

FATİH SULTAN MEHMET KÖPRÜSÜ'NÜN TAŞIT YÜKLERİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

(ASSESSMENT OF STRUCTURAL RESPONSE OF
FATİH SULTAN MEHMET BRIDGE UNDER VEHICLE LOADS)

Apaer MUBULİ¹, Barış SEVİM²

ÖZ

Bu çalışmada, Ülkemizdeki iki asma köprüden biri olan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal davranışı taşıt yükleri altında araştırılmıştır. Bu amaçla Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 yazılımı ile oluşturulmuştur. Taşıtların köprü davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için, üç farklı yükleme durumuna sahip hareketli taşıt yükleri dinamik olarak modele etkittirilmiştir. Birinci yükleme durumunda 50 tonluk bir kamyonun köprü orta şeridinde dört farklı hızla ilerlemesi halinde analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci yükleme durumunda 50 tonluk 12 kamyonun dört şeritten üç sıra halinde aynı yönde ve dört farklı hızla ilerlemeleri halinde analizler gerçekleştirilmiştir. Üçüncü yükleme durumunda ise 50 tonluk 12 kamyonun dört şeritten üç sıra halinde aynı yönde, 50 tonluk 12 kamyonun dört şeritten üç sıra halinde karşı yönden ve yine dört farklı hızla ilerlemesi halinde analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur. Sonuçta farklı yükleme durumlarına sahip farklı hızlardaki taşıt yüklerinin köprü yapısal davranışı üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asma köprü, Sonlu eleman modeli, Taşıt yükü, Yapısal davranış

ABSTRACT

The study presents the assesment of structural response of Fatih Sultan Mehmet Bridge under vehicle loads which is the one of the two suspension bridge in Turkey. For the purpose, 3D finite element model of the bridge was constituted using SAP2000 software. The traffic loads with three different vehicle load patterns were dynamically applied to model to investigate the effects of vehicles on the response of bridge. In the firts load pattern, analyses were performed for a truck with 50 t mass when moving on the middle lane of the bridge with four different speeds. In the second load pattern, analyses were performed for 12 trucks with 50 t mass when moving on the four lanes towards to same way of the bridge with four different

¹ Yüksek Lisans Öğr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL, idikut72@gmail.com

² Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL, basevim@yildiz.edu.tr (sorumlu yazar)

speeds. In the third load pattern, analyses were performed for 12 trucks with 50 t mass when moving on the four lanes towards to same way and other 12 trucks when moving opposite lanes. The result obtained from analyses listed and illustrated in tables and figures, respectively. It is seen from the study that the different vehicle loading and vehicle speeds considerably effects the structural response of the bridge.

Keywords: *Suspension bridge, Finite element model, Vehicle load, Structural response*

1. GİRİŞ

Son yıllarda, karayolu taşımacılığı ve büyük açıklıklı köprülerin gelişimleriyle beraber, köprü tabliyesinden geçen ağır kamyonların ve yüksek hızdaki araçların etkisi altında oluşan titreşimlerin yapı davranışı ve performansı üzerinde etkisi araştırmacıların daha fazla ilgisini çekmektedir. Araçların, köprülerden geçişi sırasında, araç ve köprü yapısının karşılıklı etkileşimleri birlikte ele alınması gereken dinamik bir sistem oluşturmaktadır. Köprü yapısı çeşitli araç yüklerinin etkisi altında sadece statik yük etkilerine maruz kalmaksızın araç geçişindeki dinamik yük etkileri de taşımaktadır.

Araçların köprü üzerinde geçişi sırasında her ne kadar araç ağırlığının tabliye üzerinde statik olarak çok fazla etkisi olmasa da araç-tabliye etkileşiminden ortaya çıkan titreşim problemleri yapıda önemli miktarda etkiye sebep olacak ve bu döngüsel titreşim yüklerinin etkisi köprü yapısında uzun vadede ezilme, çatlama, yorulma, yaşlanma ve genleşme hasarlarına neden olacaktır. Bu durum köprü bakım maliyetlerinin artmasına ve köprü kullanım süresinin azalmasına neden olabileceği gibi yapısal güvenliği açısından da tehlikeli olacaktır [1].

Hareketli taşıt yüklerinden kaynaklanan büyük açıklıklı kablolu ve asma köprülerin dinamik davranışları farklı araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Yang ve Fonder [2], kabloların lineer olmayan özelliklerini dikkate alarak oluşturdukları bir kablolu köprü modeli ile hareketli yükler etkisindeki kablolu köprülerin dinamik davranışını araştırmışlardır. Diana vd., [3], demiryolu hattının geçirilmesi durumunda kablolu köprüleri incelemiş ve çarpma etkisi açısından kablolu köprülerin asma köprülere oranla daha hassas olduğunu ortaya koymuşlardır. Cengiz vd., [4], kablolu köprülerin hareketli yük altındaki davranışlarını araştırdıkları çalışmalarında, Tatar Köprüsü'nü üç boyutlu olarak modellemiş ve üç farklı taşıt hızı için iki farklı trafik kombinasyonu oluşturarak köprünün hıza bağlı dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, genellikle düşük hızdaki araç geçişlerinde daha büyük kesit etkilerine ulaşıldığı vurgulanmıştır. Liu vd., [5], merkez açıklığı 1120 metre olan bir asma köprünün üç boyutlu sonlu eleman modelinde 160~300 km/h hızlardaki tren yükleri altında köprü-ray-arac bileşim etkilerinin dinamik analizini yapmışlar ve ana kablo ve askı halatların farklı kablo yükleri etkisi altındaki taşıt-köprü etkileşimlerinin dinamik etkileri karşılaştırmışlar. Chen vd., [6], uzun açıklıklı asma köprülerin doğrusal olmayan davranışlarını trafik yükleri altında araştırmışlardır. Bu amaçla Runyang asma köprüsünün çeşitli hareketli taşıt yükleri etkisinde analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Feng vd., [7], Tai Zhou asma köprüsünün yapısal dinamik özellikleri hesabında, farklı hız ve ağırlıklardaki hareketli taşıt yükleri altında üç kuleli, iki merkez açıklıklı asma köprünün yapısal dinamik etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonuçları, normal taşıt yükleri altındaki köprünün gerilme, deplasman ve iç kuvvetlerinin statik analiz sonuçlarına yakın değerler verdiğini, ancak taşıt yüklerinin ağırlıkları ve hızları artınca bu değerlerin doğru orantılı olarak büyük değerlere ulaştığını görmüşlerdir. Jiang vd., [8], Runyang asma köprüsünün dinamik analizlerinde,

rastgele taşıt yüklerinin etkisi altındaki köprü titreşimlerini hesabı için hesap yöntemi ileri sürmüşlerdir. Köprü sonlu eleman modelinde, köprüden geçen günlük taşıt sayısına göre dinamik analizler gerçekleştirilmelidir. Köprü'nün bazı kritik noktalarında dinamik hesap sonucu elde edilen kesit etkilerinin gerçek durumu yansıttığını, köprü'nün bazı noktalarındaki deplasman değerlerinin büyük olduğunu, ağır tonajlardaki taşıt yüklerinin köprü yapısının dinamik davranışını daha fazla etkilediğini vurgulamışlardır.

Modern köprü tasarımı ve analizlerde, araç ve köprü yapısının karşılıklı etkileşimlerden kaynaklanan dinamik etkiler genellikle dinamik etki faktörü ile değiştirilmektedir [9]. Fakat dinamik etki faktörü tam olarak trafik yükleri altındaki yapısal parametrelerin etkisini karakterize edemez ve dinamik etki altındaki davranışı tam olarak yansıtamaz. Dolayısıyla hareketli araç yükleri altındaki köprü yapısının doğrusal olmayan dinamik etkilerin araştırılması büyük açıklıklı köprü yapımı, standart araç yükü tasarımı ve makul işletme-bakım plan uygulamalarını optimize etmek için yardımcı olacaktır [9-10].

Asma köprüler, göze çarpan estetik görünümü ve makul taşıyıcı kuvvet özellikleri açısından büyük açıklıkların aşılmasında çok tercih edilen bir köprü türüdür. Yapısal analizlerde, köprü açıklıkları arttıkça köprü'nün çeşitli doğrusal olmayan özelliklerini analizlere dâhil etmek gerekmektedir [11-12]. Ayrıca büyük açıklıklı asma köprülerin esnekliği fazla olduğundan, araç yükleri kolayca kısmi dinamik davranış değişikliğine yol açabilir ve sonuç olarak köprü'nün yorulma ömrünü etkileyebilmektedir [13-15]. Bu bakımdan asma köprülerin dinamik davranışlarının taşıt yükleri altında da araştırılması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal davranışı taşıt yükleri altında araştırılmıştır. Bu amaçla Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 yazılımı ile oluşturulmuştur. Taşıtların köprü davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için, üç farklı yükleme durumuna sahip hareketli taşıt yükleri dinamik olarak modele etkittirilmiştir. Ayrıca taşıt hızlarının da köprü davranışı üzerinde etkisini görmek için taşıtlar dört farklı hız için köprüden geçirilmiş ve dinamik davranış belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında öncelikle asma köprülerde taşıt yüklerinin davranışa etkisiyle ilgili çalışmalar literatür olarak sunulmuş, daha sonra dinamik davranışın belirlenmesine yönelik formülasyon verilmiş ve sayısal uygulama olarak farklı araç yükleri ve hızları altında Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün sonlu eleman modeli üzerinden dinamik analizler gerçekleştirilerek elde edilen yerdeğiştirmeler tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

2. DİNAMİK DAVRANIŞIN BELİRLENMESİNE YÖNELİK FORMÜLASYON

Doğrusal sistemler için araç yükü etkisi altındaki, araç-köprü etkileşim sisteminin dinamik denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

şekindedir. Burada, $[M]$, $[C]$, $[K]$ ortak sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ ise aynı sistemin ivme, hız ve rölatif yerdeğiştirme vektörlerini göstermektedir; $\{P(t)\}$ ise ortak sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

Doğrusal olmayan sistemler için, eşdeğer doğrusallaştırma dinamik analizi kullanabilmektedir. Çok serbestlik derecesine sahip sistemlerin titreşim denklemleri basitçe

doğrusal olmayan özelliklerini yansıtan bir ana denkleme dönüştürebilmektedir. Denklemdaki kütle matrisi, sönüm matrisi, lineer elastik geri sekme kuvvet matrisleri ayrı ayrı çözümlenerek tekrar lineer olmayan geri kuvveti basitleştirir, daha sonra bu basitleştirilmiş doğrusal olmayan dinamik denklemler eşdeğer doğrusallaştırılmış denklem olarak çözülebilmektedir. Böylece, doğrusal olmayan dinamik analizi lineer dinamik analizi gibi çözümlenmektedir ((Denklem (2)).

$$[M]\{\ddot{x}(t + \Delta t)\} + [C]\{\dot{x}(t + \Delta t)\} + \{Q(t + \Delta t)\} = \{P(t + \Delta t)\} \quad (2)$$

Denklem (2)'de, $\{Q(t + \Delta t)\}$ eşdeğer elastik kuvvet vektörünü göstermekte olup, yerdeğiştirme ile ilgili doğrusal olmayan bir fonksiyondur.

Sistem rijitlik matrisi $[K_T]$, $\{Q(t + \Delta t)\}$ ifadesinde yerine yazılırsa denklem (3) elde edilir.

$$\{Q(t + \Delta t)\} = \{Q(t)\} + [K_T(x(t))]\{\Delta x(t + \Delta t)\} \quad (3)$$

Denklem (3), Denklem (2)'de yerine konursa,

$$[M]\{\Delta \ddot{x}(t + \Delta t)\} + [C]\{\Delta \dot{x}(t + \Delta t)\} + [K_T(x(t))]\{\Delta x(t + \Delta t)\} + \{Q(t)\} = \{\Delta P(t + \Delta t)\} \quad (4)$$

ifadesi elde edilir. Burada, $K_T(x(t))$ t anındaki sistem rijitlik matrisini göstermekte olup; Denklem (4)'te

$$\begin{aligned} \Delta x(t + \Delta t) &= x(t + \Delta t) - x(t); \\ \Delta \dot{x}(t + \Delta t) &= \dot{x}(t + \Delta t) - \dot{x}(t); \\ \Delta \ddot{x}(t + \Delta t) &= \ddot{x}(t + \Delta t) - \ddot{x}(t); \\ \Delta P(t + \Delta t) &= P(t + \Delta t) - P(t). \end{aligned}$$

şeklinde ifade edilir. Böylece lineer sisteme benzer bir yaklaşım kullanılarak dinamik denge denklemleri çözülebilir. Bu çalışmada dinamik denge denklemleri için Newmark yöntemi tercih edilmiştir.

Newmark yönteminde, hız ve yerdeğiştirmeler t ile t + Δt zamanı arasında,

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + [(1-\gamma)\ddot{U}_t + \gamma\ddot{U}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (5)$$

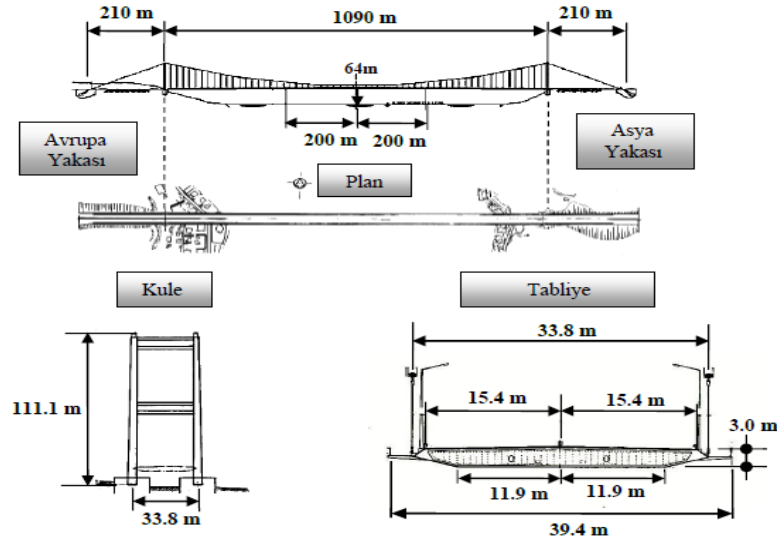
$$U_{t+\Delta t} = U_t + \dot{U}_t(\Delta t) + [(0.5-\beta)\ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t}](\Delta t)^2 \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir [16-17]. Burada, U_t , \dot{U}_t , \ddot{U}_t sırasıyla t anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini, $U_{t+\Delta t}$, $\dot{U}_{t+\Delta t}$, $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ sırasıyla t+1 anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemde, β ve γ integrasyon parametreleri olup Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlamaktadır. Ayrıca bu parametreler, kullanılan yöntemin stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirlemektedir.

3. SAYISAL UYGULAMA

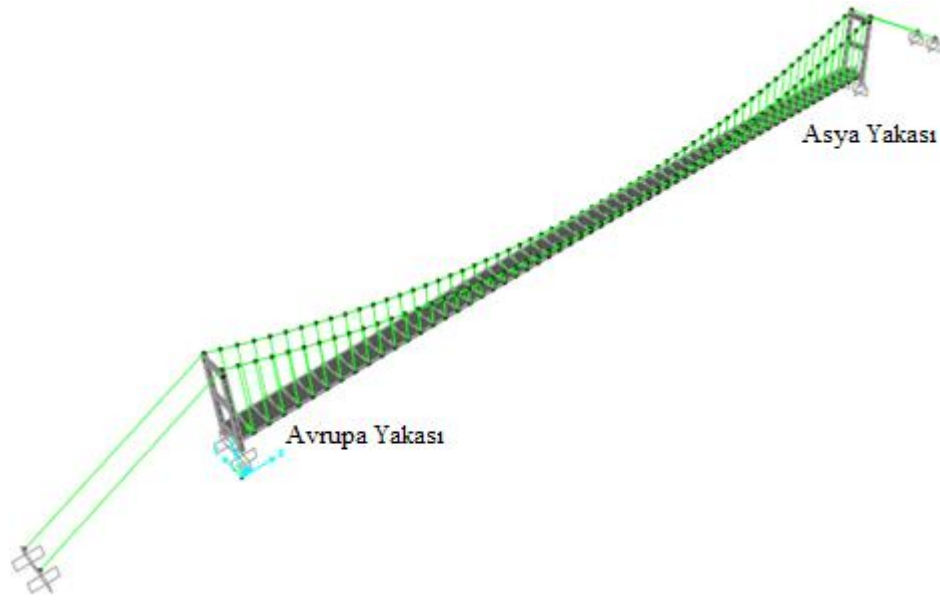
3.1. Fatih Sultan Mehmet (FSM) Köprüsünün Sonlu Eleman Modeli

Fatih Sultan Mehmet (FSM) Köprüsü, 1988 yılında İstanbul Boğaz'ında Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan ikinci asma köprü olarak inşa edilmiştir. Köprü kenar açıklıkları olmayan, çelik kulesi ve çift düşey askı kablolardan oluşan ağırlıklı ankraj sistemine sahip bir asma köprüdür. Aerodinamik bir enkesite sahip olan ortotropik kutu kesitli tabliye 33,8 m genişliğinde, 3 m yüksekliğinde olup her iki yanında 2,8 m genişliğinde konsol şeklinde yaya yolları yer almaktadır. Tabliye 61 üniteden oluşmaktadır. Asya ve Avrupa geçiş yönlerinin her biri dört şeritli otoyol olmak üzere toplam 8 şeritlidir. Kule temelleri Boğaz'ın iki yakasındaki yamaçlara yerleştirilmiş olup, kuleler hemen hemen tabliye mesnet seviyesinden başlamaktadır. 111.1 m yüksekliğinde olan çelik kuleler ikişer adet yatay kiriş ile birbirine bağlanmıştır. Kulelerin boyutları tabanda 5x4 metre, tepede ise 4x3 metredir. Tabliye otoyolu kule temellerinin yaklaşık 8 m üstündedir (Şekil 1). Tabliye ile kule bağlantı noktasındaki genişleme rulmanları, tabliyenin boyuna yönde hareket etmesine ve yanal ekseninde dönmesine müsaade ederken, diğer yönlerde hareket etmesine ve dönmesine engel olacak şekilde tasarlanmıştır [12, 18-19].



Şekil 1. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün geometrik özellikleri [12, 19]

Hareketli taşıt yükleri etkisi altındaki asma köprü yapısının doğrusal olmayan dinamik davranışını belirlemek için asma köprü'nün üç boyutlu analitik modeli SAP 2000 [20] yazılımı ile oluşturulmuştur (Şekil 2). Tabliye, kuleler ve kablolar çubuk kiriş elemanları ile modellenirken, askılar kafes elemanı olarak modellenmiştir. Köprü'nün sonlu eleman modeli, 356 adet düğüm noktasına, 227 adet kiriş elemanına, 120 adet rijit bağlantı elemanına ve 120 adet kafes elemanına sahiptir. Tabliye geometrisi, tabliye kesitinin orta noktasından geçen bir çizgi üzerinde tariflendiğinden, rijit bağlantı elemanları ile modellenmiştir. Rijit bağlantı elemanları tabliye ile askılar arasında bağlayıcı görevi görmektedir. Bu kütleli bağlantı elemanları rijit cisim davranışını yansıtabilmek amacıyla kullanılmıştır [12, 19]. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan malzeme ve kesit özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmektedir [18].



Şekil 2. Fatih Sultan Mehmet Asma köprüsü sonlu eleman modeli

Tablo 1. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün malzeme özellikleri

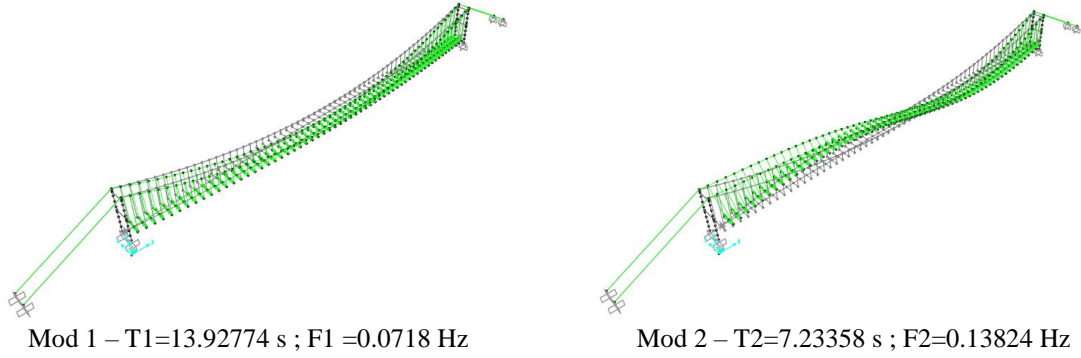
	Kütle Yoğunluğu (t/m ³)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Poisson Oranı
Ana kablo	8,3013	81,4393	1.893E11	0,3
Yan Kablo	8,0836	79,3049	1.893E11	0,3
Askı Halatı	8,8221	86,5447	980.665E8	0,3
Kule	7,8453	76,9822	1.961E11	0,3
Tabliye	12,3525	121,179	1.961E11	0,3
Fiktif Eleman	-	-	1.961E11	0,3

Tablo 2. Fatih Sultan Mehmet köprüsü'nün kesit özellikleri

Elemanlar	A (m ²)	I _{yy} (m ⁴)	I _{zz} (m ⁴)	J (m ⁴)
Ana Kablo	0,36615	0,0107	0,0107	0,0213
Yan Kablo	0,39129	0,0122	0,0122	0,0244
Askı Halatı	0,005064	2,041E-06	2,041E-06	4,082E-06
Tabliye Kirişi	1,25816	1,7318	129,273	4,754
	1,4865	0,9929	5,0152	-
	1,441	0,7924	4,2921	-
	1,374	0,5494	3,3472	-
	1,3335	0,43	2,8398	-
Kuleler	1,2751	0,2901	2,1927	-
	1,2029	0,1874	1,6311	-
	0,4699	-	3,5925	-
	0,3109	-	2,4191	-
Fiktif	0,0625	0,0003255	0,0003255	0,0005501

A: Kesit Alanı; J: Burulma Sabiti; Iyy, Izz: Atalet Momenti

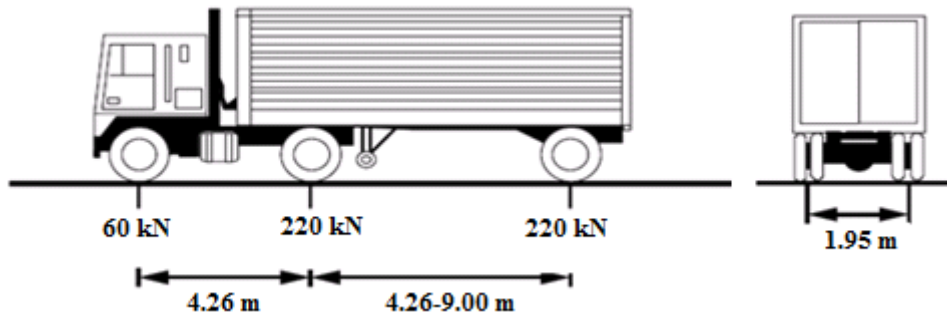
Oluşturulan sonlu eleman modeli 2048 adet serbestlik derecesi ile tanımlanırken, hesaplamalarda sönüm oranı % 2 olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada hareketli taşıt yükleri zaman tanım alanında dikkate alındığından dinamik analizlere geçmeden önce köprünün serbet titreşim analiz yapılarak ilk 15 mod şekli ve periyodu belirlenmiştir. Kablolar ve askı halatları modellenirken, P- Δ etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 3'te Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün modal analizinden elde edilen ilk iki mod, periyot ve frekans değerleri verilmektedir. Elde edilen dinamik karakteristiklerin literatür ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır [18].



Şekil 3. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün ilk iki mod şekli, periyot ve frekansları

3.2. Taşıt Yükleri Altındaki Dinamik Analiz

Hareketli taşıt yükleri etkisi altındaki büyük açıklıklı köprülerin dinamik analizlerinde, genel olarak hareketli taşıt yük modeli, hareketli kütle ve hareketli kütle yayılı sönüm sistemi kullanılmaktadır. Fatih Sultan Mehmet (FSM) Köprüsü'nün, yapı kütlesi taşıt kütlesinden çok büyük olduğu için taşıt kütlesi ve titreşimin köprü yapısına etkisi çok küçüktür, dolayısıyla bu çalışmada hareketli kütle sistemi yerine hareketli taşıt yük modeli kullanılmıştır. Bunun için American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)'da [21] tanımlı yaklaşık 50 ton kütleye sahip kamyon seçilmiş (Şekil 4) ve aks mesafeleri korunarak hangi tonajda taşıt geçirilmesi isteniyorsa o taşıtın akslarına gelen yük hesabı lineer olarak dikkate alınmış ve elverişsiz bir yükleme durumu oluşturulmuştur.



Şekil 4. HS20-44 kamyonunun genel görünüşü [21]

Çalışmada dikkate alınan taşıt kütlesinin köprü kütlesine oranının düşük olması ve sadece köprü dinamik davranışının incelenmesi nedeniyle, trafik yüklerinin köprü sistemine uygulanabilmesi için daha önce belirtilen yöntemlerden hareketli yük modeli seçilmiştir [4]. Zaman tanım alanındaki analizlerde kullanılan hareketli yük modeli, araçlar köprü tabliyesi

üzerinden geçerken ani olarak etkiyen bir darbe (dinamik) yükü olarak tanımlanmaktadır. Buna göre 1 kN değerindeki üçgen yük etkisi aracı azami hızına bağlı olarak belirli bir zaman aralığı tekerlek geçiş mesafesi için tanımlanmaktadır (Şekil 5). Şekil 4'te, t_1 ve t_2 arasındaki zaman aracın azami hızı ve modellenen iki nokta arasındaki mesafesi ile belirtilmektedir [4].



Şekil 5. Hareketli üçgen yük modeli [4]

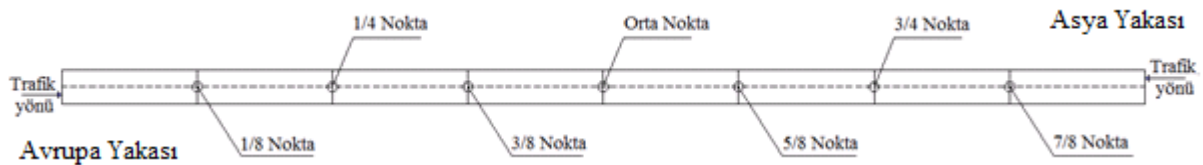
Taşıt-köprü etkileşim analizinde, sönüm diğer önemli faktörlerden biridir. Bu çalışmalarda Rayleigh sönümleme formülü kullanılmıştır [10]. Rayleigh sönümleme formülü,

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_n\omega_m}{\omega_n^2 - \omega_m^2} \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ -\frac{1}{\omega_n} & \frac{1}{\omega_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix} \quad (7)$$

bağıntısıyla ifade edilir. burada, α , β sırasıyla kütle sönüm katsayısını ve rijitlik sönüm katsayısını ifade eder. ω_n , ω_m ise analizlerde dikkate alınan ilk ve son açısal doğal frekans, ξ_m , ξ_n ise uyumlu modal sönüm oranını, m, n altsimgeler ise titreşim mod sayılarını ifade eder.

3.3. Taşıt Yükleme Durumları

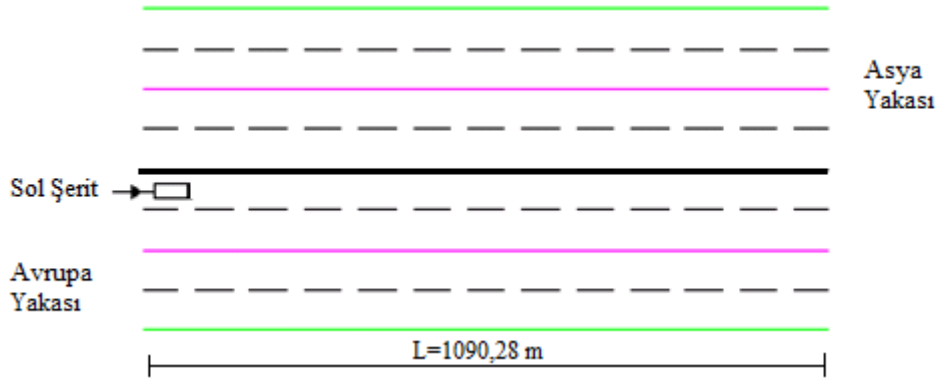
Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün taşıt yükleri altındaki yapısal davranışını belirleyebilmek için, 50 ton kütye sahip kamyonların köprü üzerinden tek yönde veya her iki yönde tek basışına veya konvoy halinde, farklı hızlarda hareket etmeleri durumu dikkate alınarak sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı davranış için zaman tanım alanında analizler hareketli yük modeli kullanılarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda köprü tabliyesinin Şekil 6'da verilen belli noktalarda düşey yerdeğiştirme değerleri her bir yükleme durumu için elde edilmiştir. Şekil 6'da bahsi geçen noktalar tabliye uzunluğunun yüzdesi şeklinde (1094 m) Avrupa Yakası tarafından olan mesafelerini göstermektedir.



Şekil 6. Köprü tabliyesi üzerinde yerdeğiştirmelerin elde edildiği noktalar

3.3.1. Taşıt Yükleme Durumu 1:

Taşıt Yükleme Durumu 1'de, 50 ton kütleye sahip tek bir kamyonun Avrupa Yakası'ndan Asya Yakası'na geçişte sol şerit üzerinde (Şekil 7) sırasıyla 60, 80, 100, ve 120 km/h hızla hareket etmesi halinde analizler gerçekleştirilmiştir. Kamyonun geçişi sırasında Şekil 6'da belirtilen noktalarda meydana gelen maksimum düşey yerdeğiştirmeler Tablo 3'te verilmiştir.



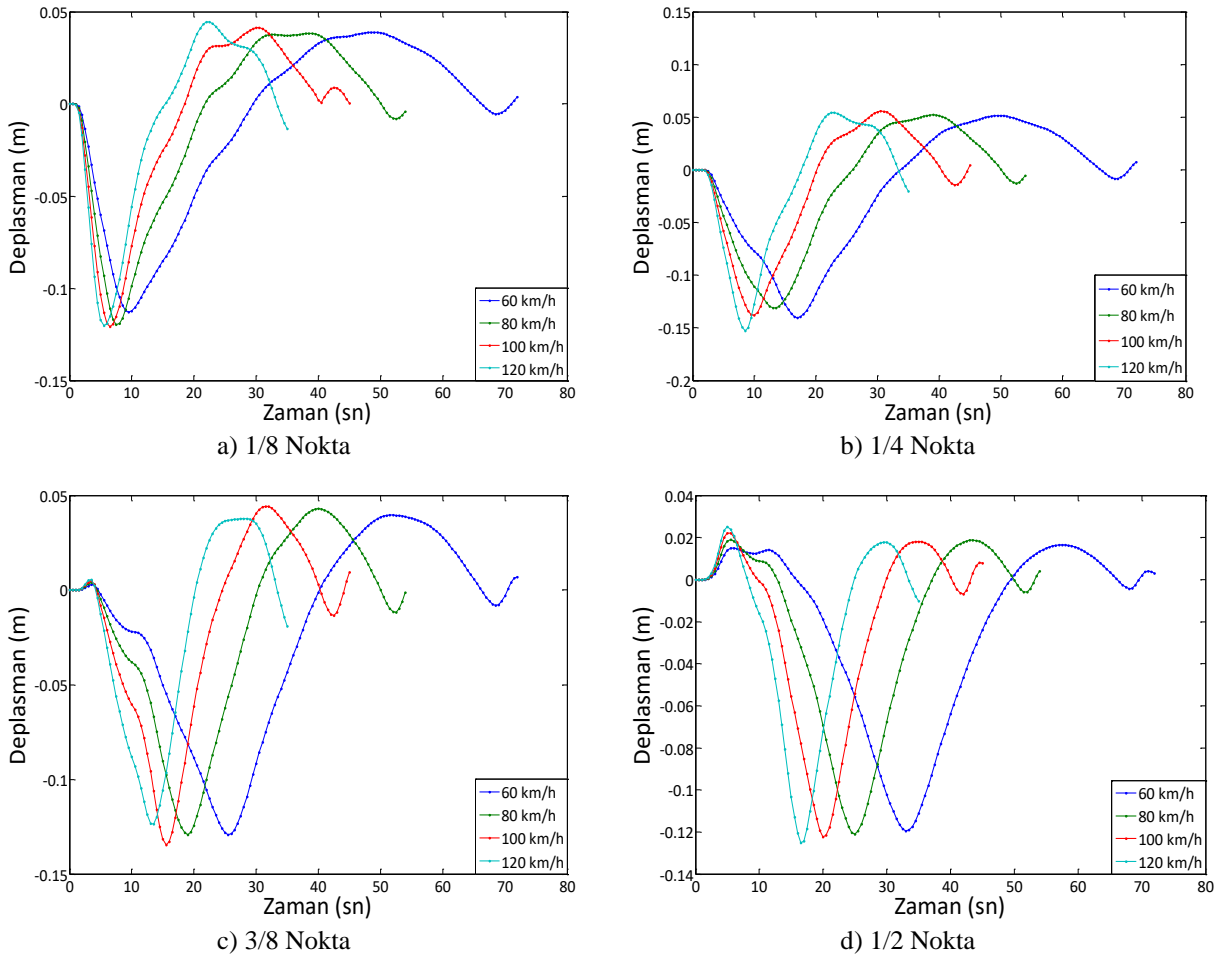
Şekil 7. 50 ton kütleye sahip tek bir kamyonun Avrupa Yakası'ndan Asya Yakası'na geçişi

Tablo 3. Taşıt yükleme durumu 1'e göre köprü tabliyesindeki maksimum yerdeğiştirmeler

Taşıt Hızı (km/h)	Maksimum Yerdeğiştirme (m)						
	1/8 Nokta	1/4 Nokta	3/8 Nokta	1/2 Nokta	5/8 Nokta	3/4Nokta	7/8 Nokta
60	-0,11291	-0,14024	-0,12915	-0,11955	-0,12722	-0,13723	-0,11279
80	-0,11951	-0,13127	-0,12918	-0,121	-0,13081	-0,01373	-0,11321
100	-0,12079	-0,13811	-0,13467	-0,12229	-0,12805	-0,14455	-0,11388
120	-0,12027	-0,15288	-0,12345	-0,12506	-0,13958	-0,13843	-0,11923

50 tonluk kamyonun köprü üzerinden geçiş süreleri 60, 80, 100, ve 120 km/h hızlar için sırasıyla 71, 56, 45, ve 39 s olarak dikkate alınmıştır. Bu süreler 6 s'lik kısmı taşıtın köprüye giriş ve çıkış süresi için dikkate alınmıştır. Şekil 6'da verilen noktalarda 50 tonluk aracın geçişi sırasında zamana bağlı elde edilen yerdeğiştirmeler Şekil 8'de çizilmiştir. Tablo 3'te simetrik noktalarda benzer yerdeğiştirme değerleri elde edildiği anlaşıldığından, Şekil 8'de sadece 1/8 Noktası, 1/4 Noktası, 3/8 Noktası ve 1/2 Noktası için çizim yapılmıştır.

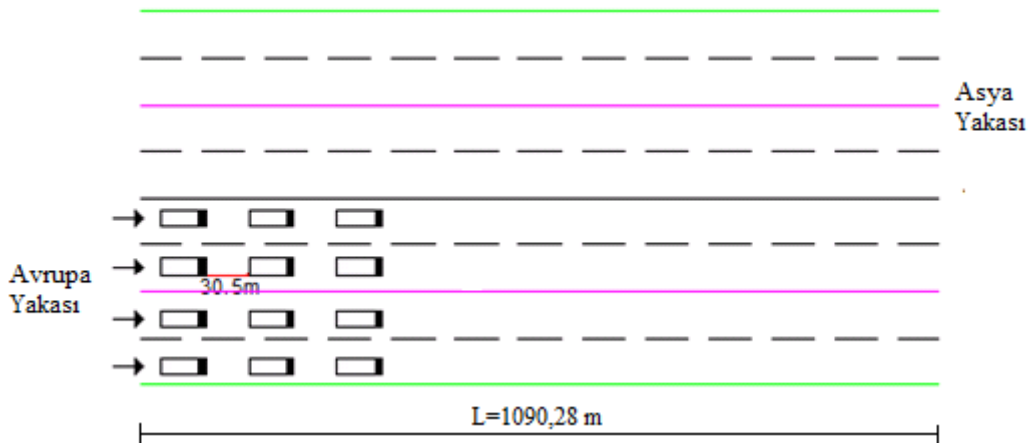
Tablo 3 ve Şekil 8 incelendiğinde, en büyük yerdeğiştirmelerin köprü'nün 1/4 Noktası olarak adlandırılan, köprü Avrupa Yakası yönünden yaklaşık 272.5 m'lik mesafesinde elde edildiği anlaşılmaktadır. Taşıt hızına bağlı bir değerlendirme yapıldığında, her ne kadar aynı noktada oluşan maksimum yerdeğiştirme değerleri aynı olmasada birbirine yakın yerdeğiştirmeler elde edildiği söylenebilir. Fakat taşıt hızlarının farklı olması nedeniyle aynı noktalar için elde edilen yerdeğiştirmelerin meydana geldiği süreler farklılık göstermektedir. Bu durumda tabliyede, yorulmadan dolayı farklı davranış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 8. Taşıtlı yüklemeler için köprü tabliyesindeki yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi

3.3.2. Taşıtlı Yüklemeler Durumu 2:

Taşıtlı Yüklemeler Durumu 2'de, her biri 50 ton kütleye sahip 12 kamyonun Avrupa Yakası'ndan Asya Yakası'na geçişte dört şerit ve aralarında 30,5 m mesafe olacak şekilde üç sıra şeklinde (Şekil 9) sırasıyla 60, 80, 100, ve 120 km/h hızla konvoy halinde hareket etmesi durumu dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Konvoyu oluşturan kamyonların geçiş sırasında Şekil 6'da belirtilen noktalarda meydana gelen maksimum düşey yerdeğiştirmeler Tablo 4'te verilmiştir.



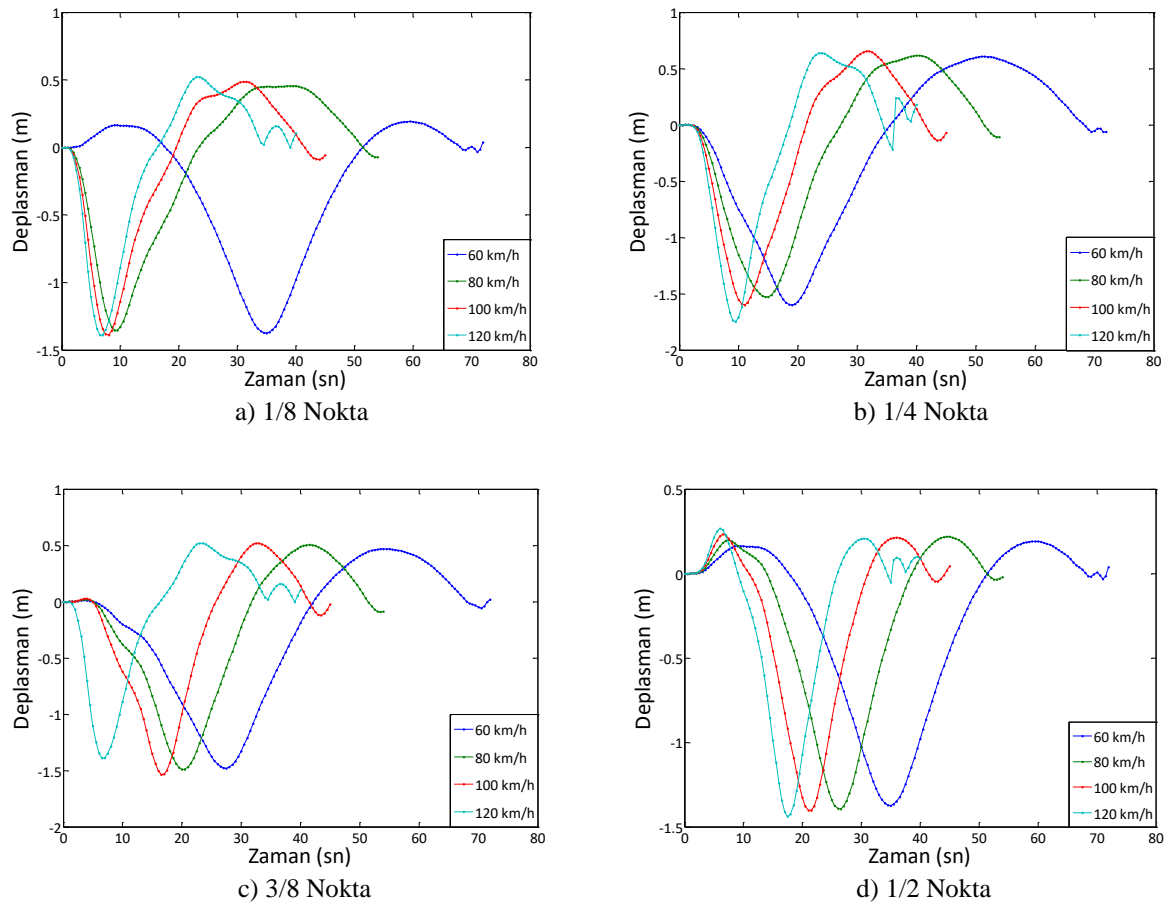
Şekil 9. Konvoyu oluşturan kamyonların Avrupa Yakası'ndan Asya Yakası'na geçişi

Tablo 4. Taşıt yüklenme durumu 2'ye göre köprü tabliyesindeki maksimum yerdeğiştirmeler

Taşıt Hızı (km/h)	Maksimum Yerdeğiştirme (m)						
	1/8 Nokta	1/4 Nokta	3/8 Nokta	1/2 Nokta	5/8 Nokta	3/4Nokta	7/8 Nokta
60	-1,28585	-1,59978	-1,47954	-1,37341	-1,46031	-1,57708	-1,29270
80	-1,35245	-1,52876	-1,48765	-1,39281	-1,50073	-1,57989	-1,30275
100	-1,38701	-1,59918	-1,53512	-1,40391	-1,48008	-1,66068	-1,31400
120	-1,38872	-1,74944	-1,42988	-1,43924	-1,60310	-1,60951	-1,35811

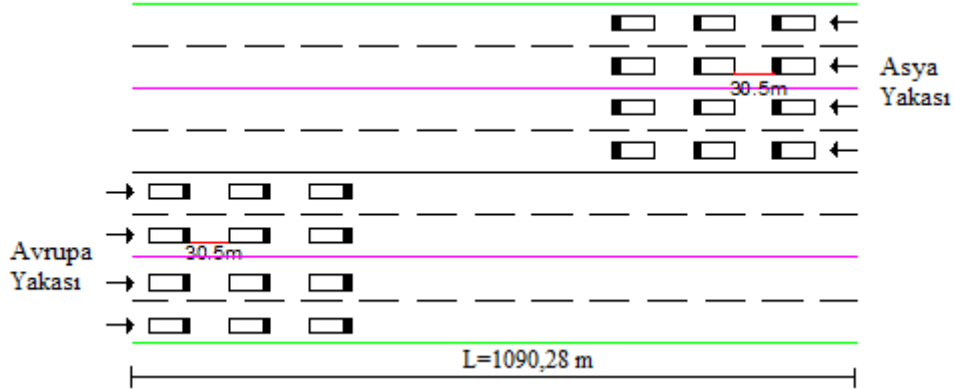
Tablo 4 incelendiğinde, 50 tonluk 12 kamyonun dört şerit halinde köprüden farklı hızlarda geçmesi durumu için en büyük yerdeğiştirmeler düşey doğrultuda, köprü'nün 1/4 Noktası'nda 120 km/h hız için 1.75 m olarak elde edilmiştir. Yine Tablo 4'e göre köprü tabliyesindeki en büyük değıştirmeler tüm hız durumları dikkate alındığında köprü tabliyesinin 1/4 ve 3/4 Noktaları'nda meydana gelmiştir.

Kamyonların konvoy halinde hareket etmesi durumu için köprü üzerindeki noktalarda zamanla meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler Şekil 10'da çizilmiştir. Şekil 10 incelendiğinde 60 km/h hızla hareket eden konvoyun yapı davranışı üzerindeki etkisi diğer hız durumlarına göre belirgin bir şekilde farklıdır.

**Şekil 10.** Taşıt yüklenme durumu 2'ye göre köprü tabliyesindeki yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi

3.3.3. Taşıt Yükleme Durumu 3:

Taşıt Yükleme Durumu 3'te, her biri 50 ton kütleyle sahip 12 kamyonun Avrupa Yakası'ndan Asya Yakası'na, 50 tonluk 12 adet kamyonun da Asya Yakası'ndan Avrupa Yakası'na geçişte dört şerit ve aralarında 30,5 m mesafe olacak şekilde üç sıra şeklinde (Şekil 11) sırasıyla 60, 80, 100, ve 120 km/h hızla konvoy halinde hareket etmesi durumu dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Konvoyu oluşturan kamyonların geçişi sırasında Şekil 6'da belirtilen noktalarda meydana gelen maksimum düşey yerdeğiştirmeler Tablo 5'te verilmiştir.



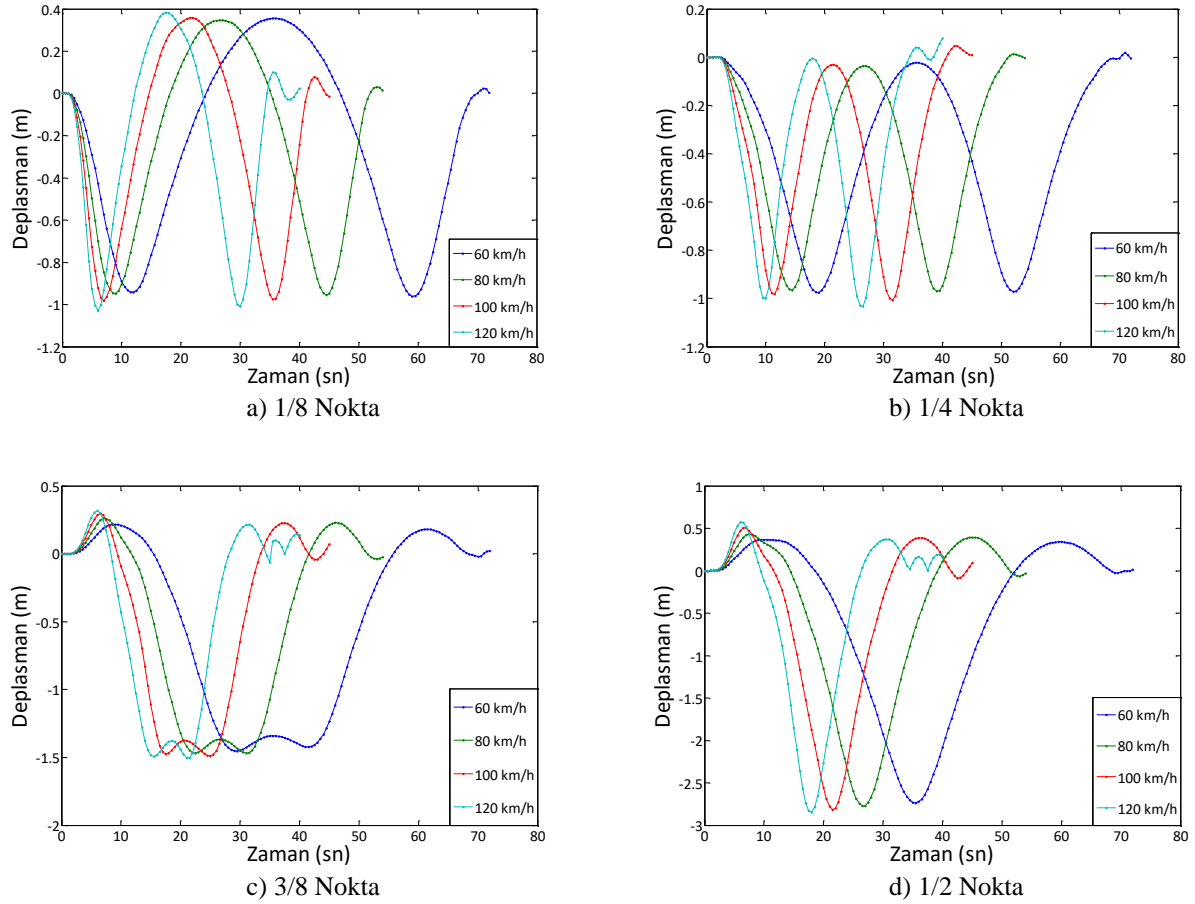
Şekil 11. Konvoyu oluşturan kamyonların aynı anda Avrupa-Asya ve Asya-avrupa geçişi

Tablo 5. Taşıt yükleme durumu 3'e göre köprü tabliyesindeki maksimum yerdeğiştirmeler

Taşıt Hızı (km/h)	Maksimum Yerdeğiştirme (m)						
	1/8 Nokta	1/4 Nokta	3/8 Nokta	1/2 Nokta	5/8 Nokta	3/4Nokta	7/8 Nokta
60	-0,96136	-0,97480	-1,45372	-2,73526	-1,45374	-0,97474	-0,96130
80	-0,95509	-0,97037	-1,46825	-2,77187	-1,46828	-0,97032	-0,95499
100	-0,98101	-1,00771	-1,49078	-2,41830	-1,49080	-1,00766	-0,98090
120	-1,03044	-1,03212	-1,50289	-2,84345	-1,50292	-1,03204	-1,03034

Tablo 5 incelendiğinde, 50 tonluk 12 kamyonun dört şerit halinde köprüden farklı hızlarda karşı iki yönden geçmesi durumu için en büyük yerdeğiştirmeler düşey doğrultuda, köprü'nün 1/2 Noktası'nda 120 km/h hız için 2.84 m olarak elde edilmiştir. Yine Tablo 5'e göre köprü tabliyesinin 1/2 Nokta'sında meydana gelen yerdeğiştirmeler diğer noktalara göre iki kat daha büyük elde edilmiştir.

Kamyonların konvoy halinde hareket etmesi durumu için köprü üzerindeki noktalarada zamanla meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler Şekil 12'de çizilmiştir. Şekil 12 incelendiğinde 60 km/h hızla hareket eden konvoyun yapı davranışı üzerindeki etkisi diğer hız durumlarına göre belirgin bir şekilde farklıdır.



Şekil 12. Taşıtların farklı hızlarında köprü tabliyesindeki yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün taşıtların altındaki yapısal davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla üç farklı taşıtların durumu için köprü'nün sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve köprü tabliyesi üzerinden farklı hızlarda taşıtların geçmesi durumu için analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- ✓ Köprüden tek bir kamyon geçmesi durumunda, en büyük yerdeğiştirmeler 15 cm civarında ve köprü'nün Avrupa Yakasından yaklaşık 250 m sonraki kısmında meydana gelmiştir. Farklı hızlardaki kamyonun tabliyedeki yerdeğiştirme sonuçlarına pek fazla etki olmamakla birlikte, kamyon hızına bağlı olarak en büyük yerdeğiştirmeler farklı zamanlarda oluşmuştur. Bu durum ortotropik plak özelliğine sahip tabliyede yorulma kaynaklı davranışın farklı olabileceğini göstermektedir.
- ✓ Köprüden 12 adet kamyonun konvoy halinde Avrupa Yakası'ndan Asya Yakası'na geçmesi durumunda en büyük yerdeğiştirmeler, tabliyenin yaklaşık 250'nci metresinde ve 1.75 m olarak elde edilmiştir. Kamyonların konvoy olarak geçmesi durumunda farklı hızlara bağlı olarak farklı miktarda yerdeğiştirme elde edilmiştir.
- ✓ Konvoy halinde hareket eden kamyonların köprüden karşılıklı olarak geçmeleri durumunda yerdeğiştirmeler köprü'nün orta kısmında ve 2.8 m civarında elde edilmiştir. Farklı hız durumları için tabliyede oluşan yerdeğiştirmelerin en büyük

değerleri benzerlik göstermekle beraber, tabliyede oluşna zamana bağlı yerdeğiştirmeler farklı olmaktadır.

- ✓ Düşük hızlarla hareket eden kamyonların köprü tabliyesinde neden olduğu yerdeğiştirmeler, kamyonların köprü üzerinden geçiş süresine bağlı olarak yavaş bir değişim göstermekte, fakat köprü daha fazla süre taşıt yüküne maruz kalmaktadır.
- ✓ Yüksek hızlarda hareket eden kamyonların köprü tabliyesinde neden olduğu yerdeğiştirmeler, kamyonların köprü üzerinden geçiş süresine bağlı olarak ani bir şekilde artmakta ve azalmaktadır. Köprüden hızlıca geçen kamyonlar köprü üzerinde az süre bulunacak ve köprü büyük miktarda taşıt yüküne maruz kalmayacaktır, fakat ani olarak oluşan yerdeğiştirmelerin tabliyede aşırı yorulmaya sebep olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Karoumi R, Wibreg J, Liljencraniz A. Monitoring Traffic Load Sand Dynamic Edectsusing an Instrumented Railway Bridge, *Engineering Structures*, Vol.27, No.12: 1813-1819, 2005.
- [2] Yang F, Fonder GA. Dynamic Response of Cable-Stayed Bridges Under Moving Loads, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 25: 195-215, 1998.
- [3] Diana G, Cheli F, Bruni S. Railway Runnability and Train-Track Interaction in Long-Span Cable Supported Bridges, *Advances in Structural Dynamics*, 43-54, 2000.
- [4] Cengiz A, Soyluk K, Sıcacık EA. Kablolu Köprülerde Trafik Yüklerinin Neden olduğu Dinamik Etkiler, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* Cilt 26, No.1: 243-252, 2011.
- [5] Liu XZH., Liu DJ, Jin ZH B. Analysis of Train-Track-Bridge Coupled Vibration of a Railway Long-Span Suspension Bridge, *Journal of Steel Construction*, Cilt 12, Vol. 25, No.140, 2010.
- [6] Chen HL, Fei QG, Han XL, Liao ZQ. The Nonlinear Dynamic Response Analysis of Long-Span Suspension Bridge Under Traffic Loads, *Special Structures*, Vol.28, No.5, 2011.
- [7] Feng ZX, Chen L, Miao CQ. The Study of Forced Vibration for Three-Tower Suspension Bridge Under Moving Loads, *China Engineering Science*, Vol.14, No.5, 2012.
- [8] Jiang D, Chen HL, Fei QG, Miao CQ, Han XL. Dynamic Response of Large Suspension Bridge to Stochastic Traffic Loads, *China Sciencepaper Online*, 2010.
- [9] Fryba L. Dynamics of Railway Bridges, Thomas Telford Ltd, 1996.
- [10] Yang JR, Study on Local Vibration Caused by Vehicle-Bridge interaction, *Phd Thesis*, Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] Kim SE, Tai H. Nonlinear Inelastic Dynamic Analysis of Suspension Bridge. *Engineering Structures*, Vol.32, 3845-3856, 2010.
- [12] Adanur S, Bayraktar A, Altunışık AC, **Sevim B.** Asma Köprülerin Lineer Olmayan Davranışına Askı Şekillerinin Etkisi, 3. *Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu*, 8-10 Ekim 2009, ss. 335-343, Gaziantep, Türkiye.
- [13] Tommy HT, Chan LG, Li ZX. Finite Elemant Modeling for Fatigue Stres Analysis of Large Suspension Bridge, *Journal of Soundand Vibration*, Vol.26, No.1: 443-464, 2003.
- [14] Günaydın M, Adanur S, Altunışık AC, **Sevim B.** Construction Stage Analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge, *Structural Engineering and Mechanics*, 42, (4), 489-505, 2012.
- [15] Adanur S, Günaydın M, Altunışık AC, **Sevim B.** Construction Stage Analysis of Humber Suspension Bridge, *Applied Mathematical Modelling*, 36, 5492-5505, 2012.

- [16] Bathe KJ. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1996.
- [17] Chopra AK. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA, 2006.
- [18] Apaydin NM. Earthquake performance assessment and retrofit investigations of two suspension bridges in Istanbul, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30: 702-710, 2012.
- [19] Kartal H, Soyluk K. Kablo Destekli Köprülerin Dinamik Davranışlarının Karşılaştırılması, 2. *Türk Deprem Mühendisliği ve sismoloji Konferansı*, Hatay, 25-27 Eylül 2013, 1-13.
- [20] SAP2000 V16. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 2015.
- [21] AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, Bridge Design specifications, Sixth Edition, USA, 2012.

ÖZGEÇMİŞ / CV

Apaer MUBİLİ; Y L Öğr. (Master Std.)

1983 yılında Çin Halk Cumhuriyeti'nde doğan MUBİLİ, Lisans eğitimini de bu Ülkede tamamlamıştır. Lisans üstü çalışmaları için 2010 yılında Türkiye'ye gelmiş, ve asma köprülerin davranışlarının belirlenmesi konusunda araştırmalar yapmıştır. Halen Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisansüstü çalışmalarına devam etmekte olan Mubili Türkçe, İngilizce ve Çince bilmektedir.

He was born in Republic of China in 1983. He completed his bachelor studies in China. Then, he arrived to Turkey in 2010 to research about the determination of structural response of suspension bridges. He has still studied about the subject in Yıldız Technical University, Department of Civil Engineering. Also he knows Turkish, English and Chinish languages.

Barış SEVİM; Doç.Dr. (Assoc. Prof. Dr)

1982 yılında Trabzon'da doğan SEVİM, orta öğrenimini İstanbul Üsküdar Haydarpaşa Lisesinde 2000 yılında, lisans eğitimini ise Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 2004 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora çalışmalarına başlamış ve 2010 yılında "Doktor" unvanı almıştır. Şu an itibariyle Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Öğretim Üyesi olarak çalışmakta ve mühendislik yapılarının deprem davranışı, operasyonel ve deneysel modal analiz konularında araştırmalar yapmaktadır. İyi derecede İngilizce bilen SEVİM, evli ve bir çocuk babasıdır.

He was born in Trabzon in 1982. He completed his high school education in Istanbul Üsküdar Haydarpaşa in 2000. Then he had got a bachelor degree from Karadeniz Technical University, Department of Civil Engineering in 2004. Lastly, he finished his Phd Thesis in the same university in 2010. Now, he is an academician in Yıldız Technical University, Department of Civil Engineering. He also studies about the earthquake responses of engineering structures and operational and experimental modal analyses. He is married and has got a baby.