BİR HAFİF METRO ARACINA AİT HAVA YAYININ MATEMATİK MODELİNİN ÇIKARTILMASI

Muzaffer METİN*, Ahmet ÖZER**, Rahmi GÜÇLÜ*, Kazım CAN**

(*)Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü 34349 İstanbul

(**) İstanbul Ulaşım A.Ş., Ar-Ge Birimi 34220 İstanbul
mmetin@yildiz.edu.tr , ozer@istanbul-ulasim.com.tr, guclu@yildiz.edu.tr, can@istanbul-ulasim.com.tr

ÖZET

Raylı taşıtlarda hava yayları, titreşimlerin yalıtılması ve yolcu konforunun iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Yolcu konforu açısından incelenen bir raylı taşıtın matematik modelinin çıkarılmasında, en kritik noktalardan birisi hava yaylarının doğru bir şekilde modellenerek sisteme eklenmesidir. Bu çalışmada, İstanbul şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılan bir hafif metro aracına ait hava yayı incelenerek, matematiksel modeli çıkartılmıştır. Bu amaçla, literatürde ortaya konulan farklı hava yayı modelleri ele alınarak dinamik davranışları karşılaştırılmıştır. Burada, hava yayları basit kütle-yay-sönüm elemanları şeklinde modellenerek, bozucu giriş etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Ayrıca, hafif metro aracında kullanılan hava yayına ait dinamik davranışlar, benzer şartlar altında incelenmiştir. Gerçek sisteme en yakın hava yayı modeli belirlenmiştir. Daha sonra, gerçek hava deposuna eklenecek ek hava deposunun sisteme etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hava yayı, raylı taşıt, dinamik model, ikincil süspansiyon

MATHEMATICAL MODELLING OF AIRSPRING FOR LIGHT RAIL VEHICLE

ABSTRACT

Air spring is used for absorbing the vibrations and improving the passenger comfort in rail vehicles. Accurate modelling of air spring is the most critical point for rail vehicles to investigate the passenger comfort. In this study, mathematical model of air spring, used for light rail vehicle in Istanbul urban transport system, is built. For this reason, different air spring models, included in literature, are handled. Dynamic behaviours of these models are compared. First of all, air springs are modelled as mass-spring-damper system and behaviour of air spring is investigated under disturbances. Then, the nearest air-spring model to the real system is determined and the effect of additional air reservoir on the system is investigated.

Keywords: Air spring, light rail vehicle, mathematical model, secondary suspension

1. GİRİŞ

İstanbul'da kullanılan hafif metro araçlarında yolcu yoğunluğunun fazla olması ve yol düzensizliğinin giderek artması yolcu konforunu olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple yolcu konforunda önemli etkiye sahip olan hava yayında yapılacak iyileştirme çalışmaları önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Hava yayı parçaları Şekil 1'de görülmektedir. Hava yayının taşıma kuvveti; içine hapsedilmiş basınçlı havaya ve etkili alana bağlıdır. Yüke göre ayarlanabilir olması, hafifliği, diğer yaylara nazaran eşit çökmeler için daha küçük boyutta olabilmesi, karakteristikleri farklı seçilebilmesi avantaj olarak sayılır.

Hafif metro ve tramvay araçlarında, her bir bojide ikişer adet olmak üzere toplam altı adet hava yayı bulunmaktadır. Her bir hava yayı boji ile bolster arasına yerleştirilerek ikinci süspansiyon olarak kullanılmaktadır. Hava yayı, araç gövdesinin bojiye göre olan

yüksekliğinin ayarlanmasını sağlar. Ayrıca taşıyıcı kiriş ve boji şasisi arasındaki dikey ve yanal titreşimler sönümlenerek gerekli konfor elde edilir.

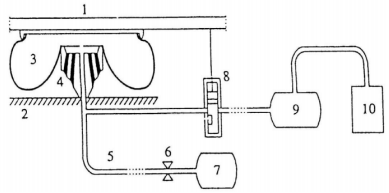


Şekil 1. Hava yayını oluşturan elemanlar

Hava yayının modellenmesinde birçok farklı yaklaşım gözlenmektedir.

Modelleme yapılırken öncelikle sistem elemanları ele alınmış ve bu elemanların sisteme etkileri modele işlenmiştir.

Hava yayı sistemi aşağıdaki Şekil 2'de görülmektedir [1].



1	Araç gövdesi	6	Boru (orifice)
2	Bogi	7	Ek hava deposu
3	Kauçuk diyafram	8	Seviye valfi
4	Emniyet takozu	9	Hava deposu
5	Bağlantı kanalı	10	Kompresör

Şekil 2. Hava yayı sistemi [1]

Berg raylı taşıtların dinamik analizlerinde hava yayı modeli üzerine çalışma yapmıştır [2]. Göktan havalı yaylarda sönümü incelemiştir [3]. Sayyadi ve Shokouhi havalı yaylar ile yolcu konforunun artırılması üzerine çalışma yapmıştır [4]. Eaton nonlineer pnömatik sistemlerin matematik modelleri üzerinde çalışmıştır [5]. Sayyadi ve Shokouhi hava yayı parametrelerinin genetik algoritma yöntemi ile optimizasyonu üzerine çalışmıştır [6]. Berg taşıt dinamiği analizlerinde hava yayının nonlineer modellenmesi üzerine çalışmıştır [7]. Sihong, Jiasheng ve Ying ek depoya sahip hava yayının dinamik yay katsayısının teorik olarak hesaplanması üzerine çalışmıştır [8]. Presthus tren simülasyonunda hava yayı parametrelerinin çıkarılması üzerine çalışmıştır [9]. Chang ve Lu dinamik hava yayı modelinin taşıt dinamiği modeline eklenmesi üzerine çalışmıştır [10]. Güçlü ve Metin, İstanbul şehir içi ulaşımında kullanılan bir hafif raylı taşıta ait titreşimleri kontrol etmek için yaptıkları çalışmada hava yaylarına ait basit model kullanmışlardır [11].

2. HAVA YAYI MODELLERİNİN KURULMASI

2.1.1. Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Sisteme ait diferansiyel denklemler Lagrange Metodu kullanılarak çıkartılmıştır (1 ve 2).

$$[m](\ddot{z})+[c](\dot{z})+[k](z)=f_z(t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial\sum Ek}{\partial\sum\dot{q}_j}\right)-\frac{\partial\sum Ek}{\partial\sum q_j}+\frac{\partial\sum Ep}{\partial\sum q_j}+\frac{\partial\sum Ed}{\partial\sum\dot{q}_j}=Q_j \quad (2)$$

Lagrange eşitliği kullanılarak en genel halde mekanik bir sistemin dinamik davranışlarını ifade eden diferansiyel denklem takımı matris formunda elde edilmiştir. Burada, [m], [c], ve [k] sırasıyla sisteme ait kütle sönüm ve katılık matrislerini ifade ederken, $f_z(t)$ titreşimlere neden olan bir bozucu etkiyi temsil etmektedir.

2.1.2. Modellerde Kullanılan Parametreler

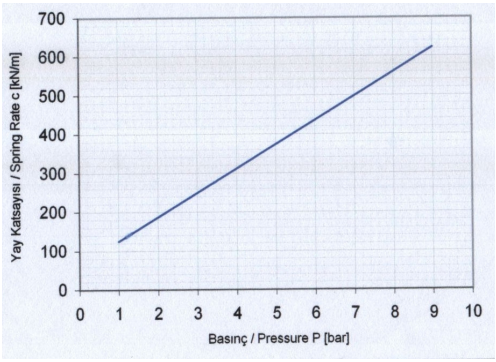
Aktaş Group firmasının ABB araçlarında kullanılan Toyo Hava Yayı üzerinde yaptığı testler sonucu elde edilen veriler hava yayı basit modelinde kullanılmıştır. Test düzeneği Şekil 3'te görülmektedir. Hava yayı test düzeneği, hava yayına çalışma yükünü veren pres, hava yayı, hava basıncını sağlayan kompresör, çeşitli yükler altında hava yayına ait deplasmanı ölçen lazer mesafe algılayıcı, presin oluşturduğu yükü ölçen yük hücreleri ve tüm test düzeneği elemanlarını kontrol eden ve verileri kaydeden kontrol ünitesinden oluşmaktadır.



Şekil 3. Test düzeneği genel görünümü

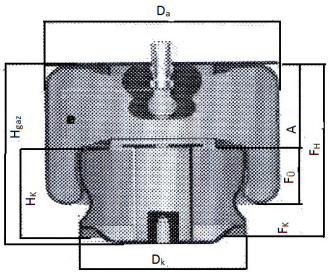
İşletmede kullanılan hava yaylarının nominal çalışma basınçları 5 bar'dır. Bir hava yayının taşıması gereken yük, iç basınçla doğru orantılıdır. Taşıt tam yük ile çalışırken, bir hava yayına düşen yük miktarı 5,453 ton'dur. Bu bilgiler ışığında, 450 mm çapa sahip hava yayında yapılan basınç değişimi-yay

katsayısı testi sonucu elde edilen eğri Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Basınç değişimine göre yay katsayısı değişimi

Şekil 5'te bir hava yayına ait parametreler gösterilmiştir. Yapılan test ve ölçümler sonucu elde edilen parametreler ise Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 5. Hava yayı parametreleri

Tablo 1. Hava yayı parametreleri ve değerleri

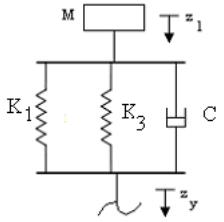
Açıklama	Simge	Değer	Birim
Çalışma yüksekliği	H_{gaz}	300	mm
Çalışma basıncındaki çap	D_A	450	mm
Piston çapı	D_K	294	mm
Metal parçalar arasındaki mesafe	A	150	mm
Konuslar hariç metal parçalar arası mesafe	H_K	145	mm
Çalışma basıncı	p	5	bar
Taşıma kapasitesi	F	54,53	kN
Etkili alan	A_W	1091	cm2
Etkin çap	D_W	373	mm
Çalışma basıncındaki körük iç hacmi	V_F	26742	cm^3
Yay katsayısı	k	373605	N/m
Körüğün pistona sarktığı mesafe	$F_Ü$	71	mm

2.2. Hava Yayına Ait Dinamik Modeller

Raylı taşıt dinamiğinde matematiksel modelleme yapılırken, genellikle ikincil süspansiyon olarak kullanılan hava yaylarının detaylı incelenmesi gerekmektedir. Bazı raylı taşıtlarda, hava yaylarına ait özel tertibatlar söz konusu olduğu için, karmaşık bir yapı teşkil etmektedirler. Bu nedenle literatürde, hava yaylarına ait çeşitli modelleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada, bu yöntemler arasında en fazla kullanılan basit, Nishumura ve Berg modelleri ele alınmıştır.

2.2.1.Basit Model

Bu modelde, hava yayı en basit haliyle ele alınmaktadır ve bünyesinde ek depo bulundurmayan hava yayları için kullanılmaktadır. Bu nedenle, İstanbul'da kullanılan hafif metro araçlarında yer alan hava yayları basit model kullanılarak modellenebilir (Şekil 6).



Şekil 6. Basit model [1,11]

Şekil 2'deki sistemde bulunan 5, 6 ve 7 numaralı bölümler bu modelde yer almamaktadır. Bu sebeple modellemede sadece hava yayının içerisindeki havanın modele etkisi dikkate alınmıştır. Sistem iki yay elemanı ve bir sönüm elemanından oluşmaktadır ve tek serbestlik derecesine sahiptir. (3) ve (4)'te K_1 ve K_3 değerlerinin nasıl elde edildiği gösterilmektedir. Gerekli parametreler için Tablo 1'den faydalanılmıştır. Mevcut hava yayında çelik muhafaza ile hacimsel bir sınırlandırma söz konusu olduğu için, diyaframda herhangi bir çap değişimi olmamaktadır. Bu nedenle, K_3 değeri ihmal edilmiştir. Bu modelde, hava yayına ait sönüm katsayısı değeri (C), yay katsayısı değerinin %5'i olarak kabul edilmiştir (Tablo 2).

$$K_1 = n(A_e)^2 \frac{P_0}{V_b} \tag{3}$$

$$K_3 = p_{g0} \frac{dA_e}{dz} = (p_0 - p_a) \frac{dA_e}{dz} \tag{4}$$

Tablo 2. Basit modele ait parametreler

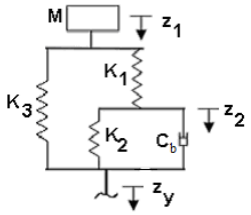
K_1	=	378836,2	N/m
K_3	=	0	N/m
C	=	18941,81	N.s/m

Aktaş Group firmasının hava yayı test düzeneğinde farklı hava basınçları için elde edilmiş olan yay katsayısı değerlerinden, *5 bar* nominal hava basıncı için *k=373605 N/m*

olarak tespit edilmiştir (Şekil 4, Tablo 1). Basit model için elde edilen eşdeğer yay katsayısı ise $K_{eş}=K_1+K_3=378836,2$ *N/m* olarak (3) ve (4) eşitliklerinden elde edilir. Analitik ve deneysel yolla elde edilen sonuçların birbirine yakın çıkması, sonuçların tutarlılığını ve Toyo tipli hava yayı için basit modelin kullanılabileceğini göstermektedir.

2.2.2. Nishimura Modeli

Bu sistemde, basit modeldeki sisteme ek olarak bir hava deposu, depoyu kauçuk diyaframa bağlayan bir kanal ve hava geçişini düzenleyen bir boru bulunmaktadır (Şekil 2). Bu nedenle model, biraz daha karmaşık bir hal almaktadır. Nishimura hava yayı modeli z_1 ve z_2 olmak üzere 1,5 serbestlik derecelidir (Şekil 7).



Şekil 7. Nishimura modeli [1]

Model; 1 adet kütle, 3 adet yay elemanı ve 1 adet sönüm elemanından oluşmaktadır. z_1 ve z_2 genelleştirilmiş koordinatlarını içermektedir. z_1, M kütlesinin düşey hareketini temsil etmektedir. Bu modelde yay (K_1) ve sönüm (C_b) elemanları seri bağlanmıştır. Bu nedenle hareketin diferansiyel denklemleri çıkarılırken seri bağlanan yay ile sönüm elemanının bağlantı noktasında serbestlik olduğu varsayılır (z_2). Bu sayede işlemler kolaylaşır ancak burada herhangi bir kütle bulunmadığı için bu durum sisteme yarım serbestlik derecesi ilave eder.

Böylece genelleştirilmiş koordinatlar; z_1, z_2 ve z_y yol bozucu etkisinden oluşmaktadır.

(5), (6), (7), (8)'de K_1, K_2, K_3 ve C_b değerleri verilmiştir.

$$K_1 = n(A_e)^2 \frac{P_0}{V_b} \tag{5}$$

$$K_2 = n(A_e)^2 \frac{P_0}{V_r} \tag{6}$$

$$K_3 = p_{g0}\frac{dA_e}{dz} = (p_0 - p_a)\frac{dA_e}{dz} \tag{7}$$

$$C_b = R_f A_e^2 q_0 g = \frac{0.126}{d_s^3} A_e^2 q_0 g \tag{8}$$

Sisteme ait diferansiyel denklemler (9) ve (10)'da gösterilmiştir.

$$\ddot{z}_1 = (-K_1/M)(z_1 - z_y) - (K_2/M)(z_1 - z_2) \tag{9}$$

$$\dot{z}_2 = ((K_2/C)(z_1 - z_2) - (K_3/C)(z_2 - z_y)) + \dot{z}_y \tag{10}$$

Sistem diferansiyel denklemlerinin matris şeklinde gösterimi (11)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 + K_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_3 \end{bmatrix} \times z_y + \begin{bmatrix} 0 \\ C \end{bmatrix} \times \dot{z}_y \tag{11}$$

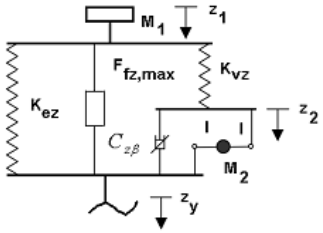
Bu modelde kullanılan parametreler (5), (6), (7) ve (8) kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Nishimura modeline ait parametreler

K_1	=	202616,8	N/m
K_2	=	378836,2	N/m
K_3	=	0	N/m
C_b	=	10924,1	N.s/m

2.2.3. Berg Modeli

Bu model de Nishumura modeli gibi ek hava deposu ve gerekli diğer bağlantı elemanlarını içermektedir. Bu haliyle Nishumura modeline bir alternatif teşkil etmektedir. Berg hava yayı modeli (Şekil 8), z_1 ve z_2 den oluşan 1,5 serbestlik dereceli modeldir.



Şekil 8. Berg Modeli [2]

Model; 1 adet kütle, 3 adet yay elemanı ve 2 adet sönüm elemanından oluşmaktadır. z_1 ve z_2 genelleştirilmiş koordinatları içermektedir. z_1, M kütlesinin düşey hareketini temsil etmektedir. Bu modelde yay (K_{vz}) ve sönüm ($C_{z\beta}$) seri bağlanmıştır. Bu nedenle hareketin diferansiyel denklemleri çıkarılırken seri bağlanan yay ile sönüm elemanının bağlantı noktasında serbestlik olduğu varsayılır. Bu sayede işlemler kolaylaşır ancak burada herhangi bir kütle bulunmadığı için bu serbestlik sisteme yarım serbestlik derecesi ilave eder. Böylece genelleştirilmiş koordinatlar; z_1, z_2 ve z_y yol bozucu

etkisinden oluşur. Modeli oluşturan K_{ez}, K_{vz}, M, $C_{z\beta}$ (12), (13), (14) ve (15)'te gösterilmiştir.

$$K_{ez} = \frac{p_0 A_e^2 n}{V_{b0} + V_{r0}} + p_g \frac{dA_e}{dz} \tag{12}$$

$$K_{vz} = K_{ez} \frac{V_{ro}}{V_{b0}} \tag{13}$$

$$M = l_s A_s \rho \left(\frac{A_e}{A_s} \frac{V_{r0}}{V_{b0} + V_{r0}} \right)^2 \tag{14}$$

$$C_{z\beta} = \frac{1}{2} \rho k_t A_s \left(\frac{A_e}{A_s} \frac{V_{r0}}{V_{b0} + V_{r0}} \right)^{\beta+1}, \ \beta = 2 \tag{15}$$

Sisteme ait diferansiyel denklemler (16) ve (17)'de gösterilmiştir.

$$\ddot{z}_1 = (-K_1 / M_1)(z_1 - z_y) - (K_2 / M_1)(z_1 - z_2) \tag{16}$$

$$\ddot{z}_2 = (2K_2 / M_2)(z_1 - z_2) - (2C_{z\beta} / M_2)(\dot{z}_2 - \dot{z}_y) \tag{17}$$

Sistem diferansiyel denklemlerinin matris şeklinde gösterimi (18)'de verilmiştir.

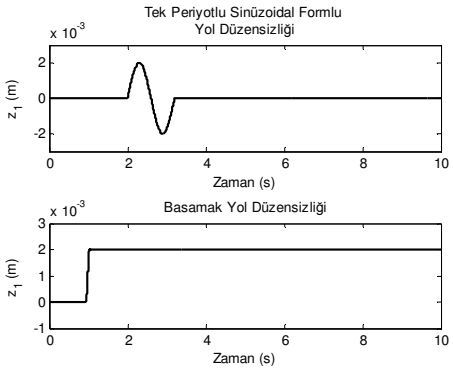
$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_{z\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ez} + K_{vz} & -K_{vz} \\ -K_{vz} & K_{ez} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ez} \\ 0 \end{bmatrix} z_y + \begin{bmatrix} 0 \\ C_{z\beta} \end{bmatrix} \dot{z}_y \tag{18}$$

Bu modelde kullanılan parametreler (12), (13), (14) ve (15) kullanılarak Tablo 4'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4. Berg modeline ait parametreler

K_{ez}	=	246824,6	N/m
K_{vz}	=	461492,4	N/m
C_{zb}	=	46887,51	N.s/m
M	=	355,0654	kg

2.3. Yol Düzensizliği

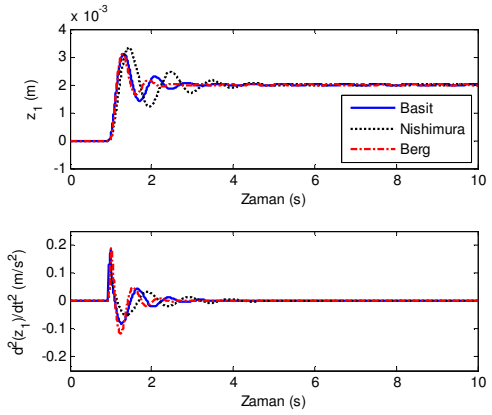


Şekil 9. Farklı yol girişleri

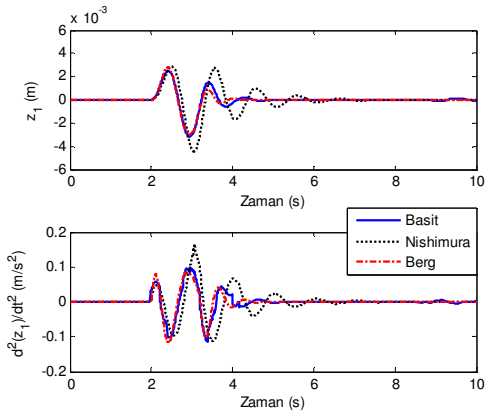
Gerçekte sisteme, çok çeşitli ve düzensiz bozucu girişler etki etmektedir. Yolda oluşabilecek çökmeler ve ray bağlantı noktalarında meydana gelebilecek seviye farklılıkları göz önüne alınarak, tek periyotlu sinüzoidal formlu ve basamak yol girişleri sisteme bozucu giriş olarak uygulanmıştır (Şekil 9).

3. BENZETİMLER

Öncelikle, Şekil 9'da verilen yol düzensizlikleri için hafif metro araçlarında kullanılan hava yayına ait basit, Nishimura ve Berg modellerine ait benzetim sonuçları Şekil 10 ve 11'de gösterilmiştir.



Şekil 10. Basamak yol girişine karşılık modellerin yer değişimi ve ivme cevabı



Şekil 11. Tek periyotlu sinüzoidal formlu yol girişine karşılık modellerin yer değişimi ve ivme cevabı

Diğer taraftan, mevcut hava yayı sistemine ek depo sisteminin eklenmesi sonucu sistem cevaplarında oluşacak farklar ortaya konulmuştur. Ek depo sisteminde hava yayının davranışını etkileyecek parametreler; ek depo hacmi (V_r) ve boru çapıdır (d_s). Nishimura modelinde ek depo hacmi V_r'nin modele etkisi (6)'da görülmektedir. Bağlantı borusu çapı d_s'nın etkisi ise (8)'de görülmektedir.

Berg modelinde, ek depo hacmi V_r'nin modele etkisi (12), (13), (14) ve (15)'te

görülmektedir. Bağlantı borusu çapı d_s'nin etkisi ise (14) ve (15)'te görülmektedir.

Sırasıyla, Nishimura ve Berg modelleri için Tablo 5 ve 7'de boru çapı sabit tutularak depo hacminin 3 farklı durumu için model parametreleri hesaplanmıştır.

Ayrıca, sırasıyla Nishimura ve Berg modelleri için Tablo 6 ve 8'de depo hacmi sabit tutularak, bağlantı borusu çapının 3 farklı durumu için model parametreleri hesaplanmıştır.

Tablo 5. Ek depo hacim değişimine göre Nishimura hava yayı parametreleri

Boru Çapı d_s (m)	0.02		
Ek depo hacmi V_r (m3)	0.01	0.05	0.25
K_1 (N/m)	1013084	212617	40523
K_2 (N/m)	378836	378836	378836
C (N.s/m)	10924	10924	10924

Tablo 6. Boru çapı değişimine göre Nishimura hava yayı parametreleri

Ek depo hacmi V_r (m3)	0.05		
Boru Çapı d_s (m)	0.01	0.05	0.25
K_1 (N/m)	212617	212617	212617
K_2 (N/m)	378836	378836	378836
C (N.s/m)	87393	10924	1366

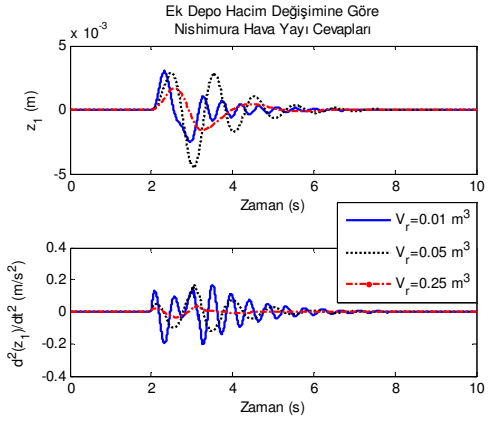
Tablo 7. Ek depo hacim değişimine göre Berg hava yayı parametreleri

Boru Çapı d_s (m)	0.02		
Ek depo hacmi V_r (m3)	0.01	0.05	0.25
K_{ez} (N/m)	103107	246825	342229
K_{vz} (N/m)	38556	461492	3199356
C_{zb} (N.s/m)	3418	46888	124980
M	62	355	683

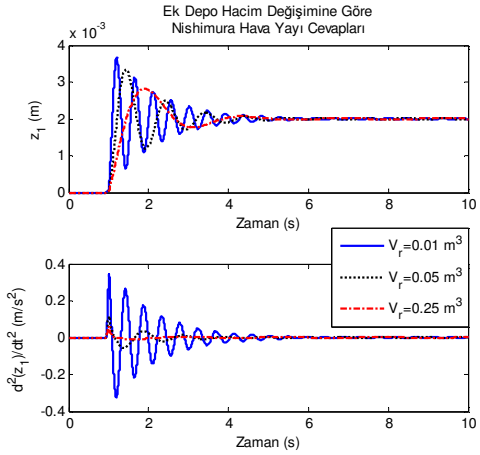
Tablo 8. Boru çapı değişimine göre Berg hava yayı parametreleri

Ek depo hacmi V_r (m3)	0.05		
Boru Çapı d_s (m)	0.01	0.05	0.25
K_{ez} (N/m)	246825	246825	246825
K_{vz} (N/m)	461492	461492	461492
C_{zb} (N.s/m)	750200	46888	2930
M	1420	355	89

Sırasıyla, tek periyotlu sinüzoidal formlu ve basamak yol girişleri altında, sabit boru çapında ek depo hacminin değişimine göre Nishimura hava yayı cevapları Şekil 12 ve 13'te gösterilmektedir.

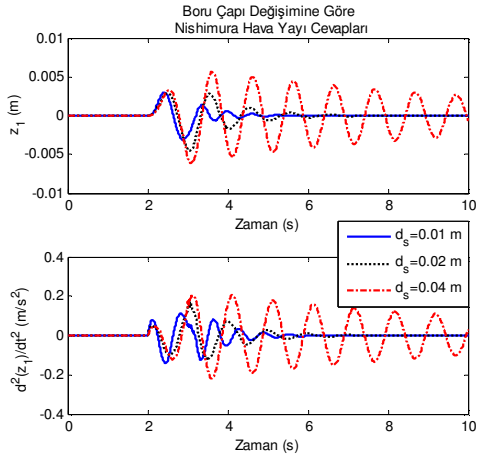


Şekil 12. Tek periyotlu sinüzoidal formlu yol düzensizliğinde ek depo hacminin değişimine göre Nishimura hava yayı cevapları

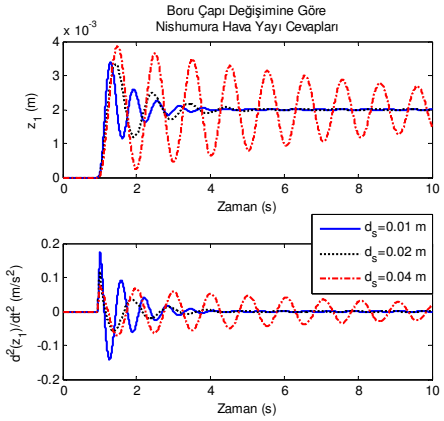


Şekil 13. Basamak yol düzensizliğinde ek depo hacminin değişimine göre Berg hava yayı cevapları

Sırasıyla, aynı yol düzensizlikleri altında, sabit ek depo hacminde, boru çapının değişimine göre Nishimura hava yayı cevapları Şekil 14 ve 15'te gösterilmektedir.

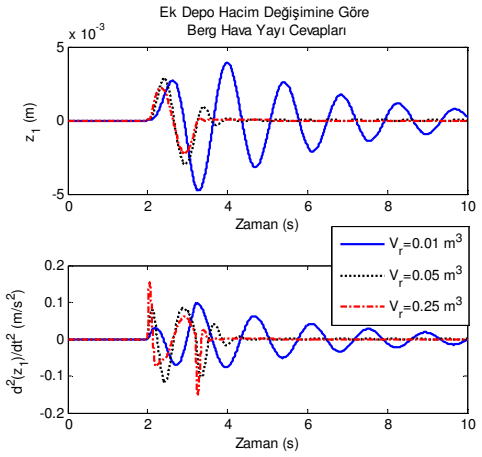


Şekil 14. Tek periyotlu sinüzoidal formlu yol düzensizliğinde boru çapı değişimine göre Nishimura hava yayı cevapları

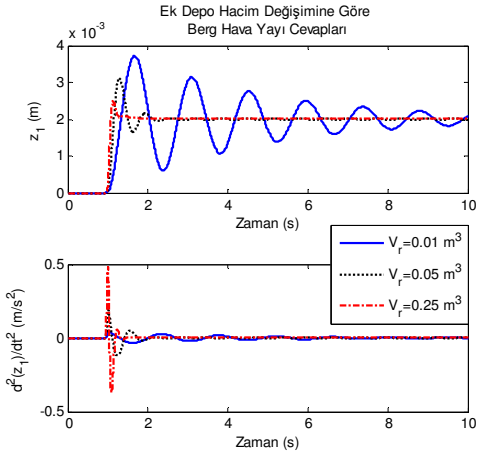


Şekil 15. Basamak yol düzensizliğinde boru çapı değişimine göre Nishimura hava yayı cevapları

Sırasıyla, tek periyotlu sinüzoidal formlu ve basamak yol girişleri altında, sabit boru çapında ek depo hacminin değişimine göre Berg hava yayı cevapları Şekil 16 ve 17'de gösterilmektedir.

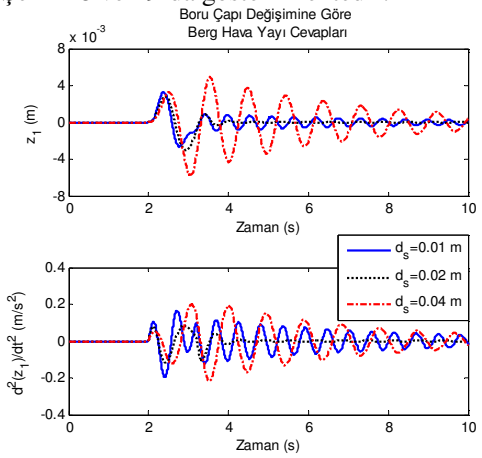


Şekil 16. Tek periyotlu sinüzoidal formlu yol düzensizliğinde ek depo hacminin değişimine göre Berg hava yayı cevapları

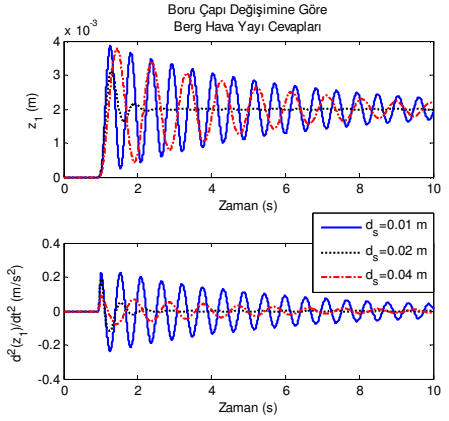


Şekil 17. Basamak yol düzensizliğinde ek depo hacminin değişimine göre Berg hava yayı cevapları

Sırasıyla aynı yol düzensizlikleri altında, sabit ek depo hacminde, boru çapının değişimine göre Berg hava yayı cevapları Şekil 18 ve 19'da gösterilmektedir.

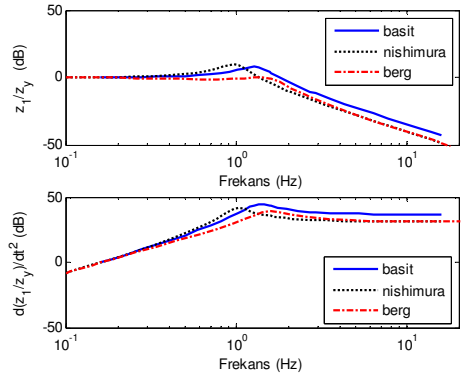


Şekil 18. Tek periyotlu sinüzoidal formlu yol düzensizliğinde boru çapı değişimine göre Berg hava yayı cevapları



Şekil 19. Basamak yol düzensizliğinde boru çapı değişimine göre Berg hava yayı cevapları

Basit, Nishimura ve Berg Modellerine ait frekans cevapları ise Şekil 20'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 20. Modellerin frekans cevaplarının karşılaştırılması

Şekil 20'de görülen frekans cevaplarındaki eğrilere ait tepe noktaları, basit model için 1,3 Hz, Nishimura modeli için 0,97 Hz ve Berg modeli için 1,4 Hz'tir.

4.SONUÇ

Bu çalışmada, İstanbul şehiriçi ulaşımında işletilen ABB hafif metro araçlarında kullanılan hava yaylarına ait modellemeler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, gerçek sistemde ek depo bulunmamasından dolayı hava yayı literatürde geçen basit model olarak modellenmiştir. Hesaplamalar için gerekli olan hava yayına ait bütün parametreler ve basit modele ait yay katsayısının tespiti Aktaş Group tesislerindeki hava yayı test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, basit modele ait eşdeğer yay katsayısı hesaplanarak bulunmuş olup, bu değer test sonuçlarıyla örtüşmüştür. Bu, sonuçların tutarlılığını ve Toyo tipli hava yayı için basit modelin kullanılabileceğini göstermektedir. Tek periyotlu sinüzoidal formlu ve basamak yol düzensizlikleri altında basit modele ait yer değişimi ve ivme cevapları, Nishimura ve Berg hava yayı modellerine ait cevaplarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra, mevcut sisteme ek depo eklenmesi durumunu analiz etmek için, ek depo hacim ve boru çapının değişiminin sistem cevaplarına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, ek hava deposunun hacminin artırılması sistem cevabında yer değişimi ve ivme genliklerinin bastırılmasında önemli rol oynamaktadır. Sistem cevaplarını konfor bakımından iyileştirmek için boru çapının optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Sonraki çalışmalarda ise, bu problemin çözümüne yönelik ek depo boru çapının optimizasyonu gerçekleştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Berg M, "Modeling of springs and dampers for dynamic analysis of rail vehicles", a pilot study, KTH, ISRN/KTH/FKT/FR-94/51-SE, 1994.

2. Berg M, "An airspring model for dynamic analysis of rail vehicles", Division of Railway Technology, Dep. Of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology, 1999.

3. Göktan A. G. , "Havalı yaylarda sönüm", Doktara Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, 1982.

4. Sayyadi H., Shokouhi N., "Improvement of Passenger Ride Comfort in Rail Vehicles Equipped with Air Springs", World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009.

5. Eaton M. "A Mathematical Model of a Nonlinear Pneumatic Suspension System", ABB Daimler-Benz Transportation (Rolling Stock) Ltd, BD/TR/97/008, 1997.

6. Sayyadi H., Shokouhi N., "New Dynamic Model for Rail Vehicles and Optimazing Air Suspension Parameters Using GA", Transaction B: Mechanical Engineering Vol. 16, No. 6, pp. 496-512, Sharif University of Technology, 2009.

7. Berg M., "A Nonlinear Rubber Spring Model for Vehicle Dynamic Analysis", Division of Railway Technology, Kungl Tekniska Hogskolan, 1998.

8. Sihong Z., Jiasheng W., Ying Z., "Research on Theoretical Calculation Model for Dynamic Stiffness of Air Spring with Auxiliary Chamber", College of Engineering, Nanjing Agricultural University, 2008.

9. Presthus M., "Derivation of Air Spring Model Parameters for Train Simulation", Master of Science Program, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Fluid Mechanics, Lulea University of Technology, 2002.

10.Chang F., Lu Z. H., "Dynamic model of an air spring and integration into a vehicle dynamics model", State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, 2008.

11.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.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Ulaşım A.Ş. tarafından desteklenmektedir. Aktaş Group yetkililerine, hava yayı test imkânlarını paylaştıkları için teşekkür ederiz.

7. EK

Terminoloji		
Simge	Açıklama	Birim
A_e	Etkin alan	m^2
b	Birimsiz nonlineer sönüm katsayısı	
C	Hava yayı sönümü	N.s/m
C_{zb}	Boru sönümü	N.s/m
d_s	Boru çapı	m
F_{fz}	Sürtünme damperi	N
g	Yer çekimi ivmesi	m/s^2
K_1	Hava basıncı yay katsayısı	N/m
K_2	Ek depo yay katsayısı	N/m
K_3	Alan değişimi yay katsayısı	N/m
K_{ez}	Elastik yay katsayısı	N/m
k_t	Birimsiz kayıp katsayısı	
K_{vz}	Viskoz yay katsayısı	N/m
l_s	Boru uzunluğu	m
m	Araç ağırlığı	kg
M	Ek depodaki havanın ağırlığı	kg
n	Birimsiz polytropik katsayı	
p_a	Atmosfer basıncı	bar
p_{g0}	Basınç farkı	bar
p_0	İlk basınç	bar
q_0	Havanın yoğunluğu	kg/m^3
R_f	Birimsiz akış direnç katsayısı	
V_b	Hava yayı hacmi	m^3
V_r	Hava deposu hacmi	m^3