İSTANBUL ŞEHİR İÇİ ULAŞIMINDA KULLANILAN BİR RAYLI TAŞITA AİT BOJİNİN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Muzaffer METİN [*], Fatih DUMAN[**], Gökhan KESKİN[*],
Ahmet ÖZER[**], Rahmi GÜÇLÜ[*], Kazım CAN[**]

(*)Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Beşiktaş 34349, İSTANBUL

(**)İstanbul Ulaşım A.Ş., Ferhat Paşa Metro Tesisleri, Esenler 34220, İSTANBUL
mmetin@yildiz.edu.tr, fduman@istanbul-ulasim.com.tr, gkhnkskn@gmail.com, ozer@istanbul-ulasim.com.tr, guclu@yildiz.edu.tr, can@istanbul-ulasim.com.tr

ÖZET

Bu çalışmada, İstanbul şehir içi ulaşımında kullanılan bir raylı taşıta ait bojinin bilgisayar ortamında dinamik benzetiminin yapılması, düşey ve yatay yol düzensizliklerinin raylı taşıt bojisi ve tekerlek setleri üzerindeki etkilerinin farklı koşullar altında araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda MATLAB ve ADAMS programları kullanılarak iki farklı boji modeli oluşturulmuştur. Boji iskeleti ve tekerlek setlerine ait yer değişimi ve ivmelenmeler, değişik bozucu girişlerin etkisi altında iki farklı programda zaman ve frekans alanında incelenerek alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Raylı taşıt, boji modellemesi, dinamik benzetim.

AN ANALYSIS ABOUT DYNAMIC BEHAVIOUR OF A RAIL VEHICLE BOGIE USED IN ISTANBUL INNER CITY TRANSPORTATION

ABSTRACT

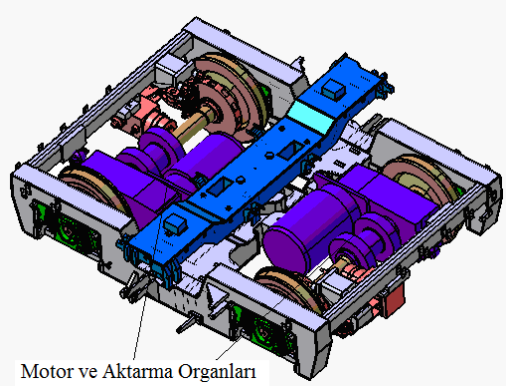
The purpose of this study to model of a rail vehicle bogie used in Istanbul urban city transportation and to analyze dynamic behaviour of rail vehicle bogie and wheelsets under different vertical and lateral rail irregularities. For this aim, MATLAB and ADAMS softwares were used to model of rail vehicle bogie. Displacaments and accelerations of bogie frame and wheelsets were compared in time and frequency domains using both softwares.

Keywords: Rail vehicle, bogie model, dynamic analysis.

1. GİRİŞ

Raylı sistemler gibi kılavuzlanmış bir yola sahip sistemler, sürüş performansı ve yolcu konforunu önemli ölçüde etkileyen titreşim hareketlerine neden olurlar. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte sürüş performansı ve yolcu konforundan beklenen seviye artış göstermiştir. Günümüzde bu gereksinimleri karşılamak amacıyla çeşitli bilgisayar programları geliştirilmiştir. Bilgisayar programları vasıtasıyla raylı taşıtlar gerçeğe uygun olarak dinamik benzetimler yapılabilmekte, çeşitli hız ve yol koşulları altında taşıt dinamiği incelenebilmektedir. Doğru analiz yapabilmek için doğru dinamik modelin kurulması gerekmektedir, bu nedenle iki farklı programda raylı taşıta ait boji modeli kurularak aynı şartlar altında yapılan benzetimler sonucu elde edilen cevaplar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada yolcu konforundan ziyade sürüş performansı üzerinde durulmuştur. Sürüş performansı ise daha çok boji dinamiğine bağlıdır. Bu amaçla, İstanbul şehir içi ulaşımında kullanılan bir raylı taşıta ait bojinin, ADAMS ve Matlab/Simulink programlarında ayrı ayrı modelleri oluşturulmuştur. Modellenen boji raylı taşıta ait motorlu bojidir. Motorlu bojiler hareket için gereken tahrikin verildiği bojilerdir (Şekil1). Taşıyıcı bojilerden ayrılan en önemli yanları elektrik motoru gibi

ekipmanları üzerlerinde barındırmalarıdır. Taşıyıcı bojiler ise, tahrikin olmadığı sadece taşıma görevi olan bojilerdir. Modeller, boji iskeleti, tekerler setleri (iki adet aks, 4 adet tekerlek), aks kutusu ve birincil süspansiyonlardan oluşmaktadır. Elektrik motorları, dişli kutuları ve kavramaların kütle ve atalet değerleri boji iskeletinin kütle ve ataletine eklenerek yekpare olarak modellenmiştir. ADAMS ve Matlab/Simulink programlarında oluşturulan modellerin analiz edilmesi sonucu bojiye ait düşey ve yanal titreşim cevapları zaman ve frekans alanında karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Motorlu boji

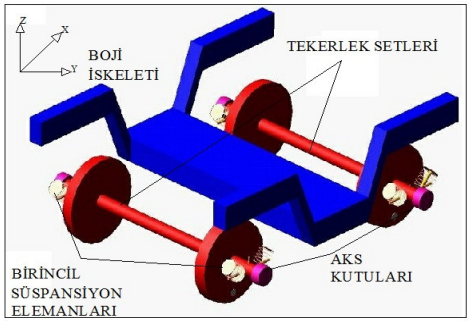
Raylı taşıtlarda önemli bir problemde tekerlek-ray etkileşimidir ve bu etkileşim doğrusal değildir. Bu etkileşim Hertz yayı benzetimi ile doğrusallaştırılmıştır. [1, 2]. Farklı bir uygulamada ise Dukkipati ve Dong tekerlek-ray etkileşimini çoklu yay benzetimi ile modellemişlerdir [3]. Güçlü, 8 serbestlik dereceli tam taşıt modeline ait dinamik davranışları, PID kontrolörlü aktif süspansiyon sistemine sahip yolcu koltuğu için incelemiştir [4]. Bir başka çalışmasında ise, aynı modelin bulanık mantık kontrolörlü aktif süspansiyon sistemine sahip yolcu koltuğunun dinamik davranışlarını incelemiştir [5]. Metin ve Güçlü, ondülasyonlu bir ray üzerinde hareket eden hızlı tren titreşimlerini bulanık mantık kontrolör (BMK) ile kontrol etmişlerdir [6]. 6 Serbestlik dereceli olarak modellenen bir raylı taşıta ait titreşimler ise Bulanık PID kontrolör tasarlanarak kontrol edilmiştir [7]. Bir başka çalışmalarında ise, 11 serbestlik dereceli yarım raylı taşıtın sinüzoidal bir yol bozukluğu etkisi altında oluşan titreşimleri BMK ve klasik PID kontrolör ile ayrı ayrı kontrol edilerek performansları karşılaştırılmıştır [8]. Metin, Güçlü ve Duman 5 serbestlik dereceli çeyrek raylı taşıtın ikincil süspansiyonuna PID ve parametre uyarlamalı PID tip kontrolörler uygulayarak performanslarını karşılaştırmıştır [9]. Güçlü ve Metin İstanbul şehir içi ulaşımında kullanılan bir hafif raylı taşıta ait titreşimleri bulanık mantık kontrolör ile kontrol etmiştir [10].

Bu çalışmada, bojiye ait düşey ve yatay yöndeki titreşimler incelenmiştir. Tekerlek-ray etkileşimi, hem düşey doğrultuda hem de yatay doğrultuda modellenmiştir. Benzetimler ise, düşey ve yatay yol düzensizlikleri etkisi altında gerçekleştirilmiştir.

2. BOJİNİN DİNAMİK MODELİ

Boji modeli 22 serbestlik dereceli olarak kurulmuştur ve Şekil 2'de görülmektedir. Dinamik benzetimde bozucu girişleri; ray düzensizlikleri, sistem çıkışlarını ise bojinin yatay ve düşey yönlerdeki yer değişimi ve ivme değerleri temsil etmektedir. Sistem cevapları; kütlelere, ataletlere, yay katılıklarına, sönüm değerlerine ve süspansiyonların geometrisine bağlıdır.

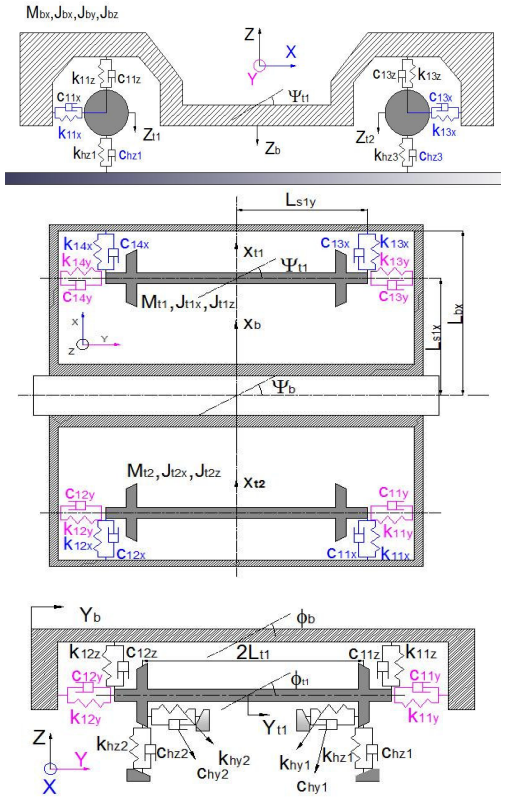
Boji dinamik benzetim modeli; boji kütlesi, bojiye ait üç eksendeki atalet momentleri, tekerlek seti kütleleri ve tekerlek setine ait üç eksendeki atalet momentleri, aks kutularının kütleleri ve üç eksendeki atalet momentlerini, birincil süspansiyona ait yay katılık değerleri ve sönüm elemanlarına ait sönüm değerlerini içermektedir. Bütün bu parametreler Ek'te verilmiştir.



Şekil 2. Bojinin ADAMS modeli

Şekil 2'de görüldüğü haliyle boji ADAMS programında 22 serbestlik dereceli olarak modellenmiştir. Şekil 3'te görülen Matlab/Simulink'te oluşturulan modelde ise aks kutularına ait kütle ve atalet değerleri tekerlek seti ile yekpare düşünüldüğü için model 16 serbestlik derecesine sahiptir. ADAMS programında aks kutusu, tekerlek

seti ile birincil süspansiyonların birbirine montajı için gerekli bir elemandır. Bu nedenle buradaki modelleme mantığına göre aks kutusu kullanmak gerekmektedir.



Şekil 3. Matematiksel model

Bu çalışmada bojinin *x* ekseni etrafında yalpa, *y* ekseni etrafında kafa vurma, *z* ekseni etrafında savrulma hareketleri üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada, çok gövdeli ve çok serbestlik dereceli dinamik problemlerin çözümünü yapan genel amaçlı ADAMS programı ve matematiksel modellemede Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. ADAMS büyük yer değiştirmeler ve hareketler için dinamik problemi çözen genel amaçlı bir programdır. Dinamik sistemi matematiksel olarak temsil eden zamana bağlı diferansiyel denklem seti Hamilton prensibi ile elde edilen Euler-Lagrange denklemlerinden oluşmaktadır. Bu denklem seti içinde öteleme ve dönme ile ilgili dinamik denge denklemleri, kısıt denklemleri, yer değişimi ve kuvvet cinsinden sınır koşulları ifade edilmektedir. Bu diferansiyel denklemlerin sayısal algoritmalar yardımıyla integrali alınmakta ve genelleştirilmiş koordinatlar cinsinden dinamik sistem üzerindeki noktaların yer değiştirme değerleri elde edilmektedir. Sistem üzerinde oluşan kuvvetler de buna bağlı olarak elde edilmektedir.

Matlab/Simulinkte yapılan matematiksel modellemede ise Langrange metodu kullanılarak raylı taşıta ait diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Elde edilen bu diferansiyel denklemler doğrultusunda Matlab/Simulink programında modelleme yapılmıştır.

Sistemin diferansiyel denklemi (1) deki gibidir:

$$[M]\ddot{Z}+[C]\dot{Z}+[K]Z=F \tag{1}$$

Burada Z sistemin bağımsız koordinatlarını, F ise bozucu giriş etkisini temsil etmektedir.

[M], [C], [K] matrisleri sırasıyla sisteme ait kütle, sönüm ve katılık matrisleridir.

$$Z=[X_b\ Y_b\ Z_b\ \theta_b\ \phi_b\ \varphi_b\ X_{t1}\ Y_{t1}\ Z_{t1}\ \phi_{t1}\ \varphi_{t1}\ X_{t2}\ Y_{t2}\ Z_{t2}\ \phi_{t2}\ \varphi_{t2}]^T \tag{2}$$

$$F=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ k_{hy}y_1\ k_{hz}z_1\ 0\ 0\ 0\ k_{kh}y_2\ k_{hz}z_2\ 0\ 0]^T \tag{3}$$

Şekil 3'te görülen matematiksel model 16 serbestlik derecesine sahiptir. Eşitlik (2)'de x_{t1}, y_{t1}, z_{t1}, ϕ_{t1}, φ_{t1} birinci tekerlek setinin hareketlerini; x_{t2}, y_{t2}, z_{t2}, ϕ_{t2}, φ_{t2} ikinci tekerlek setinin hareketlerini; x_b, y_b, z_b, θ_b, ϕ_b, φ_b ise bojinin hareketlerini ifade etmektedir. Burada x, *y*, *z* aynı doğrultudaki doğrusal hareketleri; ϕ, θ, φ ise sırasıyla *x*, *y*, *z* eksenleri etrafındaki dönmeyi belirtir ve bu eksenler etrafındaki dönmeler sırasıyla yuvarlanma, kafa vurma ve yalpa olarak da adlandırılır. Aynı zamanda literatürde tekerlek setinin y eksenindeki doğrusal hareketi gezinme olarak da adlandırılır.

Tam boji modelinde m_b bojinin, m_{t1} birinci tekerlek setinin, m_{t2} ikinci tekerlek setinin kütlesidir. J_{bx}, J_{by}, J_{bz} bojinin sırasıyla *x*, *y*, *z* eksenleri etrafındaki atalet momentlerini, J_{t1x}, J_{t1z} birinci tekerlek setinin ve J_{t2x}, J_{t2z} ikinci tekerlek setinin sırasıyla *x* ve *z* yönlerindeki atalet momentlerini belirtir. Sırasıyla *x*, *y*, *z* yönünde birincil süspansiyon katılığını k_{11x}, k_{11y}, k_{11z} ve c_{11x}, c_{11y}, c_{11z} ise sırasıyla *x*, *y*, *z* yönünde birincil süspansiyon sönümleme katsayılarını ifade eder. L_{s1x} ve L_{s1y} süspansiyon elemanlarının bojinin ağırlık merkezine olan sırasıyla *x* ve *y* yönündeki mesafesidir. L_{bx} bojinin *x* yönündeki boyunun yarısını, *h* boji ve tekerlek seti kütle merkezleri arasındaki mesafeyi, r_o tekerlek

etkin yarıçapını, L_{t1} ve L_{t2} ise sırasıyla birinci ve ikinci tekerlek setlerinde tekerlekler arasındaki mesafenin yarısını, L_{ray} ise ray eksenleri arasındaki mesafeyi ifade eder.

Modellerde yol düzensizlikleri bozucu giriş olarak ele alınmıştır. Bu düzensizlik raylı taşıt sistemine katı tekerlekler vasıtası ile etkimektedir. Sırasıyla, k_{hy} ve k_{hz} yatay ve düşey yönlerdeki hertz yayı katılıklarıdır.

Tekerlek-ray etkileşimi esnasında oluşan kuvvetler tekerlek-ray temas alanı ile iletilirler. Tekerlek ile ray arasındaki temas alanının geometrisinden dolayı, dinamik tekerlek-ray etkileşimi için kuvvet ve çökme arasındaki ilişki Hertz temas yayı ile tanımlanır. Hertz temas yayı doğrusallaştırılmış olup, temas kuvveti ile ray-tekerlek temas yüzeyinde *(y)* oluşan çökme arasındaki ilişkiye bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir [2];

$$F = C_h . y^{3/2} \ [N] \tag{4}$$

Eşitlikte yer alan C_h [N/m$^{-3/2}$] değeri, tekerlek ve rayın yarıçap ve malzeme özelliklerine bağlı bir sabittir. Hertz temas katılığının doğrusal değeri, statik tekerlek yüküne bağlı olarak kuvvet-yer değiştirme ilişkisinden (5)'teki gibi elde edilebilir [2];

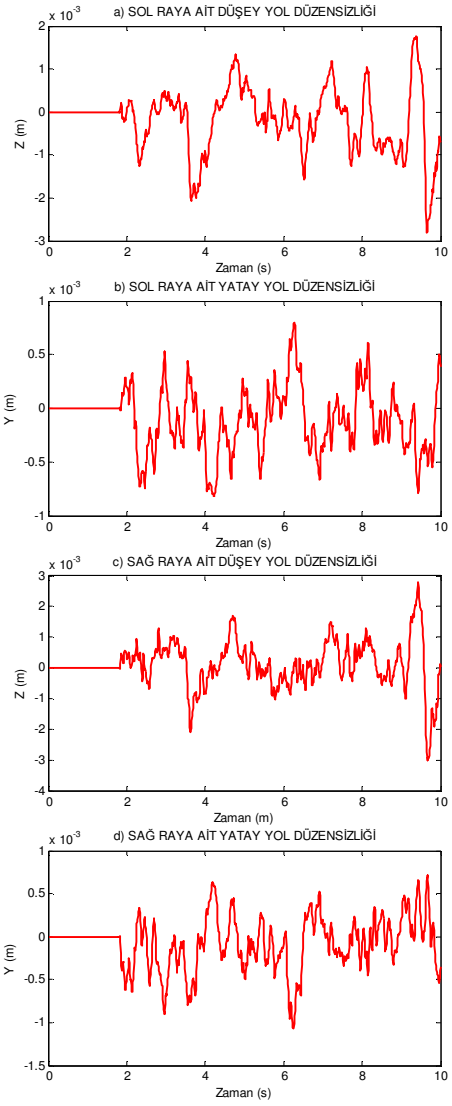
$$K_h = dF/dy = \frac{3}{2}\left(C_h^{2/3} . F^{1/3}\right) \left[N/m\right] \tag{5}$$

Eşitlikte C_h, Hertz yay sabitini, F ise statik tekerlek kuvvetini temsil etmektedir.

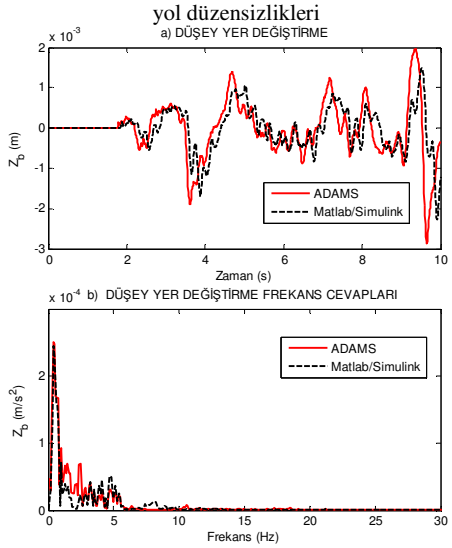
3.BENZETİMLER

Sürüş performansının değerlendirilmesinde asıl incelenmesi gereken, bojinin düşey ve yatay yer değişimi cevaplarının incelenmesidir. Yolcu konfor seviyesi için ise ivmelenme cevaplarına ait değerlerin incelenmesi gerekmektedir. Benzetimlerde kullanılan yol düzensizlikleri ADAMS programının kütüphanesinden alınarak kullanılmıştır.

Benzetimlerde bojinin yer değişimi ve ivme cevaplarına bakılmıştır. ADAMS ve Matlab/Simulink programlarında yapılan benzetimlerde aynı şartlar altında gerçekleştirilmiştir. İki programda sağ ve sol tekerleklere Şekil 4'te görülen farklı düşey ve yatay bozucu etkiler etkimektedir. Yapılan benzetimlerde boji hızı 30 km/h olarak seçilmiştir.

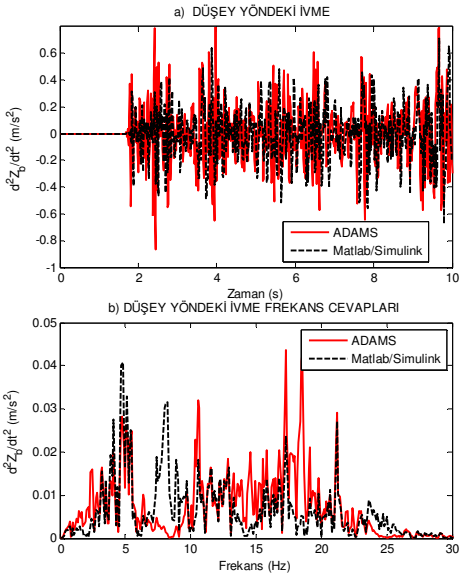


Şekil 4. Sağ ve sol tekerleklere etkiyen düşey ve yatay yol düzensizlikleri

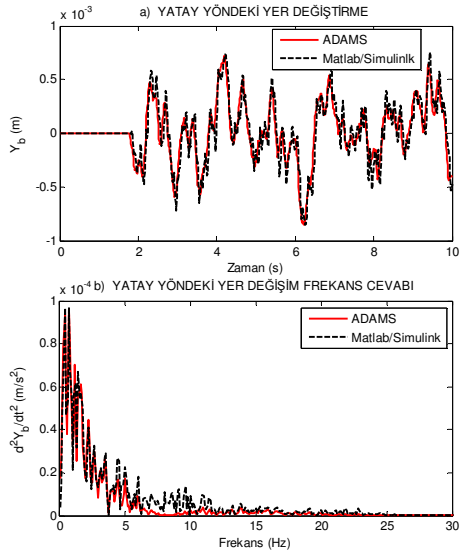


Şekil 5. Boji iskeletine ait düşey yöndeki yer değişimlerinin zaman ve frekans cevapları karşılaştırması

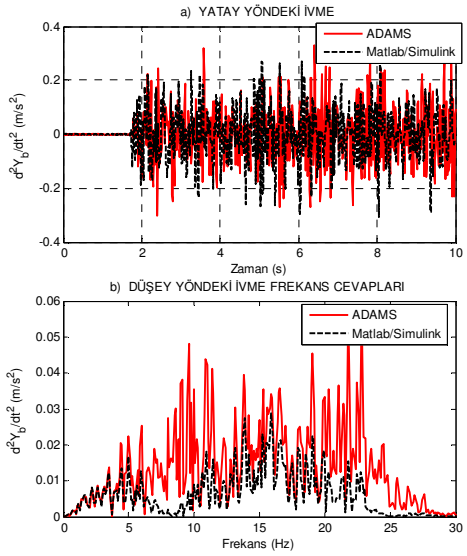
Şekil 5-a, b ve Şekil 6-a, b'de bojiye ait düşey yöndeki yer değişimlerinin ve ivmelerin zaman ve frekans alanındaki cevapları karşılaştırılmıştır. Şekil 7-a, b ve Şekil 8-a, b'de ise bojiye ait yatay yöndeki yer değişimlerinin ve ivmelerin zaman ve frekans alanındaki cevapları karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. Boji iskeletine ait düşey yöndeki ivme değişimlerinin zaman ve frekans cevapları karşılaştırması



Şekil 7. Boji iskeletine ait yatay yöndeki yer değişimlerinin zaman ve frekans cevapları karşılaştırması



Şekil 8. Boji iskeletine ait yatay yöndeki ivme değişimlerinin zaman ve frekans cevapları karşılaştırması

5. SONUÇLAR

Doğru analiz için doğru modelin kurulması şarttır, bu nedenle iki farklı programda boji modeli oluşturularak bojiye ait yer değişimi ve ivme değerleri hem zaman alanında hem de frekans alanında karşılaştırılmıştır. Her iki programda da aynı model parametreleri kullanılmıştır. Böylece oluşturulan modellerin doğruluğu incelenmiştir. Modeller 30 km/s hız, sağ ve sol tekerleklere düşey ve yatay yönlerde uygulanan 4 farklı bozucu yol girişi altında benzetimler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada bojiye ait yer değişimleri ve ivme genlikleri her iki program sonucuna göre hem zaman alanındaki cevaplar hem de frekans alanındaki cevaplar neredeyse örtüşmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda Matlab/Simulink programında kurulan matematiksel modelin ADAMS programından alınan sonuçlar ile örtüşmesi matematiksel modelin başarısını göstermektedir.

Sonraki çalışmalarda, tekerlek-ray etkileşiminde sünmelerde modele dahil edilerek bu etkileşimler daha gerçekçi olarak modellenecektir, ayrıca tam raylı taşıt modeli kurularak taşıt gövdesi ve diğer elemanlara ait benzetimler gerçekleştirilerek, raylı taşıta ait sürüş dinamiği incelenecektir. Böylece sürüş güvenliği ve yolcu konforuna yönelik analizler yapılabilecektir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Ulaşım A.Ş. tarafından desteklenmektedir. Kullanılan tüm

parametrik bilgiler İstanbul Ulaşım AŞ. 'den alınmıştır.

7. KAYNAKLAR

1. Jenkins, H., Stephenson, J., G.A., Clayton, G.W,. Morland and Lyon, D., "The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces", Railway Engineering Journal, January, 2–16, 1974.
2. Esveld, C., "Modern Railway Track", MRT Productions, Netherlands 2001.
3. Dukkipati, R.V., and Dong, R., "The Dynamic Effects of Conventional Freight Car Running Over A Dipped-Joint", Vehicle System Dynamics, 31, 95–111, 1999.
4. Güçlü, R., "Active Control of Seat Vibrations of a Vehicle Model Using Various Suspension Alternatives", Turkish J. Eng. Env. Sci., 27, 361- 373, 2003.
5. Güçlü, R., "Fuzzy Logic Control of Seat Vibrations of a Non-Linear Full Vehicle Model", Nonlinear Dynamics, 40, 21-34, 2005.
6. Metin, M., Güçlü, R., Yazıcı, H. and Yalçın, N.S.," Fuzzy Logic Control of High Speed Rail Vehicle Vibrations on Corrugated Rail", The 36th International Congress & Exhibition on Noise Control Engineering, Inter-noise 2007, Istanbul, Turkey, 37, Aug. 28-31, 2007.
7. Metin, M., Güçlü, R., Yazıcı, H. and Yalçın, N.S., "Raylı Taşıt Titreşimlerinin Bulanık PID Kontrolör ile Kontrolü", TOK'07 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantisi, 4-7 September, Sabanci Universitesi, Istanbul, 312-317, 2007.
8. Metin, M., Güçlü, R., Yazıcı, H. and Yalçın, N.S., "A Comparison of Control Algorithms for a Half Rail Vehicle Model under Track Irregularity Effect," Mechanics Conference and 100th Anniversary of Engineering of Science and Mechanics Department, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg-VA, USA, Jun. 29-30 2008.
9. Metin, M., Güçlü, R., Duman, F., "Vibration Controls of a Rail Vehicle Body Using Parameters Adaptive PID Controller", AzCIFToMM, 5-8 October, Izmir Institute of Technology, Izmir, TURKEY
10. Güçlü, R., Metin, M., "Fuzzy Logic Control of Vibrations of a Light Rail Transport Vehicle in Use in Istanbul Traffic", Journal of Vibration and Control, Sep 2009; vol. 15: pp. 1423 – 1440.

8. EK

Bojiye ait parametreler tablodaki gibidir.

Kütleler (kg)	Atalet momentleri (kgm^2)	Yay ve sönüm katsayıları (N/m), (Ns/m)	Boyutlar (m)
$M_b = 2615$	$J_{bx} = 1722$	$k_{11x} = 617000$	$L_1 = 1.005$
$M_{t1} = 797.5$	$J_{by} = 1476$	$k_{11y} = 617000$	$L_2 = 1.005$
$M_{t2} = 797.5$	$J_{bz} = 3067$	$k_{11z} = 732000$	$L_3 = 1.08$
	$J_{t1x} = 810$	$k_{hy1} = 1x10^9$	$L_4 = 1.08$
	$J_{t1z} = 112$	$k_{hz1} = 1x10^9$	$L_{bx} = 1.005$
	$J_{t2x} = 810$	$c_{11x} = 25000$	$L_{s1x} = 0.7813$
	$J_{t2z} = 112$	$c_{11y} = 25000$	$L_{s1y} = 0.94$
		$c_{11z} = 30000$	$h = 0.1865$
		$c_{hy1} = 10^4$	$r_o = 0.33824$
		$c_{hz1} = 10^4$	$L_{t1} = 0.7232$
		$c_{11x} = 25000$	$L_{t2} = 0.7232$
			$L_{ray} = 1.4465$