Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 26, Sayı 1, 2021 ARAŞTIRMA

DOI: 10.17482/uumfd.852979

TAŞIT-KÖPRÜ ETKİLEŞİMİNİN KÖPRÜLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Onur ARAZ [*]

Alınma: 23.01.2021; düzeltme: 31.01.2021; kabul: 06.02.2021

Öz: Bu çalışmada, tek açıklıklı köprülerin hareketli asılı kütle etkisindeki dinamik davranışı incelenmiştir. Ele alınan probleme ait hareket denklemi değişken katsayılı kısmi türevli diferansiyel denklem şeklinde elde edilmiş ve Newmark yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Dinamik analizlerde hız parametresi, kütle oranı, frekans oranı ve köprünün sönüm oranının köprünün ve taşıtın dinamik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar şekiller ve tablolar halinde sunulmuştur. Sonuçlar, dikkate alınan parametrelerin köprünün dinamik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik Davranış, Hareketli taşıt, Köprü, Rezonans

Effect of Vehicle-Bridge Interaction on the Dynamic Behavior of Bridges

Abstract: In this study, dynamic behavior of single span bridges under moving sprung mass is investigated. The equation of motion of the problem under consideration is obtained as a partial differential equation with variable coefficients and solved numerically by Newmark method. In dynamic analyzes, the effects of the speed parameter, mass ratio, frequency ratio and damping ratio of the bridge on the dynamic behavior of the bridge and the vehicle are investigated. The results obtained from the analysis are presented in figures and tables. The results have shown that the parameters taken into account have a significant influence on the dynamic behavior of the bridge.

Keywords: Dynamic behavior, Moving vehicle, Bridge, Resonance

[*] İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane 29100, Türkiye. İletişim Yazarı: Onur Araz (onuraraz29@hotmail.com)

1. GİRİŞ

Trafik yüklerinin etkisindeki köprülerin tasarımında taşıt-köprü etkileşimin dikkate alınması son derece önemlidir. Bilindiği üzere, dinamik bir yükün köprü üzerinde meydana getirdiği dinamik etki çoğu durumda statik durumda meydana getirdiği etkiden daha büyüktür. Bu nedenle, hareketli yüklerin etkisindeki köprülerin dinamik davranışının incelenmesi yapı mühendisleri açısından önemli bir çalışma konusudur. Bu çalışmaların önemli kısmında Çin, Fransa, Almanya ve Japonya gibi yüksek hızlı ulaşım ağına sahip ülkelerin rolü büyüktür. Ulaşım ağı içerisinde yer alan araçların işletim hızlarında ve aks yüklerindeki artışla birlikte bu alanda yapılan çalışmaların önemli bir kısmı taşıt-köprü etkileşim problemine yoğunlaşmıştır.

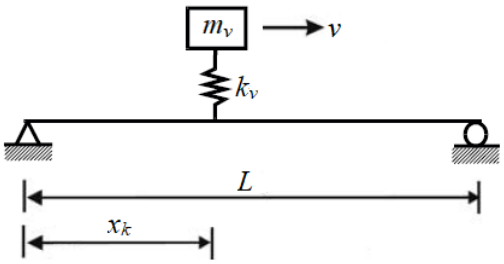
Hareketli yük etkisindeki köprülerin dinamik davranışını konu alan çalışmalar genellikle üç farklı gruba ayrılmaktadır. Bunlar, hareketli kuvvet, hareketli kütle ve hareketli taşıt modelidir. Hareketli kuvvet modelinde taşıtın atalet etkileri ihmal edilmektedir. Bu nedenle, bu model taşıt kütlesinin köprü kütlesine göre daha küçük olduğu durumlarda doğru sonuç vermektedir (Frýba, 1972; Pesterev ve diğ., 2003; Yang ve diğ., 2004; Wu, 2006; Museros ve diğ., 2013; Kahya ve diğ., 2015; Kumar ve diğ., 2015; Azeloğlu ve Kural, 2019; Ebrahimi-Mamaghani ve diğ., 2020). Araç kütlesinin köprü kütlesine göre küçük olmadığı ve taşıt hızının yük hızlara ulaştığı durumlarda, hareketli kuvvet modeli yerine araç atalet etkilerinin dikkate alındığı hareketli kütle modeli tercih edilmektedir (Frýba, 1972; Ting ve diğ., 1974; Stanisic, 1985; Akin ve Mofid, 1989; Mofid ve Akin, 1996; Esmailzadeh ve Ghorashi, 1997; Yavari ve diğ., 2002; Karimi ve Ziaei-Rad, 2015; Abu-Alshaikh ve Almbaidin, 2020). Bu modelde, köprü ile araç arasındaki temasın sürekli olmasından dolayı yol düzensizlikleri dikkate alınmamaktadır. Hareketli taşıt modelinde ise taşıt kütle-yay-damper elemanları ile modellenir. Bu şekilde farklı serbestlik derecelerine sahip taşıtlar modellenerek taşıtın yapabileceği tüm hareketler ve yol düzensizlikleri dikkate alınmaktadır (Biggs, 1964; Frýba, 1972; Green ve Cebon, 1997; Pesterev ve diğ., 2001; Yang ve diğ., 2004; Xiang ve diğ., 2007; Gao ve diğ., 2014; Yang ve diğ., 2014; Yin, 2016; Hirzinger ve diğ., 2020; Vatan Can ve Öztürk, 2020). Yukarıda verilen çalışmalar, genellikle dinamik tepkilerin elde edilmesinde kullanılan yönteme göre farklılık göstermektedir.

Taşıt-köprü etkileşimin göz önüne alındığı çalışmalarda taşıt modeli olarak çoğunlukla asılı kütle modeli kullanılmaktadır. Bu model, taşıt kütlesi, tekerlek kütlesi, taşıt rijitliği ve taşıt sönümü olmak üzere 4 farklı parametreyle temsil edilmektedir. Köprülerin dinamik davranışı üzerinde düşük etkiye sahip olmaları nedeniyle tekerlek kütlesinin ve taşıt sönümünün etkisi ihmal edilmektedir (Yang ve diğ., 2004). Bu nedenle, çalışmaların büyük çoğunluğunda asılı kütle modeli iki parametreyle temsil edilmiştir.

Bu çalışmada, hareketli asılı kütle modeli etkisindeki tek açıklıklı bir köprünün dinamik davranışı incelenmiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak dinamik analizlerde taşıt modeline ait fiziksel özelliklerdeki ve tren hızındaki değişim dikkate alınmıştır. Mod süperposizyon metodu kullanılarak köprüye ve taşıta ait hareket denklemleri elde edilmiş ve Newmark yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Dinamik analizlerde, taşıtın kütle ve frekans oranının, hız parametresinin ve köprüye ait sönüm oranının köprünün ve taşıtın dinamik davranışı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

2. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Problemin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Problemin hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 1:
Tek açıklıklı kiriş üzerinde hareket eden asılı kütle modeli

$$EIy^{iv}(x,t)+m\ddot{y}(x,t)+c\dot{y}(x,t)=F(x,t) \tag{1}$$

$$m_v\ddot{z}(t)+k_v[z(t)-y(x_k,t)]=0 \tag{2}$$

Yukarıdaki ifadeler sırasıyla kirişe ve taşıta ait hareket denklemlerini göstermektedir. Burada, $y(x,t)$, EI, m ve c sırasıyla kirişin düşey yöndeki yer değiştirmesini, eğilme rijitliğini, birim kütlesini ve sönümünü göstermektedir. $z(t)$, m_v ve k_v ise sırasıyla taşıtın yer değiştirmesi, kütlesi ve rijitliğidir.

(1) ifadesinde yer alan kuvvet fonksiyonu ise aşağıda tanımlanmıştır.

$$F(x,t)=\left\{m_v g+k_v[z(t)-y(x_k,t)]\right\}\delta(x-x_k) \tag{3}$$

Burada, $x_k = vt$ dir. $\delta(\cdot)$ ise Dirac delta fonksiyonudur.

Problemin sınır şartları

$$y(0,t)=y(L,t)=-EI\frac{\partial^2 y(0,t)}{\partial x^2}=EI\frac{\partial^2 y(L,t)}{\partial x^2}=0 \tag{4}$$

şeklindedir.

$\varphi_n(x)$ ve $q_n(t)$ sırasıyla n. moda ait mod fonksiyonu ve genelleştirilmiş koordinatlar olmak üzere çözüm

$$y(x,t)=\sum_{i=1}^{\infty}q_n(t)\varphi_n(x) \qquad (n=1,2,3,...,\infty) \tag{5}$$

şeklinde kabul edilip (1) denkleminde yerine yazıldıktan sonra bu ifadenin her iki tarafı $\varphi_n(x)$ ile çarpılır ve 0'dan L'ye integrali alınırsa

$$\ddot{q}_n(t)+2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t)+\omega_n^2 q_n(t)=\frac{2F_n(t)}{m_b L} \tag{6}$$

elde edilir. Burada, ξ_n *n.* moda ait sönüm oranını göstermektedir. ω_n ise kirişin *n.* moda ait açısal frekansı olup aşağıdaki ifadeyle

$$\omega_n = \frac{n^2\pi^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{m}} \tag{7}$$

elde edilmektedir.

$F_n(t)$ ise eşitlik (8)'de tanımlanmıştır.

$$F_n(t) = m_v g\varphi_n(x_k) + k_v z(t)\varphi_n(x_k) - \sum_{i=1}^{N} k_v q_i \varphi_i(x_k)\varphi_n(x_k) \tag{8}$$

şeklindedir. (5) çözümü (2) ifadesinde yazılırsa

$$m_v \ddot{z}(t) + k_v\left[z(t) - \sum_{i=1}^{N} q_i(t)\varphi_i(x_k)\right] = 0 \tag{9}$$

elde edilir.

(6) ve (9) ifadeleri matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P} \tag{10}$$

Burada, **M**, **C** ve **K** sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$ ve $\mathbf{u}$ ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini; **P** ise kuvvet vektörünü göstermektedir. Bu ifadede,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & 1 & \\ & & & & m_v \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & & & & \\ & 2\xi_2\omega_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & 2\xi_N\omega_N & \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 + \kappa\Theta_{11} & \kappa\Theta_{21} & \cdots & \kappa\Theta_{N1} & -\kappa\Theta_1 \\ \kappa\Theta_{12} & \omega_2^2 + \kappa\Theta_{22} & \cdots & \kappa\Theta_{N2} & -\kappa\Theta_2 \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \kappa\Theta_{1N} & \kappa\Theta_{2N} & \cdots & \omega_N^2 + \kappa\Theta_{NN} & -\kappa\Theta_N \\ -k_v\Theta_1 & -k_v\Theta_2 & \cdots & -k_v\Theta_N & k_v \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\mathbf{P} = \frac{2m_v g}{mL}\begin{Bmatrix} \sin(\pi vt / L) \\ \sin(2\pi vt / L) \\ \vdots \\ \sin(Nvt / L) \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{14}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & \cdots & q_N & z \end{bmatrix}^T \tag{15}$$

$$\kappa = \frac{2k_v}{mL} \tag{16}$$

$$\Theta_{in} = \varphi_i(x_k)\varphi_n(x_k) \tag{17}$$

şeklinde tanımlıdır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, hareketli taşıt etkisindeki tek açıklıklı köprünün dinamik davranışı Newmark metodu kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan köprünün açıklığı 25m, birim uzunluğunun kütlesi 4800kg/m, eğilme rijitliği $3.3\text{x}10^9$ Nm^2 ve köprünün 1. moduna ait açısal frekans değeri ise 13.0935 rad/s dir. Sayısal sonuçların elde edilmesinde köprünün ilk beş modu dikkate alınmıştır.

Köprü ve taşıta ait dinamik tepkilerin elde edilmesinde dört farklı boyutsuz parametre kullanılmıştır. Bu parametreler, hız parametresi α, frekans oranı λ, kütle oranı μ ve köprünün sönüm oranı ξ dır. Hız parametresi yük frekansının köprünün hâkim frekansına oranı, frekans oranı taşıt frekansının köprünün frekansına oranı, kütle oranı ise taşıt kütlesinin köprünün kütlesine oranıdır. Bu parametreler sırasıyla aşağıdaki ifadelerde tanımlanmış olup analizlerde kullanılan değerler ise Tablo 1'de verilmiştir. 208 farklı hız parametresi göz önüne alındığından her bir parametrenin incelenmesinde 832 adet analiz yapılmıştır. Sonuç olarak, 3 boyutsuz parametre için 2496 adet hareketli kuvvet için 208 adet olmak üzere toplamda 2704 adet analiz yapılmıştır.

$$\lambda = \frac{\omega_v}{\omega_1} = \frac{\sqrt{k_v / m_v}}{\frac{\pi^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{m}}} \tag{18}$$

$$\alpha = \frac{n\pi v}{\omega_1 L} \quad n = 1, 2, ..., N \tag{19}$$

$$\mu = \frac{m_v}{mL} \tag{20}$$

Tablo 1. Çalışmada kullanılan boyutsuz parametrelere ait değerler

Boyutsuz parametre	Aralık
λ	0.01, 0.25, 0.50 ve 1.00
μ	0.01, 0.3, 0.5 ve 1.00
α	0.0048, 0.0096, …, 1.00
ξ (%)	0, 1, 3 ve 5

Tablo 2. Boyutsuz hız parametresine karşılık gelen hız değerleri

α	v (km/sa)
0.0048	1.80
0.1	37.51
0.3	112.53
0.5	187.55
0.7	262.57
0.9	337.59
1	375.10

Tablo 2'de boyutsuz hız parametresine karşılık gelen taşıt hızları verilmiştir. Hız parametresine ait ilk değer dinamik yer değiştirme değerinin statik yer değiştirmeye karşılık gelmesi açısından 0.0048 seçilmiştir. Bilindiği üzere, hareketli yükün çok düşük hızlarda seyir etmesi halinde meydana gelen dinamik yer değiştirme değeri o yükün statik olarak etkimesi halindeki yer değiştirme değerine yaklaşık olarak eşittir. Dinamik analizlerde, taşıt hızı 1.8km/sa ile 375.10km/sa arasında 1.8km/sa lik artımlarla değiştirilmiştir.

Tablo 3. Asılı kütle modelinin köprünün açısal frekansları üzerindeki etkisi (rad/s)

Mod	Yüksüz kiriş	$\lambda = 0.5$ ve $\mu = 0.5$	$\lambda = 1$ ve $\mu = 0.5$
1	13.09	6.55	13.09
2	52.37	13.09	13.09
3	117.84	52.37	52.37
4	209.50	117.84	117.84
5	327.34	209.50	209.50

Tablo 3'de köprünün yüklü ve yüksüz olması hali için elde edilen açısal frekans değerleri gösterilmiştir. Tablo 3'den görüleceği üzere köprü üzerinde taşıt olması halinde köprünün ilk frekansı taşıtın frekansına ikinci frekansı ise yüksüz durumdaki ilk frekansa eşit olmaktadır. Bununla birlikte diğer frekanslarda ise modlar birer atlayarak devam etmektedir.

Şekil 2-5'te, frekans oranına bağlı olarak köprünün ve taşıtın dinamik davranışında meydana gelen değişim görülmektedir. Bu şekillerin elde edilmesinde kütle oranı $\mu = 0.1$ ve köprünün sönüm oranı $\xi = 0.05$ alınmıştır. 4 farklı frekans oranı için elde edilen değerler hareketli kuvvet modeline (HK) ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

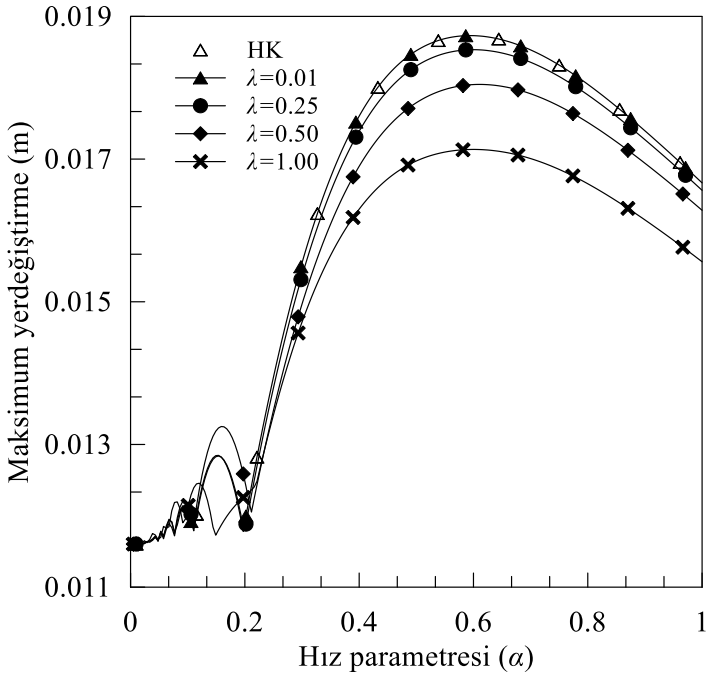
Şekil 2 ve 3'de, frekans oranına bağlı olarak köprünün orta noktasındaki en büyük yer değiştirme değerlerinin hız parametresiyle değişimi görülmektedir. Şekillerden görüleceği üzere, frekans oranının 0.01 olması durumunda elde edilen dinamik tepkiler hareketli kuvvet için elde edilen değerlerle büyük benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, düşük frekansa sahip asılı kütle modelinin hareketli kuvvet modeline karşılık geldiği söylenebilir. Ayrıca, hız parametresinin 0≤

$\alpha \leq 0.3$ aralığında olması durumunda elde edilen dinamik tepkilerde herhangi bir karşılaştırma yapmanın zor olduğu görülmektedir. Buna karşın, $0.3 \leq \alpha \leq 0.6$ aralığında hız parametresinde meydana gelen artış dinamik tepkilerin önemli ölçüde büyümesine neden olmaktadır. Hız parametresinin $\alpha > 0.6$ olması halinde ise dinamik tepkilerde azalma görülmektedir. Bu durum, taşıt hızının yüksek hızlara ulaşması nedeniyle yükün köprü üzerinde çok kısa süre kalması ile izah edilebilir. Şöyle ki, taşıt hızının 375km/sa olması durumunda taşıtın köprü üzerinde kalma süresi 0.24s olarak elde edilmektedir. Ayrıca, frekans oranındaki azalmanın dinamik tepki değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, en küçük tepkiler frekans oranının 1'e eşit olması durumunda elde edilmiştir. Bu durum, taşıtın köprü üzerinde ayarlı kütle sönümleyici gibi davranmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere, ayarlı kütle sönümleyiciler yapının temel frekansına yakın ayarlandıklarında dinamik tepkilerin azaltılması üzerinde son derece etkili olmaktadır (Araz, 2020; Kahya ve Araz, 2017, 2019; Araz ve Kahya, 2018, 2020).

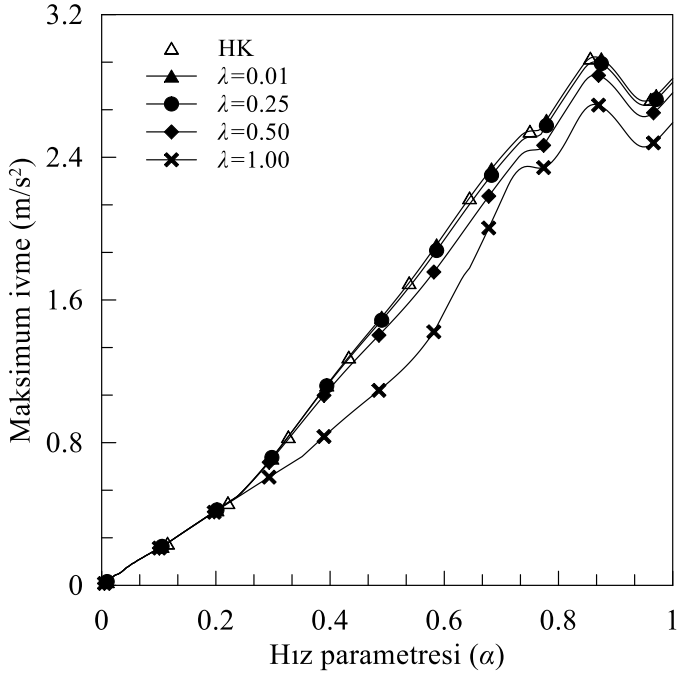
Taşıt için elde edilen maksimum yer değiştirme ve ivme değerlerinin frekans oranıyla değişimi Şekil 4 ve 5'de sırasıyla sunulmuştur. Şekillerden görüleceği üzere frekans oranındaki artışla birlikte dinamik değerleri de büyümektedir. Ayrıca, frekans oranındaki artış pik değerlerin daha büyük hız parametrelerinde oluşmasına neden olmaktadır. Frekans oranının 0.01'a eşit olması halinde asılı kütle modelinin hareketli kuvvet modeline karşılık geldiği yukarıda izah edilmiştir. Bu nedenle, $\lambda = 0.01$ değeri taşıta ait dinamik tepkilerin hesaplanmasında dikkate alınmamıştır.

Kütle oranının köprünün ve taşıtın dinamik davranışı üzerindeki etkisi Şekil 6-9'da sırasıyla gösterilmiştir. Bu şekillerin elde edilmesinde frekans oranı $\lambda = 1$ ve köprünün sönüm oranı $\xi = 0.05$ alınmıştır. Şekil 6 ve 7'de köprünün yer değiştirme ve ivme değerlerinin, Şekil 8 ve 9'da ise taşıtın yer değiştirme ve ivme değerlerinin hız parametresiyle değişimi gösterilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere, kütle oranındaki artış dinamik tepki değerlerinin önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Hız parametresinin düşük değerlerinde ($\alpha \leq 0.1$) kütle oranının ivme değerleri üzerindeki etkisi diğer hızlara göre nispeten daha düşüktür.

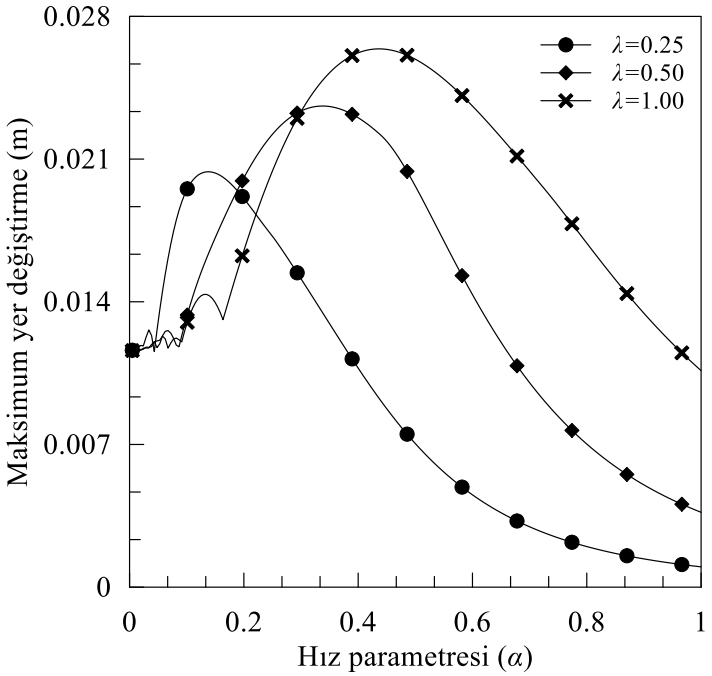
Köprüye ait sönüm oranının köprünün ve taşıtın dinamik davranışı üzerindeki etkisi Şekil 10-13'de sırasıyla gösterilmiştir. Bu şekillerin elde edilmesinde frekans oranı $\lambda = 1$ ve kütle oranı $\mu = 0.1$ alınmıştır. Şekil 10 ve 11'de köprünün yer değiştirme ve ivme değerlerinin, Şekil 12 ve 13'de ise taşıtın yer değiştirme ve ivme değerlerinin hız parametresiyle değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği üzere köprünün sönüm oranındaki artış hem köprünün hem de taşıtın dinamik tepki değerlerinde önemli azalma meydana getirmiştir.



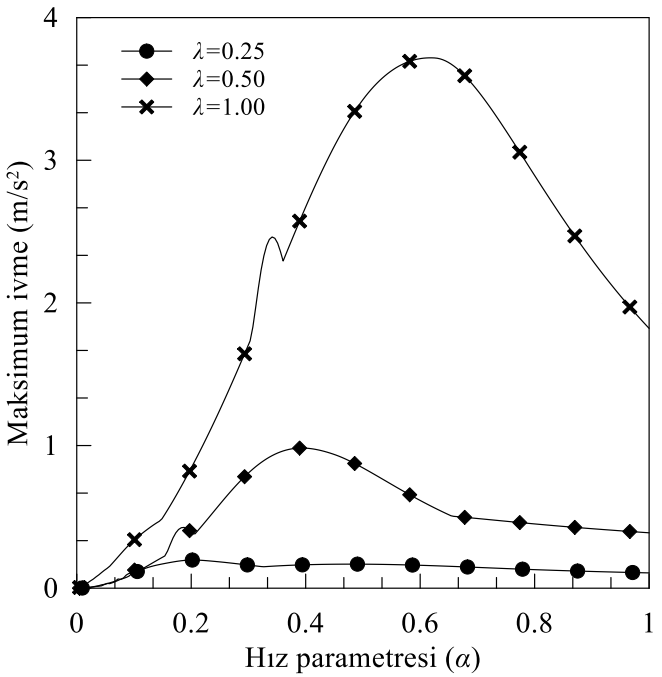
Şekil 2:
Frekans oranının maksimum yer değiştirme üzerindeki etkisi



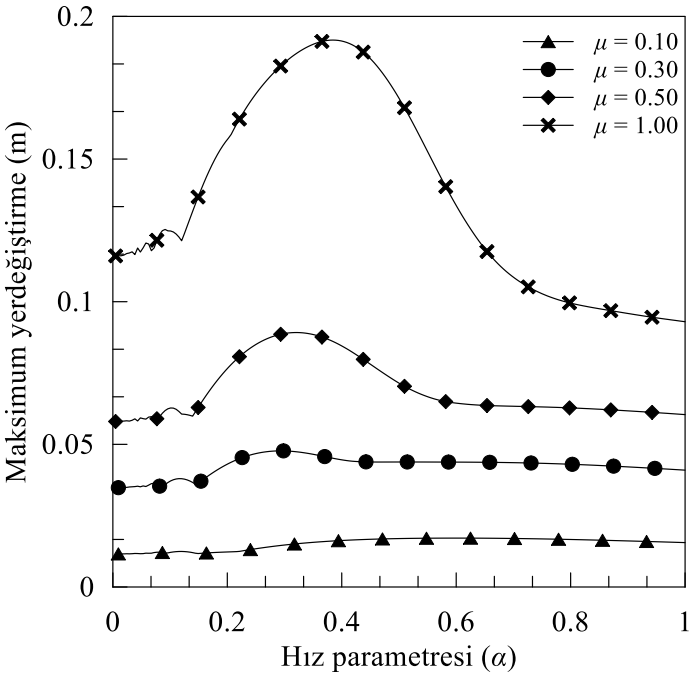
Şekil 3:
Frekans oranının maksimum ivme üzerindeki etkisi



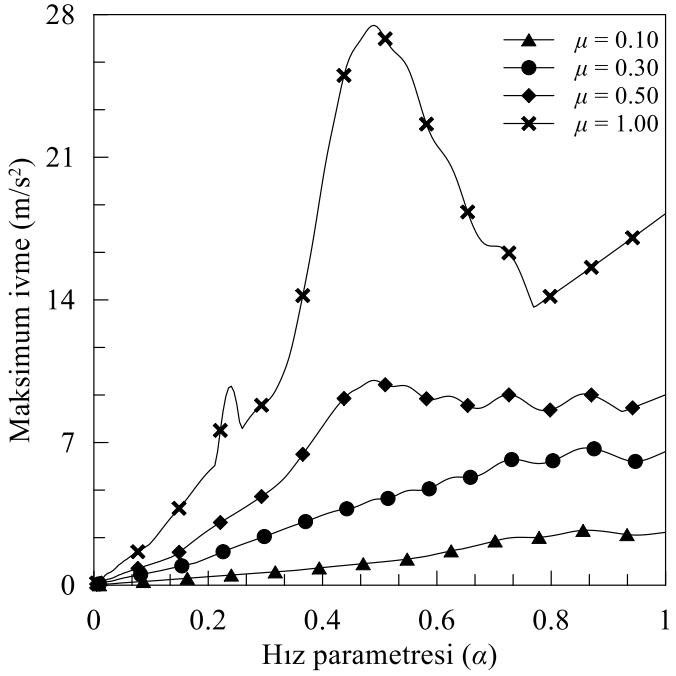
Şekil 4:
Frekans oranının maksimum yer değiştirme üzerindeki etkisi



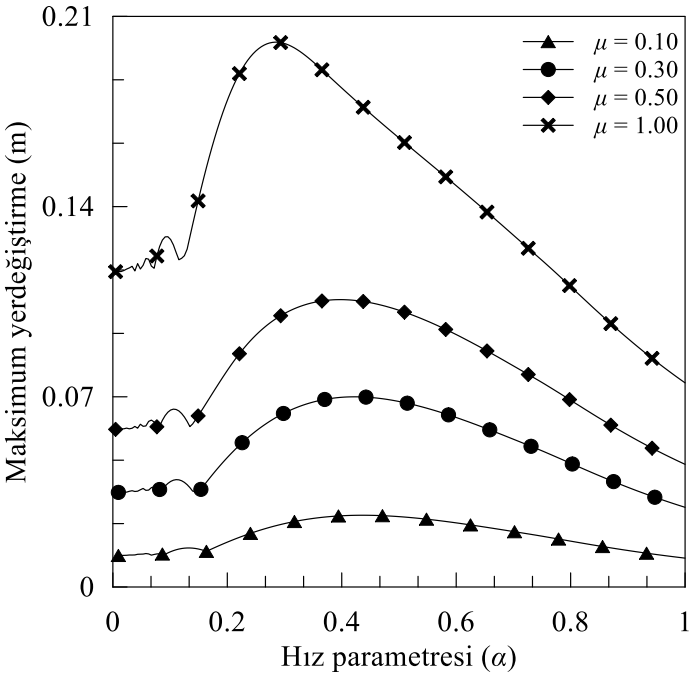
Şekil 5:
Frekans oranının maksimum ivme üzerindeki etkisi



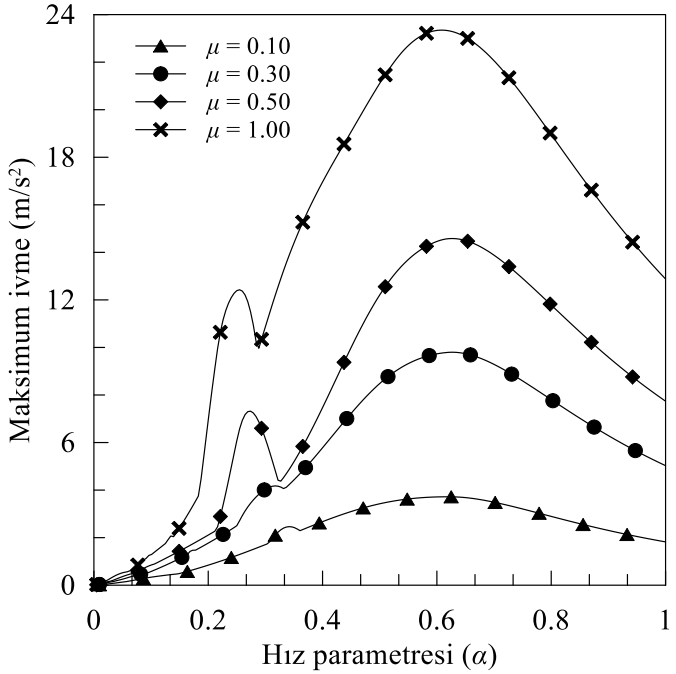
Şekil 6:
Kütle oranının maksimum yer değiştirme üzerindeki etkisi



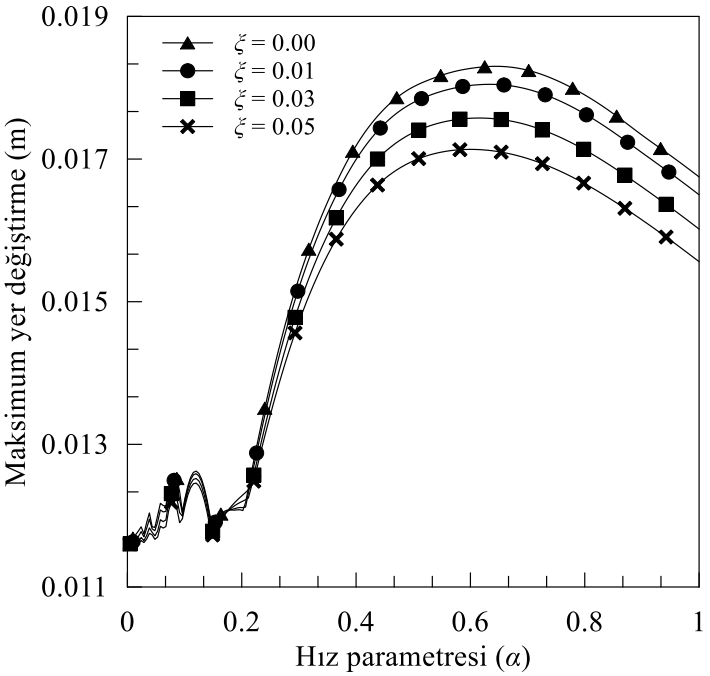
Şekil 7:
Kütle oranının maksimum ivme üzerindeki etkisi



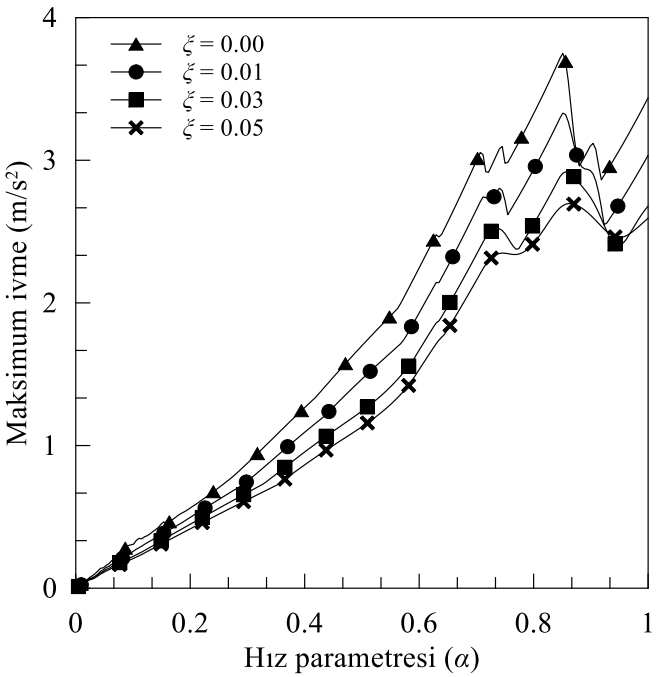
Şekil 8:
Kütle oranının maksimum yer değiştirme üzerindeki etkisi



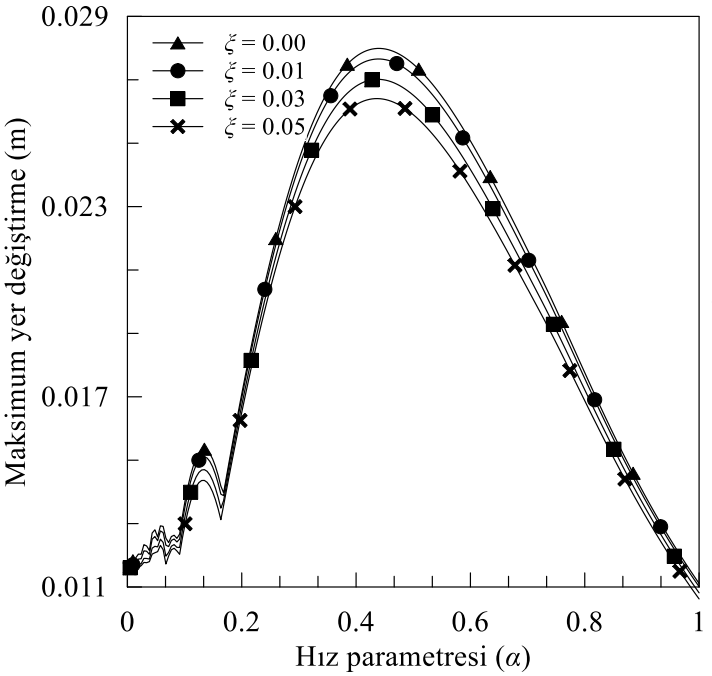
Şekil 9:
Kütle oranının maksimum ivme üzerindeki etkisi



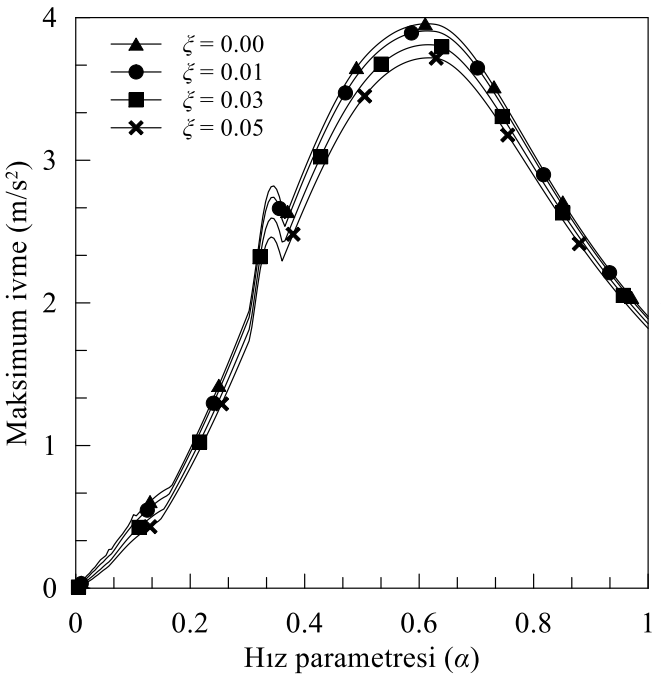
Şekil 10:
Sönüm oranının maksimum yer değiştirme üzerindeki etkisi



Şekil 11:
Sönüm oranının maksimum ivme üzerindeki etkisi



Şekil 12:
Sönüm oranının maksimum yer değiştirme üzerindeki etkisi



Şekil 13:
Sönüm oranının maksimum ivme üzerindeki etkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada hareketli asılı kütle etkisindeki tek açıklıklı köprünün dinamik davranışı Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Frekans oranının 0.01 olması halinde elde edilen sonuçlar hareketli kuvvet için elde edilen değerlerle büyük benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, düşük frekans oranına sahip asılı kütle modelinin, hareketli kuvvet modeline karşılık geldiği söylenebilir.

- Frekans oranının 1'e eşit olması halinde hareketli taşıt modelinin titreşim sönümleyici elaman gibi davrandığı görülmektedir.

- Köprüye ait en küçük dinamik tepkiler frekans oranının 1'e eşit olması durumunda elde edilmektedir. Buna karşın, aynı frekans değerinde taşıta ait dinamik tepkiler daha büyük elde edilmektedir.

- Hız parametresinin 0-0.25 aralığında olması halinde, frekans oranındaki değişimin köprünün ivme değerleri üzerinde etkili olmadığı görülmektedir.

- Kütle oranındaki artış hem köprünün hem de taşıtın dinamik tepkilerinde önemli bir artışa neden olmaktadır.

- Sönüm oranındaki artış hem köprünün hem de taşıtın dinamik tepkilerinde önemli bir azalmaya neden olmaktadır.

- Hareketli kuvvet etkisinde köprüde meydana gelen tepkiler asılı kütle modeline ait elde edilen tepkilere göre daha büyük elde edilmektedir.

- $0.3 \leq \alpha \leq 0.6$ aralığında hız parametresinde meydana gelen artış dinamik tepkilerin önemli ölçüde büyümesine neden olmaktadır. $0.6 \leq \alpha \leq 1.0$ aralığında ise dinamik tepkilerin giderek azaldığı görülmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Çalışmanın tamamı Onur ARAZ tarafından oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Abu-Alshaikh, I.M. ve Almbaidin, A.A. (2020) Analytical responses of functionally graded beam under moving mass using Caputo and Caputo-Fabrizio fractional derivative models, *Journal of Vibration and Control*, 26(19-20), 1859-1867. doi: 10.1177/1077546320908103

2. Akin, J.E. ve Mofid, M. (1989) Numerical solution for response of beams with moving mass, *Journal of Structural Engineering*, 115, 120-131.
doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:1(120)

3. Araz, O. (2020) Effect of detuning conditions on the performance of non-traditional tuned mass dampers under external excitation, *Arch. Appl. Mech.*, 90, 523-532. doi: 10.1007/s00419-019-01623-z

4. Araz, O. ve Kahya, V. (2018) Effects of manufacturing type on control performance of multiple tuned mass dampers under harmonic excitation, *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 1(3), 117–27. doi: 10.31462/jseam.2018.03117127

5. Araz, O. ve Kahya, V. (2020) Series tuned mass dampers in control of continuous railway bridges, *Struct. Eng. Mech.*, 73(2), 133-141. doi: 10.12989/sem.2020.73.2.133

6. Azeloğlu, C.O. ve Kural, S. (2019) Kren kirişlerinin hareketli tekil yüke maruz sönümlü Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmesi ve dinamik analizi, *S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg.*, 7(1), 49-65. doi: 10.15317/Scitech.2019.181

7. Biggs, J.M. (1964) *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, New York.

8. Ebrahimi-Mamaghani, A. Sarparast, H. ve Rezaei, M. (2020) On the vibrations of axially graded Rayleigh beams under a moving load, *Applied Mathematical Modelling*, 84, 554-570. doi: 10.1016/j.apm.2020.04.002

9. Esmailzadeh, E. ve Ghorashi, M. (1997) Vibration analysis of a Timoshenko beam subjected to a travelling mass, *Journal of Sound and Vibration*, 199(4), 615-628 doi: 10.1016/S0022-460X(96)99992-7

10. Frýba, L. (1972) *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*, Noordhoff International Publishing, Groningen.

11. Gao, Q. Wang, Z. Guo, B. ve Chen, C. (2014) Dynamic responses of simply supported girder bridges to moving vehicular loads based on mathematical methods, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-22. doi: 10.1155/2014/514872

12. Green, M.F. ve Cebon, D. (1997) Dynamic interaction between heavy vehicles and highway bridges, *Computers & Structures*, 62(2), 253-264. doi: 10.1016/S0045-7949(96)00198-8

13. Hirzinger, B. Adam, C. ve Salcher, P. (2020) Dynamic response of a non-classically damped beam with general boundary conditions subjected to a moving mass-spring-damper system, *International Journal of Mechanical Sciences*, 185, 105877. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105877

14. Kahya, V. Araz, O. ve Turan, M. (2015) Resonant vibrations of two-span railway bridges under high-speed trains, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 33(2), 188-199.

15. Kahya, V. ve Araz, O. (2017) Series tuned mass dampers in train-induced vibration control of railway bridges, *Struct. Eng. Mech.*, 61(4), 453-461. doi: 10.12989/sem.2017.61.4.453

16. Kahya, V. ve Araz, O. (2019) A sequential approach based design of multiple tuned mass dampers under harmonic excitation, *Sigma J Eng & Nat Sci*, 37(1), 225-239.

17. Karimi, A.H. ve Ziaei-Rad, S. (2015) Nonlinear coupled longitudinal-transverse vibration analysis of a beam subjected to a moving mass traveling with variable speed, *Archive of Applied Mechanics*, 85, 1941-1960. doi: 10.1007/s00419-015-1028-1

18. Kumar, C.P.S. Sujatha, C. ve Shankar, K. (2015) Vibration of simply supported beams under a single moving load: A detailed study of cancellation phenomenon, *International Journal of Mechanical Sciences*, 99, 40-47. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.05.001

19. Mofid, M. ve Akin, J.E. (1996) Discrete Element Response of Beams with Traveling Mass, *Advances in Engineering Software*, 25(2-3), 321-331. doi: 10.1016/0965-9978(95)00099-2

20. Museros, P. Moliner, E. ve Martinez-Rodrigo, M.D. (2013) Free vibrations of simply-supported beam bridges under moving loads: maximum resonance, cancellation and resonant vertical acceleration, *Journal of Sound and Vibration*, 332, 326-345. doi: 10.1016/j.jsv.2012.08.008

21. Pesterev, A.V. Yang, B. Bergman, L.A. ve Tan, C.A. (2001) Response of elastic continuum carrying multiple moving oscillators, *J. Eng. Mech.*, 127(3), 260-265. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:3(260)

22. Pesterev, A.V. Yang, B. Bergman, L.A. (2003) Revisiting the moving force problem, *Journal of Sound and Vibration*, 261, 75-91. doi: 10.1016/S0022-460X(02)00942-2

23. Stanisic, M.M. (1985) On a new theory of the dynamic behavior of the structures carrying moving masses, *Ingenieur-Archiv*, 55, 176-185. doi: 10.1007/BF00536412

24. Ting, E.C. Genin, J. ve Ginsberg, J.H. (1974) A general algorithm for moving mass problems, *Journal of Sound and Vibration*, 33(1), 49-58. doi: 10.1016/S0022-460X(74)80072-6

25. Vatan Can, S. ve Öztürk, H. (2020) Asılı kütle-yay sistemlerine sahip kompozit eğri kirişin dinamik kararlılık analizi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(3), 1557-1576. doi: 10.17482/uumfd.793121

26. Wu, J.J. (2006) Study on the inertia effect of helical spring of the absorber on suppressing the dynamic responses of a beam subjected to a moving load, *Journal of Sound and Vibration*, 297, 981-999. doi: 10.1016/j.jsv.2006.05.011

27. Xiang, T. Zhao, R. ve Xu, T. (2007) Reliability evaluation of vehicle–bridge dynamic interaction, *Journal of Structural Engineering*, 133(8), 1092-1099. doi: 10.1061/%28ASCE%290733-9445%282007%29133%3A8%281092%29

28. Yang, Y.B. Yau, J.D. ve Wu, Y.S. (2004) *Vehicle-bridge interaction dynamics with applications to high-speed railways*, World scientific publishing, Singapore.

29. Yang, H. Chen, Z. Zhang, H. ve Fan, J. (2014) Dynamic analysis of train-rail-bridge interaction considering concrete creep of a multi-span simply supported bridge, *Advances in Structural Engineering*, 17(5), 709-720. doi: 10.1260/1369-4332.17.5.709

30. Yavari, A. Nouri, M. ve Mofid, M. (2002) Discrete element analysis of dynamic response of Timoshenko beams under moving mass, *Advances in Engineering Software*, 33, 143-153.

doi: 10.1016/S0965-9978(02)00003-0

31. Yin, S.H. (2016) Vibration of a simple beam subjected to a moving sprung mass with initial velocity and constant acceleration, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 16 1450109. doi: 10.1142/S0219455414501090