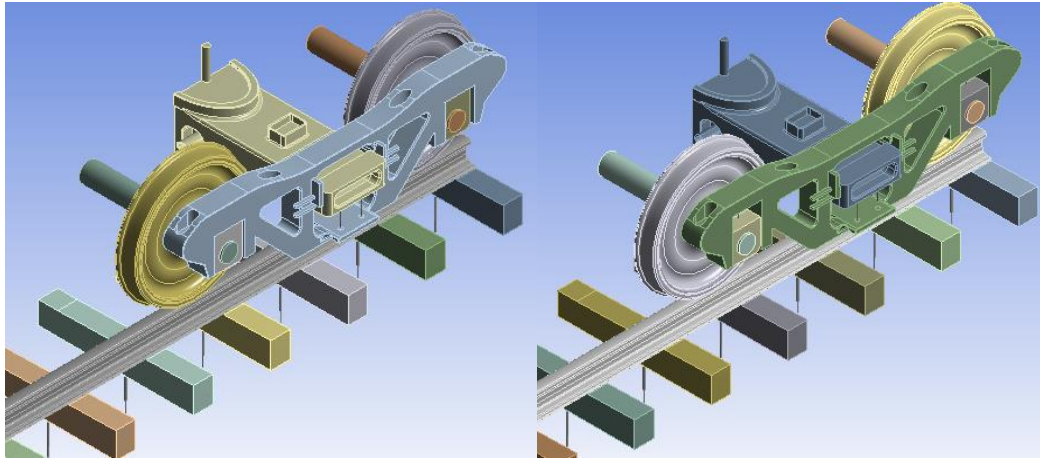
$$M_w \ddot{w}_{w1} + C_{s1}(\dot{w}_{w1} - \dot{w}_t) + K_{s1}(w_{w1} - w_t) + C_{s1} l_f \dot{\psi}_t - K_{s1} l_f \psi_t + P_1(t) = 0 \quad (3)$$

Arka tekerin dikey hareketi

$$M_w \ddot{w}_{w2} + C_{s1}(\dot{w}_{w2} - \dot{w}_t) + K_{s1}(w_{w2} - w_t) + C_{s1} l_f \dot{\psi}_t - K_{s1} l_f \psi_t + P_2(t) = 0 \quad (4)$$

## 2.1. Ansys Modeli (Ansys Model)

Bu çalışmada yolcu ve yük bojisi ayrı ayrı modellenip ansys ortamında analiz edilmiştir. Analizde UIC60 ray modeli UIC515 teker modeli kullanılmıştır. Tren hızı saatte yaklaşık 96 km olarak şekilde ayarlanmıştır. Analiz kolaylığı açısından modelin simetrisi alınarak yarım model olarak analiz edilmiştir. Bu durumda yarım modele uygulanan vagon yükü yaklaşık 10 ton alınmıştır. Tekere verilen dönme hareketi ile yaklaşık 720 mm hareket etmesi sağlanmıştır. Bu durumda zaman adımı çok kısa olacak şekilde 0,027 sn alınmıştır.



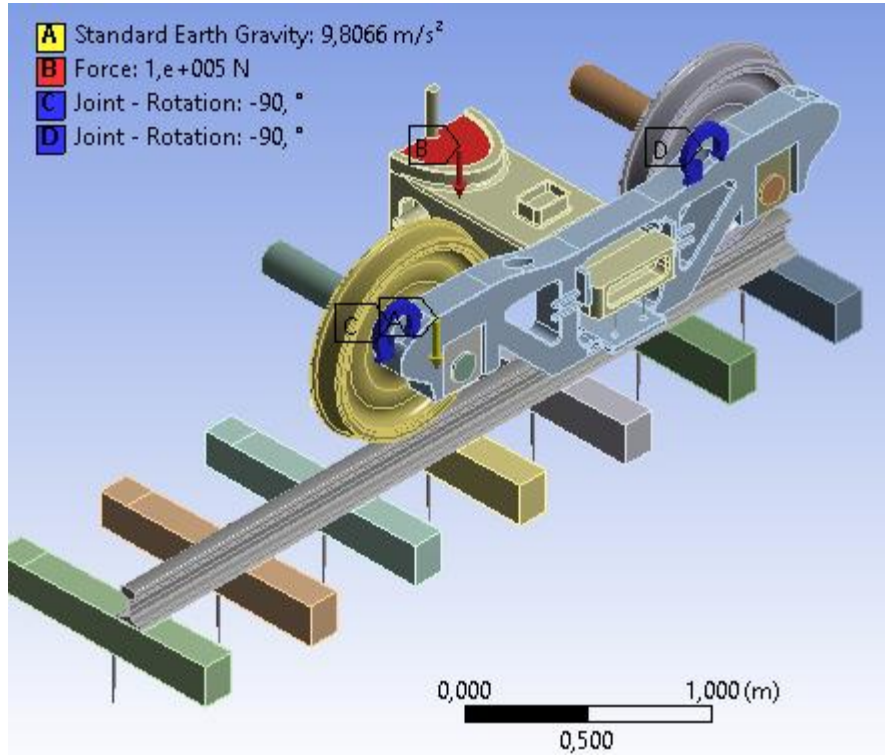
Şekil 3. Yük bojisi modeli (soldaki) ve yolcu bojisi modeli (sağdaki) (Freight bogie model (left) and passenger bogie model (right))

Şekil 3'te ansys modeli gösterilmiştir. Burada her iki model birbirine oldukça benzemektedir fakat yolcu bojisinde aks ile bojinin bağlanma yerinde süspansiyon sistemi mevcuttur. Ayrıca birincil ve ikincil süspansiyon sistemi dışında ray ile travers arasında elastik pedin rijitlik ve sönüm katsayısı bulunmaktadır. Traversin altında ise balast bulunmaktadır fakat buradaki modelde balastı temsil eden yay ve sönüm elemanı bulunmaktadır. Modelde kullanılan yay ve sönüm değerleri ise tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Yay ve sönüm değerleri (Values of stiffness coefficient and damping ratio)

Parametre	Değer
Birincil süspansiyon rijitlik katsayısı	530 kN/m
Birincil süspansiyon sönüm katsayısı	90.2 kNs/m
İkincil Süspansiyon Rijitlik Katsayısı	1180 kN/m
İkincil Süspansiyon Sönüm Katsayısı	39.2 kNs/m
Elastik Pedin Rijitlik Katsayısı	520 MN/m
Elastik Pedin Sönüm Katsayısı	7 kNs/m
Balastın Rijitlik Katsayısı	65 MN/m
Balastın Sönüm Katsayısı	32 kNs/m

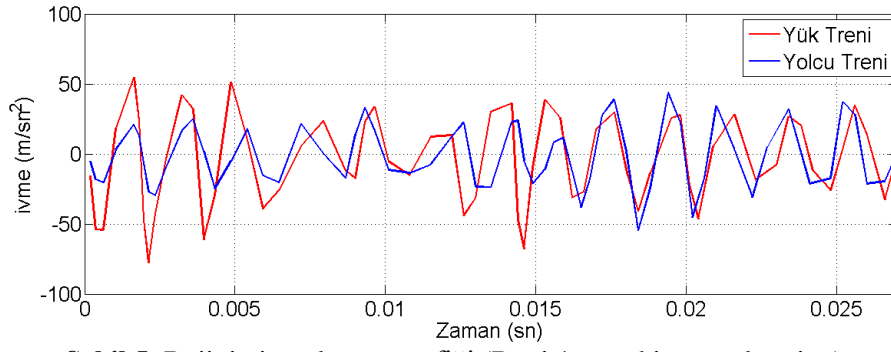
Sınır şartlarında ise aks ve tekerin 2 öteleme 1 dönme hareketi yapabilmesi için planar joint eklenmemiştir. Ray ve teker arasında sürtünme katsayısının 0.3 olduğu sürtülmeli bir contact bulunmaktadır. Aks ile teker birbirine bonded contact ile bağlı olup bağımsız hareket edemezler. Aks ile kuvvetin uygulandığı parça arasında sürtünmesiz contact kullanılmıştır.



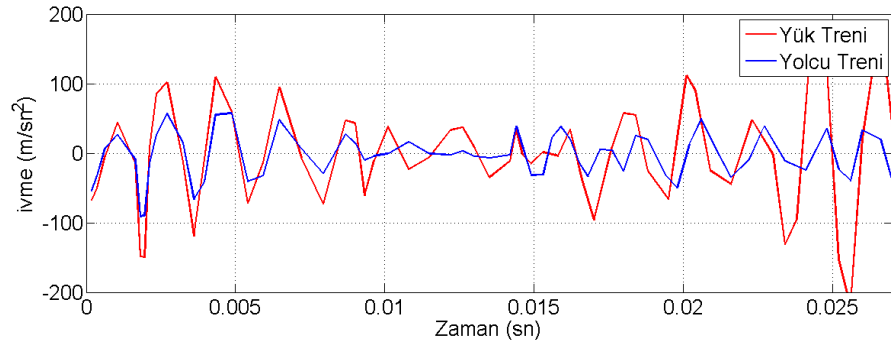
**Şekil 4.** Ansys modelinin sınır şartları (Boundary conditions of ansys model)

### 3. SONUÇLAR (RESULTS)

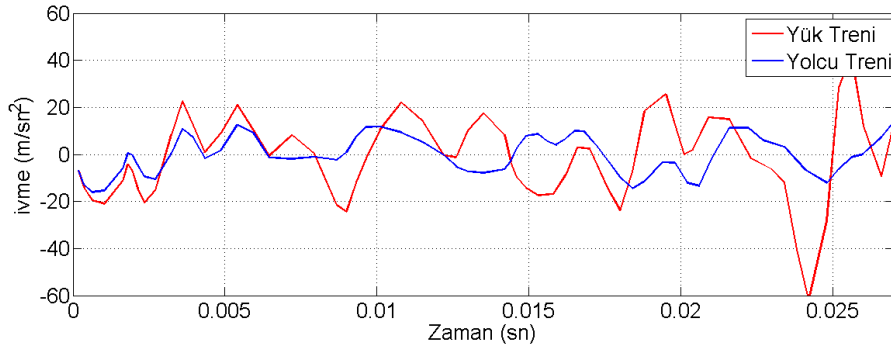
Bu çalışmada demiryolu araçlarında kullanılan farklı iki bojinin raylı araç titreşimlerine etkisi incelenmiştir. Her iki boji de ansys ortamında modellenerek analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar grafiklerle verilmiştir.



Şekil 5. Bojinin ivmelenme grafiği (Bogie's graphics acceleration)



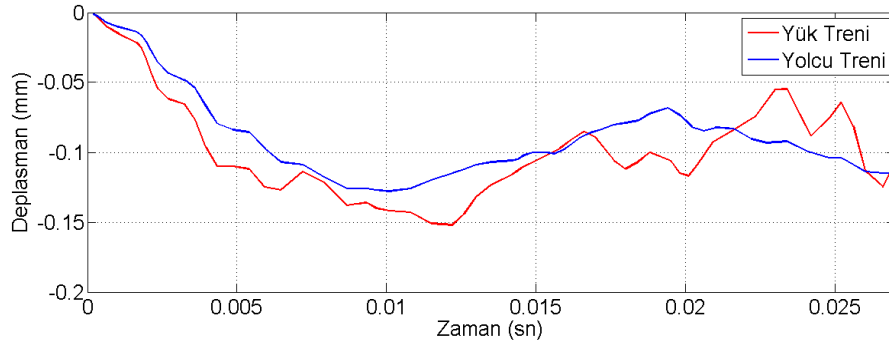
Şekil 6. Rayın ivmelenme grafiği (Rail's graphics acceleration)



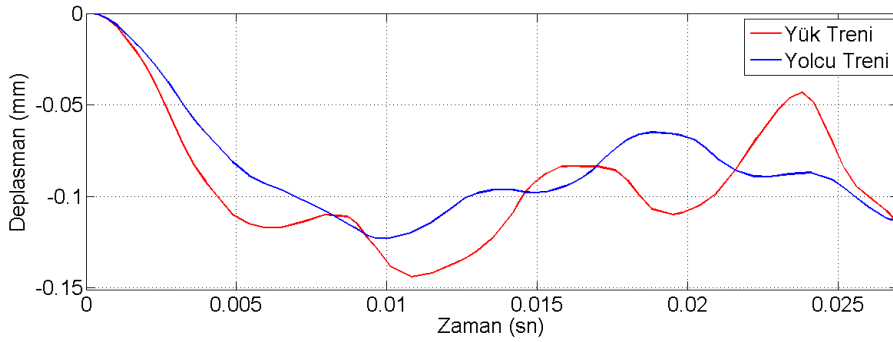
Şekil 7. Traversin ivmelenme grafiği (Traverse's graphics acceleration)

Şekil 5, 6 ve 7'de raylı aracın boji, ray ve traversin ivmelenme grafikleri verilmiştir. Tüm grafikler dikkatle incelenirse eğer yolcu bojisi bulunan modelin ivmelenme değeri yük bojisi olana nazaran daha az çıkmıştır. Daha önceden de belirtildiği üzere yolcu bojisinde fazladan süspansiyon sistemi olması ivmelenme değerlerini bir miktar sönümlenmektedir.

Şekil 5'te boji ivmelenme değerleri incelenirse yolcu ivmelenme değerleri yük bojisinin ivmelenme değerlerinden bir miktar düşük çıkmıştır. Yolcu bojisinin ivme değeri yaklaşık  $20 \text{ m/sn}^2$  iken yük bojisinin ivme değerleri yaklaşık  $25\text{-}30 \text{ m/sn}^2$  olmaktadır. Şekil 6'da rayın ivmelenme grafiği bulunmaktadır burada da yük treninde rayın ivmelenme değerleri yaklaşık  $-100$  ile  $100 \text{ m/sn}^2$  arasında olurken yolcu treninde rayın ivmelenme değerleri  $-50$  ile  $50 \text{ m/sn}^2$  arası olmaktadır. Şekil 7'de ise traverse ait ivmelenme grafiği mevcuttur. Burda da yük treninin de traversin ivmelenme değerleri  $-20$  ile  $20 \text{ m/sn}^2$  arasında olmakta iken yolcu treninde traversin ivmelenme değeri  $-10$  ile  $10 \text{ m/sn}^2$  arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Rayın deplasmanı (Displacement of rail)



Şekil 9. Traversin deplasmanı (Displacement of traverse)

Şekil 8 ve şekil 9’da her iki boji modeline ait rayın ve traversin deplasman miktarı verilmiştir. Ray ve traversin çökmeleri hemen hemen birbirine yakın değerlerdir. Demiryolu hattında travers yaklaşık 0.10-0.12 mm aşağıya çöktüğü görülmektedir. Benzer şekilde ray ise 0.13-0.15 mm çökmeye maruz kalmıştır.

Analiz sonucunda bulunan ivmelenme değerleri ve deplasman değerlerini raylı aracın dinamik davranışının nasıl etkilediği görülmüştür. Sonuçlarda da anlaşılacağı gibi yolcu trenlerinde eklenen fazladan süspansiyon elemanının ivmelenme ve deplasman değerlerini etkilediği görülmektedir. Yolcu bojilerinin yük bojilerine göre üstünlüğü daha az ivmelenme değerleri oluşturarak yolcu konforunu artırmaktadır. Ayrıca ray ve teker arasındaki oluşan dinamik kuvvetlerin demiryolu hattına vereceği zararı azaltmaktadır.

## 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Esen, İ., and Eroğlu, M., (2016). Balast sertliğinin raylı sistem dinamiğine etkisinin incelenmesi, 3. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE’16), Karabük.
- [2] Mızrak, C., and Esen, İ., (2013). 1/5 ölçekli boji dinamik test ünitesi ile farklı ivmelenme değerlerinde düşey titreşim analizi, 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE’13), Karabük.
- [3] Koç, M.A., Esen, İ., Eroğlu, M., and Çay, Y., (2017). The numerical simulation of the fatigue analysis of UIC60 and 49E1 rails for high speed moving trains, 3<sup>rd</sup> International Iron & Steel Symposium (UDCS), Karabük.
- [4] Esen, İ., and Eroğlu, M., (2015). Dynamic analysis of wheel/rail interaction using finite element method, 2<sup>nd</sup> International Iron and Steel Symposium (IISS’15), Karabük.
- [5] Wu, T.X., and Thopson, D.J., (2001). Vibration analysis of railway track with multiple wheel on the rail, *Journal of Sound and Vibration*, 239(1), 69-97.
- [6] Wu, T.X., (2008). On the railway track dynamics with rail vibration absorber for noise reduction, *Journal of Sound and Vibration*, 309, 739-755.

- [7] Gong, D., Sun, W., Zhou, J., and Xie, X., (2011). Analysis on the vertical coupled vibration between bogies and metro car body, *Procedia Engineering*, 16, 825-831.
- [8] Young, T.H., and Li, C.Y., (2003). Vertical vibration analysis of vehicle/imperfect track system, *Vehicle System Dynamics*, 40:5, 329-349.