



HIZLI TREN KÖPRÜLERİNİN REZONANS TİTREŞİMLERİNİN AZALTILMASINDA SERİ BAĞLI AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLER

Onur Araz¹, Volkan Kahya²

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon

ABSTRACT

In this paper, series tuned mass dampers (STMDs) are considered for suppressing the vibration of railway bridges under high-speed trains. A railway bridge is modeled as an Euler-Bernoulli beam and a train is simulated as a series of moving forces. Numerical results from simply supported bridge under Eurostar train show that the proposed STMD is more effective than a single TMD in reducing dynamic responses during resonant speeds.

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek hızlı trenlerin (YHT) etkisindeki demiryolu köprülerinde meydana gelen titreşimlerin azaltılmasında seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicilerin (SAKS) kullanımı ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan köprü Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre, tren ise bir dizi hareketli kuvvetten meydana gelen kuvvet serisi olarak modellenmiştir. Eurostar YHT etkisindeki basit mesnetli bir köprü üzerinde gerçekleştirilen analizler, rezonans hızı altında meydana gelen titreşimlerin azaltılmasında SAKS'ın tek bir ayarlı kütle sönümleyiciye (AKS) göre daha etkili olduğunu göstermiştir.

GİRİŞ

Trenlerin rezonans hızında hareket etmesi köprülerin dinamik davranışlarında önemli artışa sebep olmaktadır. Bu durum emniyet ve seyir konforunu olumsuz yönde etkilemektedir. Ayarlı kütle sönümleyiciler kullanılarak söz konusu titreşimlerin azaltılması önemli bir çalışma konusudur. Son yıllarda birçok araştırmacı taşıt yükleri etkisinde köprülerde meydana gelen titreşimlerin azaltılmasında farklı AKS modellerini kullanmışlardır.

Kwon vd. [1], yüksek hızlı tren etkisindeki üç açıklıklı bir köprüde meydana gelen dinamik titreşimlerin azaltılmasında AKS'nin etkisini incelemişlerdir. Wang vd. [2], iki farklı açıklığa sahip demiryolu köprüsü ve üç farklı yüksek hızlı tren modeli kullanarak yapmış oldukları analizlerde, tek bir AKS kullanılarak dinamik tepkilerin azaltılması konusunda çalışmışlardır. AKS'nin optimum özelliklerin belirlenmesi amacıyla bir tasarım yöntemi önermişlerdir. Samani vd. [3], kirişlerde hareketli yükler altında meydana gelen titreşimlerin azaltılmasında lineer ve nonlinear sönümleyicilerin performansını incelemişlerdir.

AKS kontrol sistemleri çoğunlukla yapının hâkim periyotlarına göre ayarlanmakta ve böylece bu mod üzerinde meydana gelen titreşimlerin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Yapıya ait frekansın belirlenmesinde veya AKS'nin üretim aşamasında yaşanan aksaklıklar öngörülen titreşim performansında azalmaya yol açmaktadır. Söz konusu durum literatürde frekans kayması (detuning effect) olarak bilinmektedir. Buna karşılık araştırmacılar, kontrol sisteminin tek bir frekans yerine bir belli bir frekans aralığında olmasının frekans kayması problemine karşılık etkili olacağını öne sürmüşlerdir. Bu amaçla, tek bir AKS yerine aynı kütle oranına sahip fakat geniş frekans aralığında etkili paralel AKS (PAKS) sistemini önermişlerdir. Bu kontrol sistemi, farklı frekanslara sahip birden fazla AKS'nin birbirine paralel olarak bağlanmasıyla meydana gelmektedir.

Yau ve Yang [4], yüksek hızlı tren etkisindeki kablolu köprüde çoklu rezonans titreşimlerinin karma PAKS sistemi kullanılarak azaltılması üzerine çalışmışlardır. Benzer yaklaşımı kullanarak, iki açıklıklı kafes köprüsündeki dinamik davranışın azaltılmasında geniş bantlı PAKS sisteminin performansını incelemişlerdir [5]. Lin vd. [6], tek açıklığa sahip demiryolu köprüsünde tren yükleri (Almanya ICE, Fransa TGV ve Japonya SKS) nedeniyle meydana gelen titreşimin PAKS kullanılarak azaltılmasını çalışmışlardır. PAKS sisteminin rezonans titreşimlerinin azaltılmasında tek bir AKS ye göre daha etkili olduğunu bildirmişlerdir. Li vd. [7], demiryolu köprülerindeki titreşimlerin çoklu AKS sistemi kullanılarak azaltılması üzerine çalışmışlardır. Yapmış oldukları analizlerde, bant genişliğinin, AKS sayısının ve sönüm oranının AKS sisteminin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Luu vd. [8], yüksek hızlı trenlerin etkisindeki demiryolu köprülerinde titreşimin azaltılması amacıyla kullanılan ayarlı kütle sönümleyicilerin optimum tasarım parametrelerinin elde edilmesi için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir.

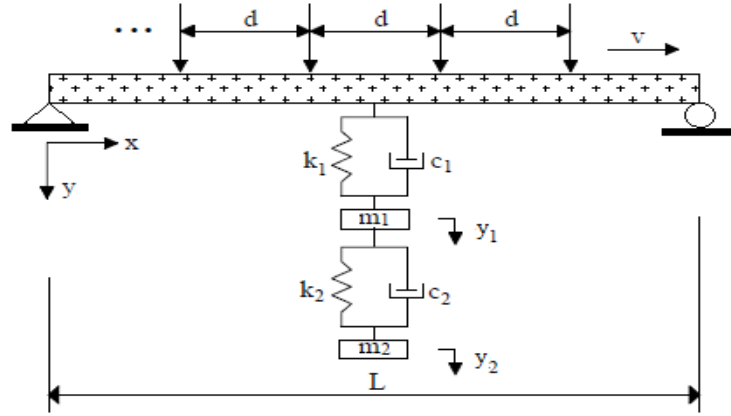
Li ve Zhu [9], birbirine seri olarak bağlı iki aks den meydana gelen bir sönümleyici modelinin yer ivmesinin azaltılması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Zuo [10], bir birine seri olarak bağlı yeni bir ayarlı kütle sönümleyici modeli önermiştir. Benzer kütle oranlarına karşılık SAKS'nin diğer sönümleyici modellerine göre daha etkili olduğu bildirmiştir.

AKS ve PAKS sistemleri taşıt yüklerinin yapılarda sebep olduğu titreşimlerin azaltılmasında birçok araştırmacı tarafından kullanılmasında karşın, SAKS sistemi söz konusu titreşimlerin azaltılmasında henüz kullanılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, hareketli yükler etkisindeki tek açıklıklı bir köprüde meydana gelen titreşimlerin azaltılmasında SAKS modelinin etkinliğini incelemektir. SAKS modeline ait optimum parametreler, maksimum yer değiştirme değerinin azaltılması kriteri kullanılarak elde edilmiştir.

PROBLEM TANIMI

Yüksek hızlı tren (YHT) etkisindeki tek açıklıklı bir köprünün orta noktasına yerleştirilen seri bağlı ayarlı kütle sönümleyici (SAKS) modeline ait gösterim Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de ele alınan probleme ait çözümün elde edilmesi amacıyla $(n+2)$ hareket denklemine ihtiyaç duyulmaktadır. Burada, n kirişe ait mod sayısını göstermektedir. Elastik kirişin tren ve SAKS etkisi altındaki dinamik davranışı aşağıdaki diferansiyel denklem ile ifade edilmektedir.

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m_b \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + c_b \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = F(x,t) + F_s(x,t) \quad (1)$$



Şekil 1. Seri bağlı ayarlı kütle sönümleyici modeli

Burada, EI eğilme rijitliği, m_b birim uzunluğun kütlesi, x kiriş eksen koordinatı, t zaman, $y(x,t)$ kirişin enine yer değiştirmesi, c_b kirişe ait sönüm katsayısıdır. Eşitliğin sağ tarafındaki yük terimleri ise sırasıyla

$$F(x,t) = \sum_{k=1}^K P \delta[x - (vt - d_k)] \left(H(t - \frac{d_k}{v}) - H(t - \frac{d_k + L}{v}) \right) \quad (2)$$

$$F_s(x,t) = (c_1 [\dot{y}_1(t) - \dot{y}(x_s, t)] + k_1 [y_1(t) - y(x_s, t)]) \delta(x - x_s) \quad (3)$$

şeklinde tanımlıdır. Burada, v tren hızı, d_k kirişin başlangıcıyla k . yük arasındaki mesafe, K aks yüklerinin toplam sayısı, P uygulanan dış kuvvet, x_s SAKS'nin kiriş üzerindeki yeri, L kiriş açıklığı, $\delta(\dots)$ ve $H(\dots)$ ise sırasıyla Dirac delta ve Heaviside fonksiyonlarıdır. SAKS için hareket denklemleri sırasıyla (4) ve (5) ifadelerinde verilmektedir.

$$m_1 \ddot{y}_1(t) + c_1 [\dot{y}_1(t) - \dot{y}(x_s, t)] + k_1 [y_1(t) - y(x_s, t)] - c_2 [\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] - k_2 [y_2(t) - y_1(t)] = 0 \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{y}_2(t) + c_2 [\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] + k_2 [y_2(t) - y_1(t)] = 0 \quad (5)$$

$\phi_n(x)$ ve $q_n(t)$ sırasıyla n . moda ait mod fonksiyonu ve genelleştirilmiş koordinatlar olmak üzere (1) ifadesinde verilen diferansiyel denkleminin çözümü,

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^N q_n(t) \phi_n(x) \quad (6)$$

şeklinde alınıp (1) ifadesinde yerine yazıldıktan sonra elde edilen denklemin her iki tarafı $\phi_j(x)$ ile çarpılıp 0 dan L ye kadar integrali alındıktan sonra ortogonalite şartları dikkate alınır

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = \frac{2}{mL} [F(x,t) + F_s(x,t)] \quad (7)$$

elde edilir. (7) denkleminin sağ tarafındaki ifadeler

$$F(x,t) = \sum_{k=1}^K P \sin \frac{n\pi(vt - d_k)}{L} \left(H(t - \frac{d_k}{v}) - H(t - \frac{d_k + L}{v}) \right) \quad (8)$$

$$F_s(x,t) = \sin \frac{n\pi x_s}{L} \left(c_1 \left[\dot{y}_1(t) - \sum_{j=1}^N \sin \frac{j\pi x_s}{L} \dot{q}_j(t) \right] + k_1 \left[y_1(t) - \sum_{j=1}^N \sin \frac{j\pi x_s}{L} q_j(t) \right] \right) \quad (9)$$

şeklinde (6) ifadesinin (4) ve (5) ifadelerinde yazılmasıyla

$$m_1 \ddot{y}_1(t) + c_1 \left[\dot{y}_1(t) - \sum_{j=1}^N \dot{q}_j \sin \frac{j\pi x_s}{L} \right] + k_1 \left[y_1(t) - \sum_{j=1}^N q_j \sin \frac{j\pi x_s}{L} \right] - c_2 [\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] - k_2 [y_2(t) - y_1(t)] = 0 \quad (10)$$

$$m_2 \ddot{y}_2(t) + c_2 [\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] + k_2 [y_2(t) - y_1(t)] = 0 \quad (11)$$

elde edilir. (7), (10) ve (11) denklemlerinin sayısal çözümü Newmark metodu ile yapılacaktır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Mod süperpozisyon yöntemi kullanılarak, yüksek hızlı tren etkisindeki tek açıklı köprüde meydana gelen titreşimler farklı sönümleyici modelleri kullanılarak azaltılmıştır. Sayısal sonuçlar için kirişin elastisite modülü $E = 28,2$ GPa, atalet momenti $I = 17,9$ m⁴, birim uzunluğun kütlesi $m = 38240$ kg/m, kiriş uzunluğu $L = 40$ m, sönüm oranı $\zeta = \%2,5$ ve 1. doğal frekans $\omega_1 = 22,41$ rad/s olarak alınmıştır [6]. Dinamik analizlerde hareketli yük modeli olarak Avrupa'da kullanılmakta olan Eurostar HST modeli seçilmiştir.

Tek açıklıklı bir köprü üzerinde hareketli yüklerin sebep olduğu rezonans titreşimi üzerinde köprünün doğal açısal frekansının yanında vagon genişliği de etkili olmaktadır.

$$v_p = \frac{\omega_1 d}{2\pi p} \quad (p = 1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

Burada, d = vagon genişliği, ω_1 = köprünün 1. titreşim moduna karşılık gelen doğal açısal frekansı, ve p = rezonans sayısıdır. 12 nolu ifadeye göre, köprünün 1. moduna karşılık gelen 1. rezonans hızı $v_1 = 66,7$ m/s = 240,12 km/h olarak elde edilmektedir.

Tablo 1 ve 2'de SAKS ve PAKS sistemlerine ait optimum parametreler verilmiştir. Her bir AKS sistemine ait toplam kütle kirişin toplam kütlesinin %2 olarak seçilmiştir. Optimum parametreler kirişin orta noktasındaki maksimum yer değiştirmenin minimuma indirilmesi kriterine bağlı olarak MATLAB paket programı içerisindeki *fmincon* araç kutusu kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 3'de tren hızındaki değişime bağlı olarak köprünün orta noktasında elde edilen yer değiştirme ve ivmelerin köprünün sağ mesnedi için ise dönme açıları için maksimum değerleri verilmiştir. Tablo 3'den görüleceği üzere SAKS sistemi her üç dinamik tepkinin azaltılmasında diğer AKS sistemlerine göre azda olsa daha iyi sonuç vermektedir. Tablo 4'de AKS sistemleri için belirlenen optimum frekans değerlerinde ± 10 luk bir hatanın olması durumunda dinamik tepkiler ve bu tepkilerde kontrolsüz sisteme göre elde edilen azalma oranları gösterilmiştir. Tablo 4'de elde edilen azalma oranları Tablo 3'le kıyaslandığında, optimum frekans değerlerinde meydana gelen hata AKS sisteminden beklenen performans seviyesinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu bakımdan AKS sistemine ait optimum özelliklerin üretim aşamasında doğru bir şekilde tatbik edilmesi son derece önemlidir. Tablo 3-4'de tren hızı $v = 0-350$ km/sa aralığında 2,5 km/sa'lık artımla göz önüne alınmıştır.

Şekil 2a-b'de, tren hızındaki değişime bağlı olarak köprü orta noktasında elde edilen maksimum dinamik yer değiştirme ve ivme değerleri üzerinde farklı AKS sistemlerinin etkisi gösterilmiştir. Benzer grafik Şekil 2c'de sağ mesnetteki maksimum dönme değerleri için verilmiştir. Şekil 2a-c'de görüldüğü gibi AKS sistemlerinin tren etkisi altında köprüde

meydana gelen dinamik davranışların azaltılmasında son derece etkili olduğu görülmektedir. Dinamik davranış üzerinde meydana gelen en büyük azalma trenin rezonans ($v=240$ km/sa) hızında hareket etmesi durumunda elde edilmektedir. Ayrıca, Şekil 2a-c'den görüleceği üzere PAKS ve SAKS sistemlerinin dinamik davranışın azaltılması üzerinde bir AKS den oluşan sisteme göre daha etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 1, SAKS sistemine ait optimum parametreler

μ	β_1	β_2	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)
0,114	1,046	0,932	0,000	20,3

Tablo 2, PAKS sistemine ait optimum parametreler

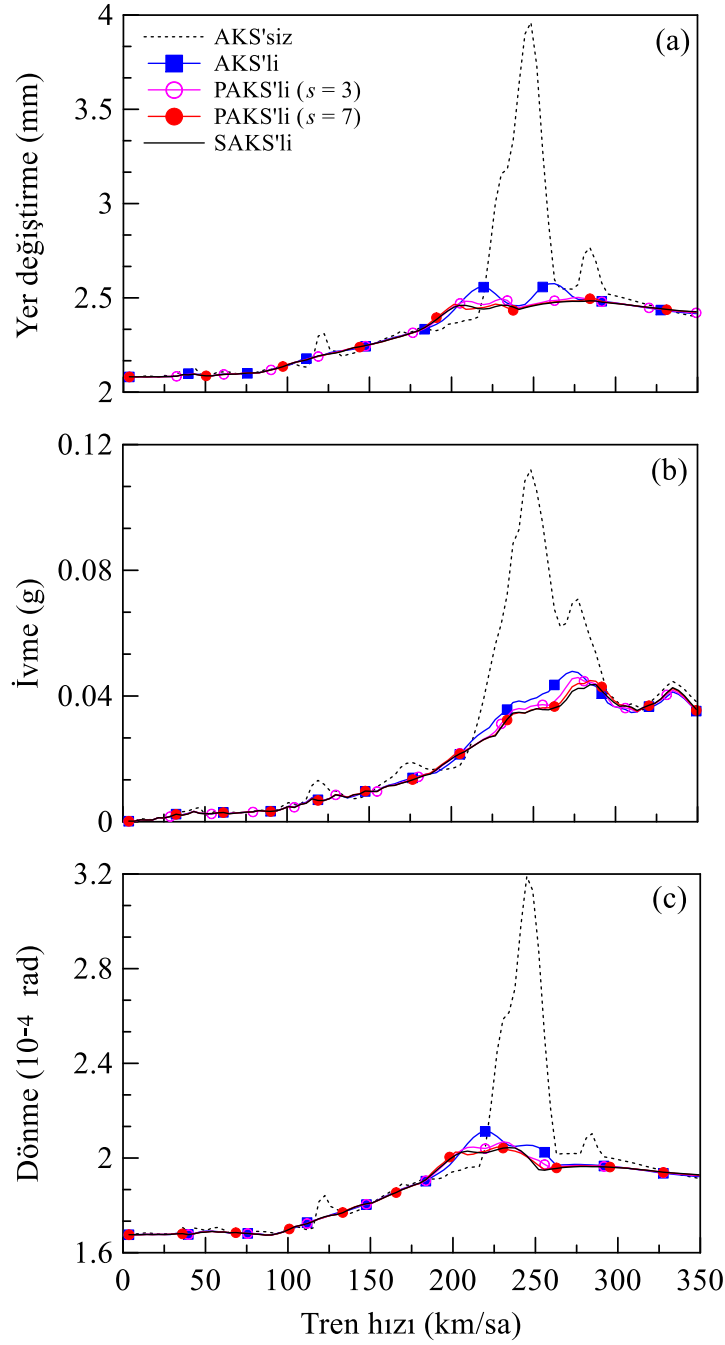
AKS sayısı (s)	ζ_j (%)	$\beta_j = \omega_j / \omega_n, \quad j = 1, 2, \dots, s$
1	13,7	0,958
3	7,2	0,879, 0,980, 1,081
7	4,1	0,843, 0,891, 0,939, 0,988, 0,1,036, 1,085, 1,133

Tablo 3, Farklı AKS sistemleri için köprüde elde edilen maksimum dinamik tepkiler

Durum	Yer değiştirme (mm)	İvme (g)	Dönme (10^{-4} rad)
AKS'siz	3,960	0,1120	3,1891
AKS'li	2,575 (% 34,98)	0,0478 (% 57,28)	2,1126 (% 33,75)
PAKS'lı (s=3)	2,502 (% 36,82)	0,0459 (% 59,02)	2,0688 (% 35,13)
PAKS'lı (s=7)	2,496 (% 36,98)	0,0449 (% 59,88)	2,0461 (% 35,84)
SAKS'lı	2,484 (% 37,27)	0,0437 (% 61,02)	2,0437 (% 35,92)

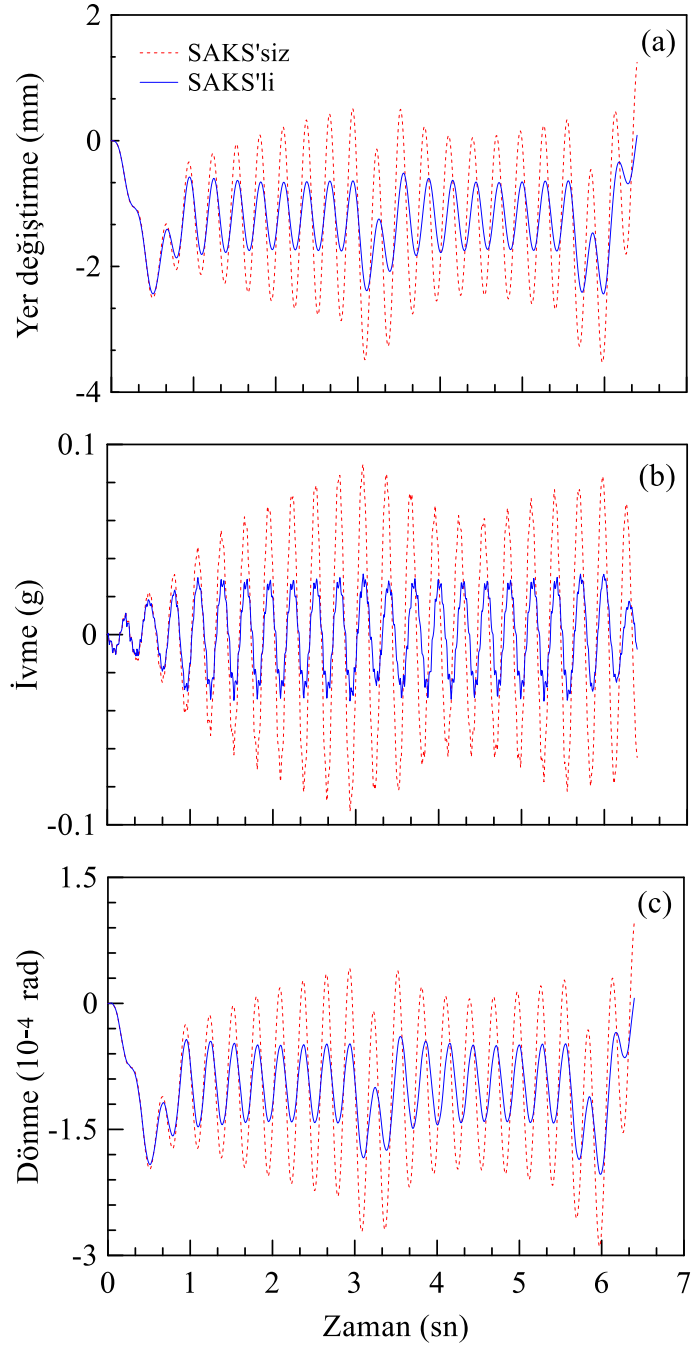
Tablo 4, AKS frekansındaki olası hataların köprünün dinamik davranışı üzerindeki etkisi

Hata (%)	Durum	Yer değiştirme (mm)	İvme (g)	Dönme (10^{-4} rad)
% -10	AKS'siz	3,960	0,1120	3,1891
	AKS'li	2,830 (% 28,55)	0,0560 (% 50,00)	2,2832 (% 28,41)
	PAKS'lı (s=3)	2,839 (% 28,32)	0,0585 (% 47,73)	2,2558 (% 29,26)
	PAKS'lı (s=7)	2,895 (% 26,89)	0,0630 (% 43,77)	2,2620 (% 29,07)
	SAKS'lı	2,818 (% 28,86)	0,0617 (% 44,93)	2,2034 (% 30,91)
% +10	AKS'siz	3,960	0,1120	3,1891
	AKS'li	2,837 (% 28,35)	0,0498 (% 55,52)	2,3397 (% 26,63)
	PAKS'lı (s=3)	2,780 (% 29,82)	0,0423 (% 62,26)	2,2919 (% 28,13)
	PAKS'lı (s=7)	2,786 (% 29,64)	0,0418 (% 62,69)	2,2933 (% 28,09)
	SAKS'lı	2,723 (% 31,24)	0,0418 (% 62,69)	2,2437 (% 29,65)



Şekil 2. Tren hızına karşılık köprünün dinamik davranışındaki değişim

Şekil 3a-c'de görüldüğü gibi SAKS'li ve SAKS'siz durumları için köprü orta noktasındaki yer değiştirme ve ivme değerlerinin, köprünün sağ mesnette ise dönme değerlerinin zamana göre değişimi verilmiştir. Köprü üzerinde SAKS olması durumunda yer değiştirme, ivme ve dönme için elde edilen maksimum tepkiler sırasıyla 2,434 mm, 0,343g ve $2,035 \times 10^{-4}$ rad şeklindedir. Köprü üzerinde SAKS olması durumunda ise bu değerler 3,528 mm 0,912g ve $2,896 \times 10^{-4}$ rad olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. Rezonans hızında köprüdeki dinamik tepkilerin zamanla değişimi

SONUÇLAR

Bu çalışmada, SAKS sistemin tek açıklıklı bir köprüde meydana gelen rezonans titreşimlerinin azaltılması üzerindeki etkisi mevcut sistemlerle mukayese edilerek incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, SAKS ve PAKS'ın dinamik tepkilerin azaltılmasında tek AKS'ye göre daha iyi olduğunu göstermiştir. SAKS ve PAKS'ın benzer performans göstermesine karşılık, SAKS'ın basit bir yapıya sahip olmasının hem ekonomik hem de uygulanma kolaylığı bakımından önemli avantaj sağladığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Kwon, H. C., Kim, M. C., Lee, I. W. (1998), "Vibration control of bridges under moving loads", *Computers & Structures*, 66(4), 473-480.
- [2] Wang, J.F., Lin, C.C., Chen, B.L. (2003), "Vibration suppression for high-speed railway bridges using tuned mass dampers", *International Journal of Solids and Structures*, 40, 465-491.
- [3] Samani, F.S., Pellicano, F., Masoumi, A. (2013), "Performances of dynamic vibration absorbers for beams subjected to moving", *Nonlinear Dynamics*, 73, 1065-1079.
- [4] Yau, J.D., Yang, Y.B. (2004), "Vibration reduction for cable-stayed bridges traveled by high-speed trains", *Finite Elements in Analysis and Design*, 40, 341-359.
- [5] Yau, J.D., Yang, Y.B. (2004), "A wideband MTMD system for reducing the dynamic response of continuous truss bridges to moving train loads", *Engineering Structures*, 26, 1795-1807.
- [6] Lin, C.C., Wang, J.F., Chen, B.L. (2005), "Train-induced vibration control of high-speed railway bridges equipped with multiple tuned mass dampers", *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 10(4), 398- 414.
- [7] Li, J., Su, M., Fan, L. (2005), "Vibration control of railway bridges under high-speed trains using MTMDs", *Journal of Bridge Engineering*, ASCE 10(3), 312-320.
- [8] Luu, M., Zabel, V., Könke, C. (2012), "An optimization method of multi-resonant response of high-speed train bridges using TMDs", *Finite Elements in Analysis and Design*, 53, 13-23
- [9] Li, C., Zhu, B. (2006), "Estimating double tuned mass dampers for structures under ground acceleration using a novel optimum criterion", *Journal of Sound and Vibration*, 298, 280-297.
- [10] Zuo, L. (2009), "Effective and robust vibration control using series multiple tuned-mass dampers", *Journal of Vibration and Acoustics*, 131, 031003.