

KABLOLU KÖPRÜLERDE TRAFİK YÜKLERİNİN NEDEN OLDUĞU DİNAMİK ETKİLER

Ayşegül CENGİZ, Kurtuluş SOYLUK ve Eda AVANOĞLU SICACIK
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe, Ankara
ksoyluk@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 27.07.2009; Kabul/Accepted: 24.01.2011)

ÖZET

Son yirmi yılda kablolu köprülerde büyük açıklıkların geçilmeye başlanmasıyla taşıt kaynaklı köprü titreşimleri, köprü dinamik davranışı açısından büyük önem kazanmıştır. Bu çalışmada taşıt-köprü etkileşiminde önemli parametrelerden biri olan taşıt hızının ve hızda meydana gelen değişimlerin köprü davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsü olan Tatar Köprüsü nümerik model olarak seçilmiş ve üç boyutlu olarak modellenmiştir. Üç farklı taşıt hızı için iki farklı trafik kombinasyonu oluşturulmuş ve köprünün hızla bağlı dinamik davranışı incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde en büyük tepki kuvvetlerinin genellikle düşük hızlarda meydana geldiği görülmüştür. Ancak, taşıtlar açıklık ortasından ayrıldıktan sonra açıklık ortasında en büyük tepki kuvvetleri yüksek hızlar altında meydana gelmeye başlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Kablolu köprü, taşıt-kaynaklı köprü titreşimi, hız parametresi

DYNAMIC EFFECTS INDUCED BY TRAFFIC LOADS ON CABLE-STAYED BRIDGES

ABSTRACT

Vehicle-induced bridge vibrations has become an important issue for the dynamic response of bridges especially after the achievement of long spans by cable-stayed bridges during the last two decades. In this study, the effects of vehicle speed, which is one of the important parameters of vehicle-bridge interaction, and variations in the speed are investigated to determine the bridge responses. Tatar bridge which is the second largest cable-stayed bridge in the world, is considered by 3-D finite element model. Two sets of traffic load combinations are applied for three different vehicle speed values and analyses are conducted to evaluate the speed induced dynamic responses of the bridge. The largest responses in the bridge are generally observed for low speeds. On the other hand, larger responses begin to occur in the mid-span after the vehicles leave the mid-span of the bridge for higher speeds.

Keywords: Cable stayed bridge, vehicle-induced bridge vibrations, speed parameter

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

İlk modern kablolu köprülerin trafik yükleri altında oldukça rijit davranması, estetik olarak hoş görünmesi, ekonomik ve yapımının kolay olması kablolu köprü sistemlerinin uygulama alanını artırmıştır. Kablolu köprüler yakın tarihlere kadar orta açıklıklar için tercih edilirdenken, son yirmi yılda hızlı bir gelişim göstererek Sutong Köprüsü gibi 1088 m merkez açıklığa kadar olan köprüler için uygulanabilir hale gelmişlerdir. Kablolu köprüler betonarme, çelik ya da bu çalışmaya konu olan Tatar Köprüsünde

olduğu gibi betonarme-çelik kompozit olarak tasarlanabilmektedir. Son yıllarda dünyada hızlı taşıtların ve büyük açıklıklı köprülerin artışıyla birlikte taşıt köprü etkileşimi kaynaklı köprü dinamik davranışının irdelenmesi önem kazanmıştır.

Taşıtlar hareketinden kaynaklanan kablolu köprülerin dinamik analizi farklı araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Meisenholder ve Weidlinger [1] kablolu köprüleri elastik zemine oturan kiriş olarak ele almış ve yüksek hızlı araçların kablolu köprülerde oluşturacağı dinamik etkilerin modellenmesinde

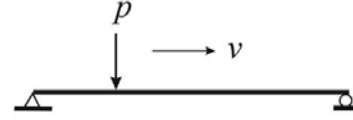
kullanılabilecek bir yöntem ortaya koymuşlardır. Wang ve Huang [2] kablolu köprülerin titreşiminde yol pürüzlülüğünün etkisini dikkate almışlardır. Khalifa [3] trafik yükleri için kablolu köprülerin dinamik tepkilerini, geliştirdikleri bir bilgisayar programı ile belirlemişlerdir. Çalışmada kablo titreşimi, sönüm, taşıt-köprü etkileşimi, köprü tabliyesi pürüzlülüğü, açıklık uzunlukları ve taşıt hızı etkileri parametrik bir bakış açısıyla incelemişlerdir. Yang ve Fonder [4] kabloların lineer olmayan özelliklerini dikkate alarak oluşturdukları bir kablolu köprü modeli ile hareketli yükler etkisindeki kablolu köprülerin dinamik davranışını araştırmışlardır. Diana ve diğ. [5] demiryolu hattının geçirilmesi durumunda kablolu köprüleri incelemiş ve çarpma etkisi açısından kablolu köprülerin asma köprülere oranla daha hassas olduğunu ortaya koymuşlardır. Au ve diğ. [6-7] demiryolu trafiği etkisindeki kablolu köprülerdeki çarpma etkilerini değişik taşıt modelleri kullanmak suretiyle incelemişlerdir. Guo ve Xu [8] kablolu bir köprü ile köprü üzerinde hareket eden bir traktör-çekici etkileşimini dikkate almışlardır. Yau ve Yang [9] çalışmalarında özellikle kablolu köprülerde yüksek hızlı trenlerin neden olabileceği rezonans durumlarına engel olacak, birçok alt sistemden oluşan karma bir kütle sönüm sistemi önermişlerdir.

Bütün köprü türlerinin modellenmesinde olduğu gibi kablolu köprülerin modellenmesinde de köprü üzerinde hareket eden taşıtlar ile köprü arasında meydana gelen etkileşim kuvvetleri son derece önem taşımaktadır. Bu çalışmada taşıt kaynaklı köprü titreşimlerinin değerlendirilmesinde, dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biri olan hız parametresinin farklı taşıt yüklemeleri altında irdelemesi yapılmıştır. Kablolu köprülerin merkez açıklıklarının son yıllarda önemli artış göstermesi, söz konusu köprü sistemlerinin trafik yükleri açısından incelenmesinin önemini daha da arttırmıştır.

2. TAŞIT KÖPRÜ ETKİLEŞİMİ (VEHICLE-BRIDGE INTERACTION)

Hareketli trafik yüklerinin dinamik etkisi, ne mevcut bir köprü geliştirilirken, ne de yeni bir köprü tasarlanırken göz ardı edilebilir. Şartnamelerde genellikle trafik yükleri için en kritik yüklemeleri gösteren özel kombinasyonlara yer verilmemektedir. Yalnızca taşıtlar ve özellikleri tanımlanmakta, kombinasyonların oluşturulması; ekonomi, güvenlik, kullanılabilirlik gibi parametreler dikkate alınarak köprünün modellenmesi, tasarımı gerçekleştirilecek olan mühendise bırakılmaktadır.

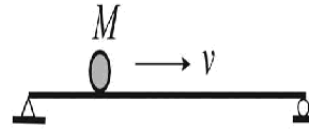
Birçok durumda özellikle de taşıt kütesinin köprü kütesine oranının düşük olduğu durumlarda, daha basit modeller oluşturulabilmesi için taşıtın elastik ve ataletsel etkileri ihmal edilebilir. Hareketli yük modeli olarak tanımlanan bu modelde, köprü üzerinde hareket halinde olan taşıt Şekil 1'deki gibi hareketli tekil yük olarak dikkate alınmaktadır [10].



Şekil 1. Hareketli yük modeli [10] (Moving load model)

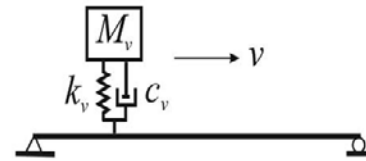
Köprü taşıt etkileşiminin ihmal edildiği bu durumda, hareketli yük modeli sadece büyük sistemin (köprü) tepkisinin hesaplanmasında kullanılabilir. Hareketli yük modeli, taşıt kaynaklı köprü titreşimlerinin irdelemede kullanılan en basit modelledir. Bu modelde her ne kadar temas kuvvetleri ihmal edilse de, hareketli yükler altında köprünün temel dinamik karakteristikleri yeterli doğrulukta elde edilebilir. Bu nedenle, hareketli yük modeli taşıt kütesinin köprü kütesine oranının çok küçük olduğu ve sadece köprü davranışının incelendiği durumlarda iyi bir modeldir.

Taşıt ataletinin ihmal edilemeyeceği durumlarda hareketli yük modeli yerine Şekil 2'deki hareketli kütle modeli kullanılmalıdır.



Şekil 2. Hareketli kütle modeli [10] (Moving mass model)

Hareketli kütle modelinde hareketli kütle köprü üzerindeki sıçraması dikkate alınmamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ve yol düzensizliklerinin söz konusu olması durumunda ve köprü üzerinden yüksek hızlı taşıtların geçmesi durumunda, sıçrama etkisinin önemli olması beklenmektedir. Bu durumdaki taşıt modeli Şekil 3'de görülen yay-sönümleyici birimi ile desteklenen hareketli yaylı kütle modelidir [10].



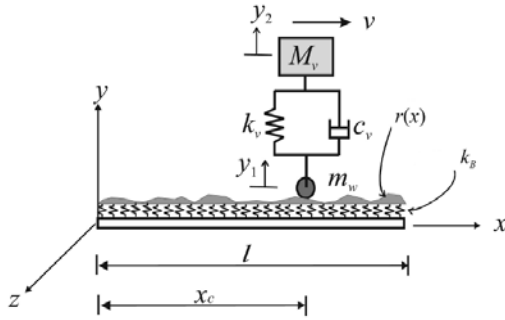
Şekil 3. Hareketli yaylı kütle modeli [10] (Sprung mass model)

Daha karmaşık taşıt modellerinin seçilmesi daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlasa da, bazı zorluklara da neden olmaktadır. Basit bir modelin seçilmesi taşıt hareketleri nedeniyle köprüde meydana gelen etkilerin belirlenmesini kolaylaştırmaktadır.

Taşıtların köprü sisteminin dinamik tepkisi araştırılırken, birincisi köprü ikincisi de taşıt için olmak üzere iki hareket denklemi yazılabilir. Taşıt ve köprünün temas ettiği noktalarda yazılan hareket denklemleri

birbiriyle bağlantılı ve non-lineerdir. Etkileşim kuvvetlerinin zamana ve mesafeye bağlı olması nedeniyle, temas kuvvetlerinin fonksiyonu olan sistem matrisleri her zaman dilimi için zaman-tanım alanında analizlerle güncellenmeli ve çarpanlarla artırılmalıdır. Bu hareket denklemlerinin çözümü genellikle iteratif bir yapıya sahip yöntemlerle gerçekleştirilmektedir [10].

Köprünün kiriş eleman ve köprü üzerinden sabit v hızı ile geçen taşıtın hareketli yaylı kütle modeli ile tanımlandığı Şekil 4'deki köprü taşıt etkileşim elemanı için $r(x)$ yüzey düzensizliğini, k_B ise köprü kirişi rijitliğini tanımlamaktadır.



Şekil 4. Köprü taşıt etkileşim elemanı analitik modeli [10] (Vehicle-Bridge interaction element)

Denklem oluşturulurken kiriş elemanın rijitliği, köprü ve taşıt sistemlerinin toplam rijitliği olarak hesaplanmaktadır. Hareket denkleminde, k_v süspansiyon rijitlik katsayısını, c_v süspansiyon sönümlenme katsayısını, m_w tekerlek kütlesini ve M_v taşıttan gelen kütleyle sembolize etmektedir. Hareketli yaylı kütle modeli iki düğüm noktalı sistem olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, statik denge durumu referans alınarak ölçülen iki düğüm noktası düşey yerdeğiştirmelerine ait koordinatlar $\{z\}^T = \{z_1, z_2\}$ şeklinde tanımlanmış olsun. Noktasal yerdeğiştirmelere $\{z\}^T$ bağlı olarak dış kuvvetler $\{p_v\}^T = \{p, 0\}$ ifadesiyle tanımlanırken, p iki kütle toplam ağırlığını göstermektedir, $p = -(M_v + m_w)g$. Burada g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Bu durumda Şekil 4 ile gösterilen hareketli yaylı kütle sisteminin hareket denklemi,

$$\begin{bmatrix} m_w & 0 \\ 0 & M_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p + f_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada f_c taşıt ve köprü elemanı arasındaki temas kuvvetidir. x_c taşıtın etkime noktasına ait koordinat ve $\{N_c\}$, x_c temas noktasındaki

köprü düşey yerdeğiştirmesini belirlemek amacıyla kübik Hermitian interpolasyon fonksiyonlarını içeren vektör olmak üzere, temas kuvveti f_c ,

$$f_c = k_B (\{N_c\} \{u_b\} + r_c - z_1) \geq 0 \quad (2)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada $\{u_b\}$ kiriş elemana ait düğüm noktası yerdeğiştirmesini ve r_c , x_c temas noktasındaki yüzey düzensizliğini ifade etmektedir. Hareketli yaylı kütle sistemi ile etkileşim halindeki bir köprü elemanının hareket denklemi ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} [m_b] \{\ddot{u}_b\} + [c_b] \{\dot{u}_b\} + [k_b] \{u_b\} \\ = \{p_b\} - \{N_c\} f_c \end{aligned} \quad (3)$$

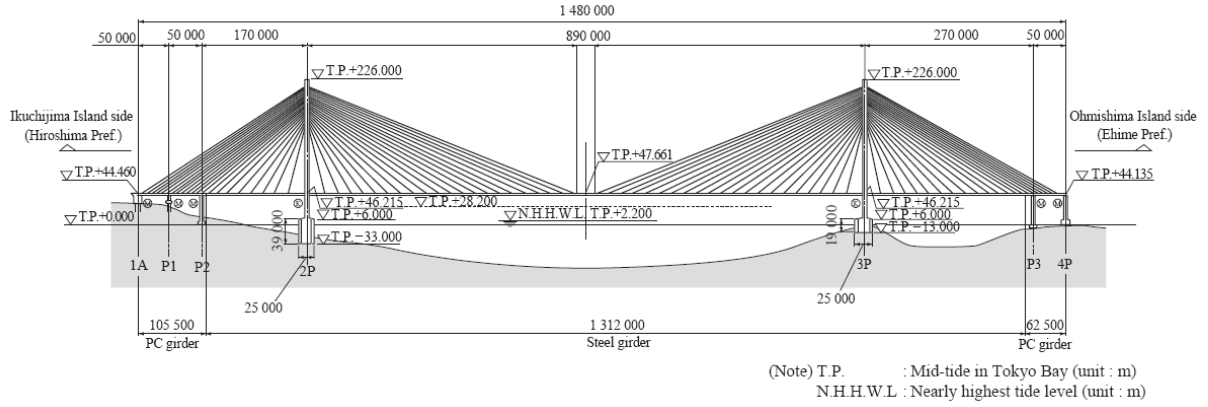
Burada $[m_b]$, $[c_b]$ ve $[k_b]$ sırasıyla, köprü elemanının kütle, sönüm ve rijitlik matrisini göstermektedir. $\{p_b\}$ ise köprü üzerinde hareket eden dış noktasal kuvvetleri temsil etmektedir [10].

3. KABLOLU KÖPRÜ MODELİ (CABLE-STAYED BRIDGE MODEL)

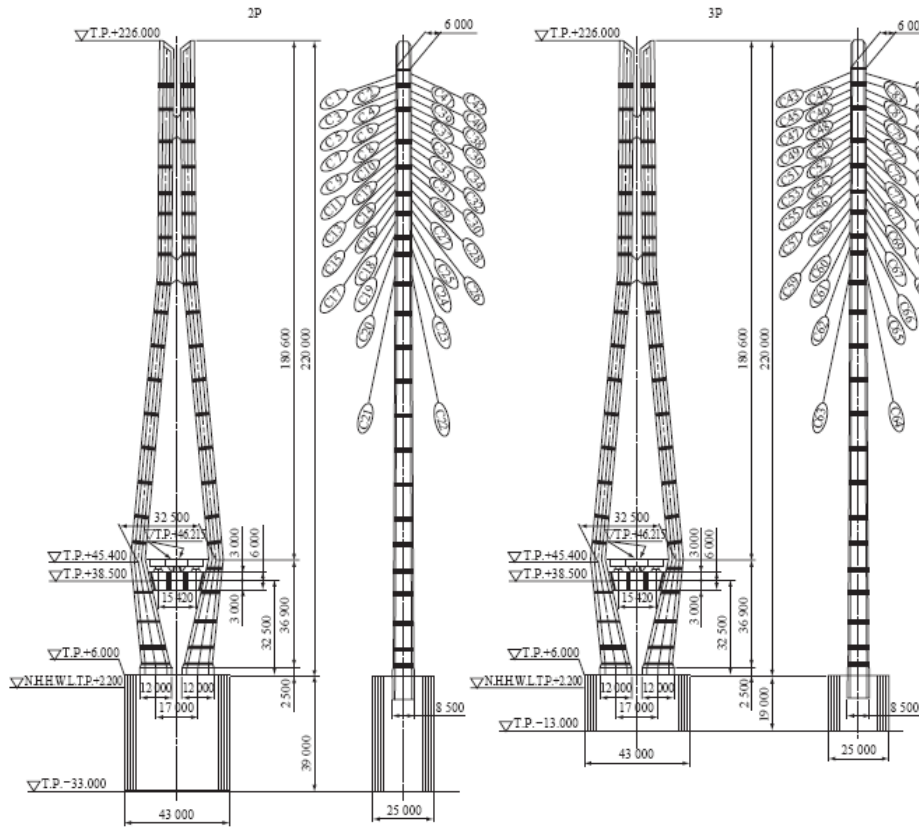
Taşıt kaynaklı köprü titreşiminin ve taşıt hızlarının köprü davranışına etkilerinin incelenmesi amacıyla kablolu bir köprünün sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bu amaçla dünyanın ikinci büyük açıklıklı kablolu köprüsü olan Tatar Köprüsü nümerik model olarak seçilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin bilgisayar ortamında oluşturulmasında SAP2000 [11] yapısal analiz programı kullanılmıştır.

Japonya'nın Ikuchijima adası ile Ohmishima adası arasındaki bağlantıyı sağlayan, toplam uzunluğu 1480 m ve merkez açıklığı 890 m olan Tatar köprüsü, dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsü durumundadır. Şekil 5'de köprünün boykesiti görülmektedir. Kulelerin yüksekliği 220 m olup, ters-Y şeklinde tasarlanmıştır. İki düzlemde ve 21 seviyeli kablolar kullanılmıştır. En uzun kablo boyu 460 m olup, kule kesitleri ve kablo yerleşimi Şekil 6'da verilmiştir. Köprünün 1312 m'lik tabliye kısmı çelik olup, kenar açıklıklarda öngerilmeli beton tabliye kullanılmış ve böylece karşı ağırlıkla denge koşulu sağlanmıştır. Köprünün toplam platform genişliği 30.6 m, tabliye kesit yüksekliği 2.7 m'dir. Köprü ana tabliyesi dengeli konsol yöntemi kullanılarak inşa edilmiştir [12].

Köprünün 3-boyutlu modeli çubuk (frame) ve kablo elemanları kullanılarak hazırlanmıştır. Daha sonra, köprü elemanları için kullanılan çelik ve beton malzeme özellikleri tanımlanmış ve kesitler girilerek elemanlara atanmıştır. Tabliye kesitleri ise SAP2000 programının içinde yer alan "kesit tasarımcısı" modülü ile çizilmiştir.



Şekil 5. Tataru köprüsü genel görünümü [12] (General view of the Tataru Bridge)

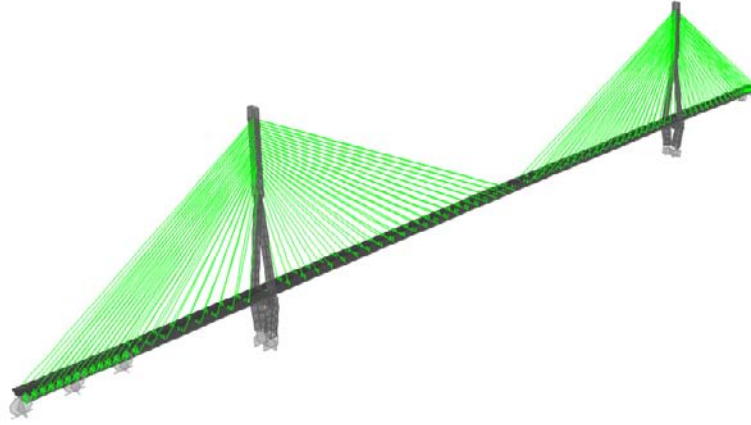


Şekil 6. Kule kesitleri ve kablo yerleşimi [12] (Tower sections and cable-positions)

Çalışmada malzeme özelliklerinin doğrultudan bağımsız olarak tanımlandığı izotropik malzeme özelliği dikkate alınmıştır. Genel bir kural olmamakla birlikte, beton ve çelik için genellikle izotropik davranış kabulü yapılmaktadır. Modelde toplam 202 çubuk elemanı, 168 kablo elemanı ve 371 düğüm noktası bulunmaktadır (Şekil 7). İki boyutu üçüncü boyutunun yanında küçük olan çubuk elemanlar SAP 2000'de çubuk (frame) eleman türü ile tanımlanmıştır. Bu bakımdan, köprü sistemine ait ana kiriş ve kuleler çubuk eleman ile modellenmiştir. Çubuk eleman düzlem ve üç boyutlu yapılarda kirişleri, kolonları ve kafes elemanları modellemek için kullanılan oldukça yaygın bir eleman türüdür. Çubuk elemanda, elemanın her iki ucundaki düğüm noktalarına ait

altışar serbestlik derecesi de dikkate alınmaktadır. Uçlarından moment aktarmayan kafes veya kablo elemanları modellenmek istendiğinde, çubuk uçlarındaki düğüm noktalarının dönme serbestlikleri kaldırılmaktadır.

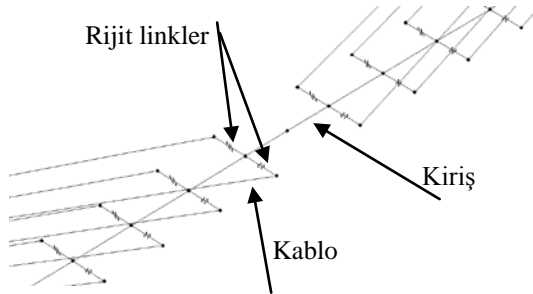
Kablolarda, SAP2000 programının içinde hazır bulunan özel kablo elemanları ile modellenmiştir. Kablo elemanı, narin kabloların kendi ağırlığı altındaki sehimlerinden kaynaklanan nonlineer davranışı modellemek için kullanılan bir eleman türüdür. P-delta ve büyük yerdeğiştirmelerin neden olduğu nonlineer davranış kablo elemanı için dikkate alınmaktadır.



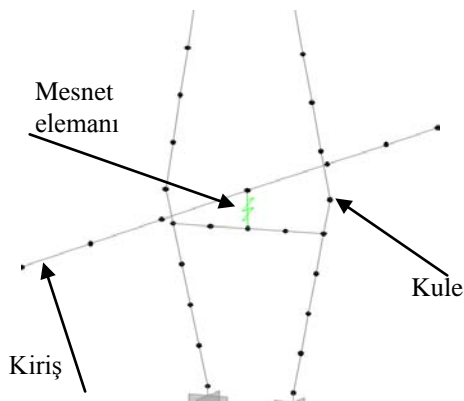
Şekil 7. Tatar köprüsü üç boyutlu sonlu eleman modeli (3D finite element model of the Tatar Bridge)

Kablo elemanlarının nonlinear bir davranış sergilemesi nedeniyle, çalışmada taşıt dinamik yüklemesi için zaman tanım alanında nonlinear bir analiz yöntemi seçilmiştir. Kablo elemanı her bir eleman ucundaki üç ötelenme serbestliğini dikkate alırken, dönme serbestlikleri dikkate alınmamaktadır.

Modelde ana kirişleri oluşturan çubuk elemanlardan her iki tarafa sanal rijit elemanlar tanımlanarak, kabloların ana kirişe olan bağlantı noktalarının gerçekçi bir şekilde modellenmesi Şekil 8'deki gibi sağlanmıştır.



Şekil 8. Kablo – Kiriş birleşimi için kullanılan rijit link elemanları (Rigid link members used for cable-beam connections)



Şekil 9. Mesnetlerin link eleman ile modellenmesi (Modeling of the supports by link members)

Köprü ana kirişi ile kule arasındaki mesnet, tabliyenin sadece köprü boyuna yönde hareketine izin vermekte olup, düşey ve yatay yönde köprüyü tutmaktadır. Köprü ana kirişini oluşturan çubuk elemanı ile kule kirişi arasında lineer bir bağlantı elemanı tasarlanmış ve köprü boyuna yönünde 2000 t/m'lik rijitlik tanımlanmıştır. Diğer yönler ise Şekil 9'daki gibi sabit tutulmuştur. Köprü'nün diğer ayaklarındaki mesnet koşulları ise Tablo 1'de özetlenmiştir. Tabloda belirtilen 1A, P1, P2, P3, 2P, 3P ve 4P mesnet noktaları Şekil 5'de görülmektedir.

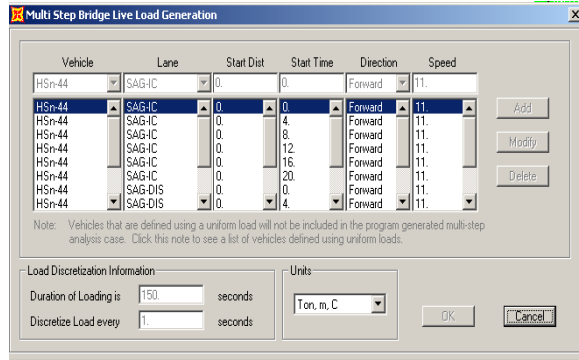
Tablo 1. Köprü mesnetlenme koşulları (Bridge support conditions)

Mesnet	1A-4P	P1-P2-P3	2P-3P
Düşey doğrultu	S	S	S
Köprü enine doğrultu	S	H	S
Köprü boyuna doğrultu	H	H	2000 t/m

(S: sabit , H: hareketli)

Köprü modelinin tamamlanmasından sonra köprüye etkileyecek taşıt yüklemesi tanımlanmıştır. Köprüde toplam dört trafik şeridi mevcuttur. Taşıt etkisini incelemek amacıyla oluşturulacak yüklemeye için SAP2000 programında mevcut olan "çok adımlı köprü hareketli yük oluşturma" modülü kullanılmıştır. Bu modüle yüklemeye kullanılacak taşıt tipi seçildikten sonra, bu taşıtın hangi şeritten ve köprü boyunca hangi noktadan harekete başlayacağı belirtilmiştir. Tanımlanan taşıtların hangi zaman aralıklarında ve hangi yöne doğru harekete başlayacakları da bu modülle tanımlanmıştır. Bununla birlikte, taşıt hızları da bu modül içinde belirtilmiştir (Şekil 10).

Tablo 2'de Tatar köprüsüne ait kesit ve malzeme özellikleri verilmiştir. Model oluşturulurken mümkün olduğunca gerçek verilere yakın değerler kullanılmıştır.

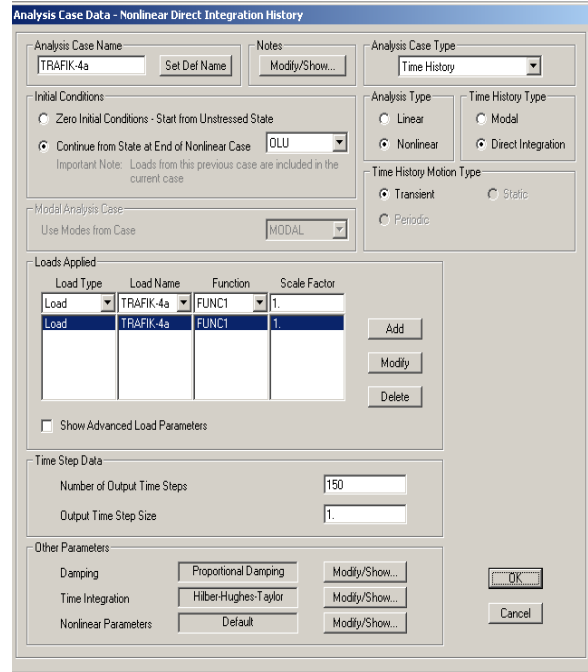


Şekil 10. Trafik yüklemesinin tanımlanması (Generation of traffic loading)

Tablo 2. Tatar Köprüsü tasarım verileri [12] (Tatar bridge design specification)

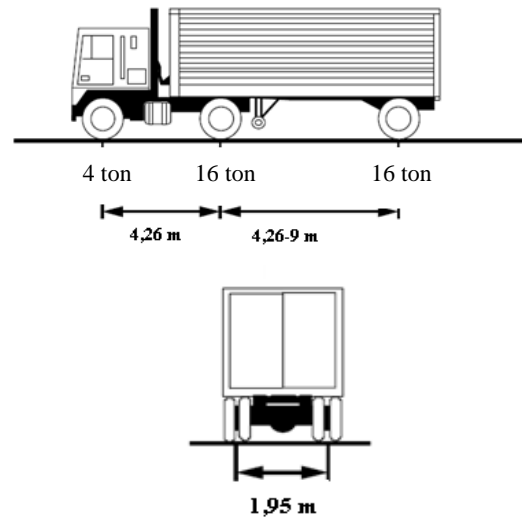
Eleman	Açıklama	
Köprü tipi	Üç açıklıklı kompozit kablolu köprü	
Köprü açıklığı	L = 1480 m	
Açıklık boyu	L = 270 + 890 + 320 m	
Tasarım hareketli yükü	B (AASHTO)	
Yol özelliği	Kategori : 1 / Sınıf : 3	
Tasarım hızı	80 km/h	
Şerit sayısı	2 + 2 = 4	
Kule	Şekil	Ters Y
	Yükseklik	220 m
	Kesit boyutları	Tabanda : 12x8,5 m Tepede : 6x6 m
Ana kiriş	Şekil	Çelik Kısım: 3-hücreli çelik kutu kesit
		Öngörülen beton kısmı: 3-hücreli betonarme kutu kesit
	Kiriş yüksekliği	H = 2,7 m
	Kiriş genişliği	30,6 m
Kablo yerleşim şekli	Yelpaze sistem	
Kablo çapı	108-170 mm arasında değişmekte	
Çelik elemanlar	Kule	SS400, SM490Y, SM570
	Ana kiriş	SS400, SM490Y
Betonarme standart tasarım gerilmesi	24 N/mm ²	
Müsaade edilebilir kablo gerilmesi	640 N/mm ²	

Taşıt dinamik yüklemesi, zaman tanım alanında nonlineer analiz olarak gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında dinamik analiz gerçekleştirilirken doğrudan integrasyon yöntemi tercih edilmiştir. Taşıt dinamik yüklemesi analizi, köprü zati yüklemesi ardından başlatılarak köprünün zati yükler altında yapmış olduğu deformasyonlar sonucu değişen rijitliği de göz önüne alınmıştır (Şekil 11).



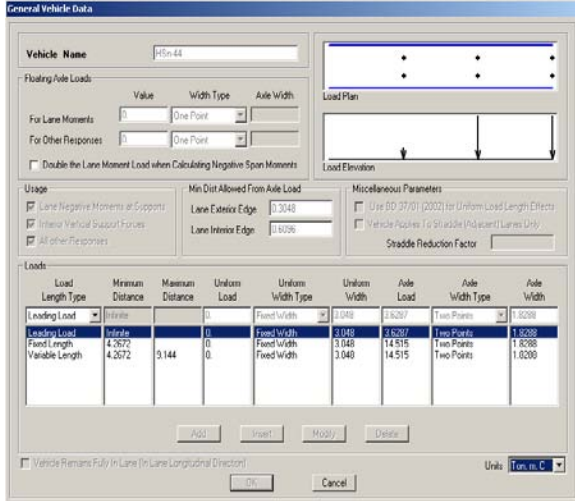
Şekil 11. Trafik yük analizinin tanımlanması (Generation of traffic load case analysis)

Bu çalışmada AASHTO'da [13] tanımlı en ağır kamyon yüklemesi olan HS 20-44 kamyonu seçilerek, kablolu köprü sisteminde taşıt kaynaklı titreşim etkilerinin incelenmesi için elverişsiz bir yükleme durumu oluşturulmuştur. HS 20-44 kamyonunun genel görünümü Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. HS20-44 kamyonu (HS20-44 truck)

Çalışmada dikkate alınan taşıt kütlelerinin köprü kütlelerine oranının düşük olması ve sadece köprü dinamik davranışının incelenmesi nedeniyle, trafik yüklerinin köprü sistemine uygulanabilmesi için daha önce belirtilen yöntemlerden hareketli yük modeli seçilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. AASHTO HS 20-44 kamyonu tanımlanması (Generation of AASHTO HS 20-44 track)

4. NÜMERİK ÇÖZÜMLER (NUMERICAL SOLUTIONS)

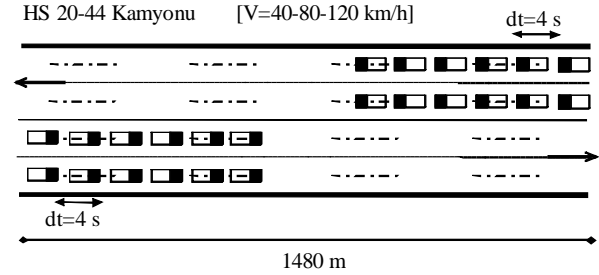
Tatara köprüsü 1480m uzunluğuna sahip, gidiş yönünde iki ve dönüş yönünde iki olmak üzere toplam dört şeritli, dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsüdür. Bu çalışmada kablolu bir köprüün modellenmesinde ve taşıt köprü etkileşim problemlerinin çözümünde en önemli etkenlerden biri olan köprü üzerinden geçen hareketli taşıtların hızlarının köprü dinamik davranışına etkisi irdelenmiştir. Taşıt köprü etkileşimi, hız parametresi açısından incelenirken daha gerçekçi sonuçlar elde etmek amacıyla Trafik 1 (Trafik 1a, Trafik 1b, Trafik 1c) ve Trafik 2 (Trafik 2a, Trafik 2b, Trafik 2c) olmak üzere iki farklı trafik yüklemesi kombinasyonu oluşturulmuş ve 40 km/h, 80 km/h ve 120 km/h hız değerleri için analizler yapılmıştır. Çalışmada “a” yük kombinasyonu 40 km/h, “b” yük kombinasyonu 80 km/h ve “c” yük kombinasyonu 120 km/h hızları için oluşturulan yük kombinasyonlarıdır. Tatara köprüsünün tasarım hızı 80 km/h’dir. Bu hız yönetmeliklerde müsaade edilen hız sınırıdır. Ancak trafik koşulları dikkate alındığında taşıtların daima tasarım hızıyla hareket etmeleri mümkün olmadığından, bu çalışmada farklı hızlar için köprü davranışı incelenmiştir.

Çalışmada analiz süresi en düşük hızla (40km/h) hareket eden taşıtın köprüye girişi ile köprüden ayrılışı arasındaki süreye bağlı olarak belirlenmiştir. Köprünün toplam uzunluğunun (1480 m), en düşük taşıt hızına (40 km/h=11.11 m/s) bölünmesiyle elde edilen süreye yakın bir değer olan 150s analiz süresi olarak tespit edilmiştir.

4.1. Trafik 1 Yükleme (Traffic 1 Loading)

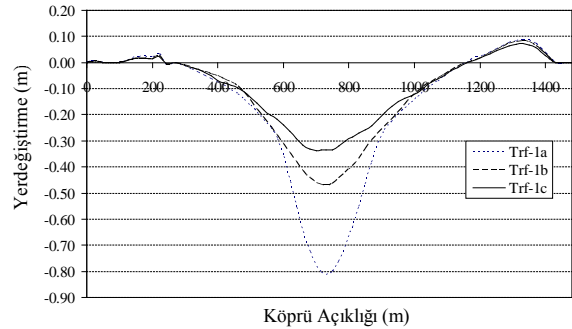
Trafik 1 yüklemesi Şekil 14’de görüldüğü gibi model köprünün gidiş yönünde iki ve dönüş yönündeki iki şeridinden 4 s zaman aralığıyla altışar adet HS20-44

kamyonunun geçirildiği ve köprü davranışı hakkında önemli bilgiler verecek bir yükleme kombinasyonudur. HS20-44 kamyonu Trafik 1a, Trafik 1b ve Trafik 1c yükleme durumları için köprüden geçirilmiş ve taşıt kaynaklı titreşim problemlerinin çözümünde bilinmesi gereken önemli reaksiyonlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.



Şekil 14. Trafik 1 yük kombinasyonu modeli (Traffic 1 load combination model)

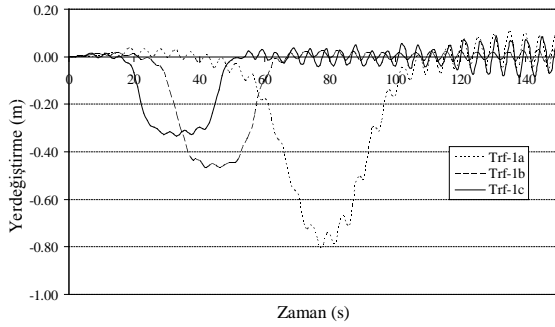
Trafik 1 yük kombinasyonu üç farklı hız için modellenmiş ve bu kombinasyonların köprü boyunca meydana getirdiği maksimum yerdeğiştirmelerin köprü boyunca değişimi Şekil 15’de gösterilmiştir. Düşük hızla hareket eden taşıtların meydana getirdiği maksimum yerdeğiştirmeler şekildenden anlaşılacağı gibi, yüksek hızla hareket eden taşıtlara göre daha fazladır. Bu farklılıklar özellikle açıklık ortasında daha da belirginleşmektedir. Kenar açıklıklarda yerdeğiştirmeler birbirine yakın ve açıklık ortasında meydana gelen yerdeğiştirmelere oranla daha küçük değerdedir.



Şekil 15. Trafik 1 yüklemesi için köprü boyunca oluşan maksimum yerdeğiştirme profili (Maximum displacement profile of the bridge deck for Traffic 1 load combination model)

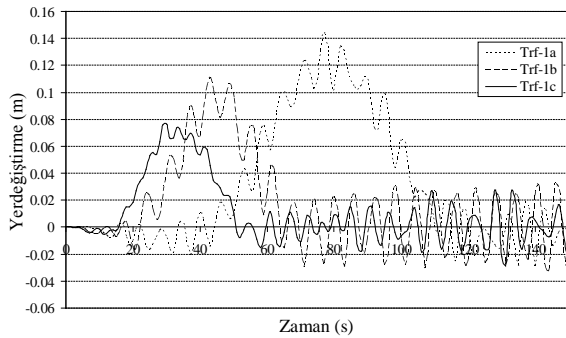
Köprünün açıklık ortasında meydana gelen zamana bağlı yerdeğiştirme değişimleri Şekil 16’da verilmiştir. Açıklık ortasındaki en büyük yerdeğiştirme Trafik 1a yükleme durumunda oluşmaktadır ve yaklaşık 0,80 m mertebelerindedir. Trafik 1b ve Trafik 1c yüklemelerinde bu değer sırasıyla 0,44 ve 0,33 m’ye düşmektedir. Taşıtların açıklık ortasından ayrılmasıyla yerdeğiştirmeler hızla küçük değerlere düşmekte, ancak zaman içinde yeniden artış göstermektedir. Trafik 1a yüklemesi altında meydana gelen maksimum yerdeğiştirme değerinin Trafik 1b ve Trafik 1c yüklemeleri altındaki

değerlerin iki katını geçmesi dikkat çekici bir noktadır. Aynı yükler altındaki köprüde meydana gelen yerdeğiştirmeler arasındaki bu fark taşıt hızının önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 16. Köprü açıklık ortası yerdeğiştirmelerinin zamana bağlı değişimi (Trafik 1) (Displacement-time variation of the deck center for Traffic 1 load combination model)

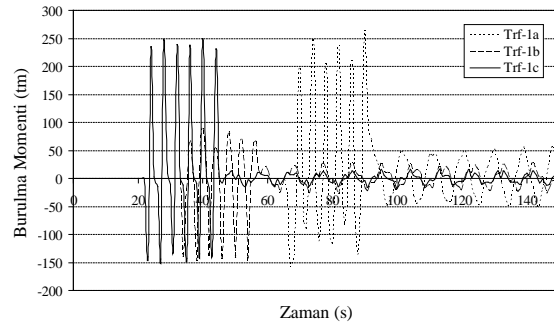
Kule tepe noktası yerdeğiştirmeleri Şekil 17'de görüldüğü gibi taşıt hızlarının azalmasına bağlı olarak artış göstermektedir. En büyük yerdeğiştirmeler Trafik 1a yüklemesi altında 0,15 m mertebelerinde ortaya çıkmaktadır. Taşıt yükünün fazla olduğu yüklenme durumları için modelin oluşturulmasında kule yerdeğiştirmeleri önemli bir parametre olarak dikkate alınmalıdır. Kulenin uzun süre deforme kalmasına neden olan yüklenme tipi burada Trafik 1a yüklemesidir. Köprü tasarımında en önemli etkenlerden birisi kabloları uygulanacak eksenel kuvvetlerdir. Kulenin bir yöndeki uzun süreli yerdeğiştirmesi kablo eksenel kuvvetlerinin düşmesine ve dolayısıyla da kabloların yük taşıma kapasitesinin azalmasına neden olabilecektir. Bu durum kablo davranışını, sonuç olarak da köprünün davranışını olumsuz etkileyecektir. Taşıt yüklerinin artışının yerdeğiştirmeleri de arttıracığı dikkate alındığında, tasarımda bu durum üzerinde önemle durulmalıdır.



Şekil 17. Kule tepe noktası yerdeğiştirmelerinin zamana bağlı değişimi (Trafik 1) (Displacement-time variation of the top of the tower for Traffic 1 load combination model)

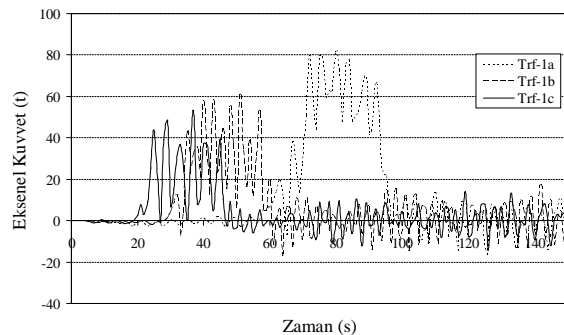
Şekil 18'de görüldüğü gibi Trafik 1a ve 1c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen pozitif burulma momentleri birbirine çok yakın değerlerde olup, yaklaşık olarak 250 tm

mertebesindedir. Trafik 1b yüklemesi nedeniyle meydana gelen pozitif burulma momentleri diğer iki yüklemeye göre daha düşüktür (100 tm). Bununla birlikte, her üç yüklenme için de negatif burulma momentleri birbirine yakın olup, yaklaşık 150 tm mertesinde. Burulma momentinin en küçük çıktığı yüklenme durumu model köprünün tasarım hızı olan 80km/h'e karşılık gelen yüklenme durumudur. Taşıtların, köprüden sürekli olarak bu tasarım hızında geçmeyeceği düşünüldüğünde, burulma momentinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmasını sağlayacak kesitler teşkil edilmelidir. Ayrıca, taşıtlar açıklık ortasından ayrıldıktan sonra açıklık ortasında meydana gelen burulma momentleri her üç yüklenme durumu için birbirine çok yakın değerler almaktadır.



Şekil 18. Açıklık ortası burulma momentlerinin zamana bağlı değişimi (Trafik 1) (Torsional moment-time variation of the deck center for Traffic 1 load combination model)

En uzun kablodaki eksenel kuvvet değişiminin en belirgin ve en büyük olduğu yüklenme Trafik 1a yüklemesidir (Şekil 19). Bu değer Trafik 1a yüklemesinde 80 ton seviyesinde iken, Trafik 1b ve Trafik 1c yüklemelerinde birbirine çok yakın olup, 60 ton mertebelerindedir. Taşıtların hızı azaldıkça diğer bir deyişle taşıtların köprüde kalış süreleri arttıkça kabloda meydana gelen eksenel kuvvetler de büyümektedir. Aynı anda taşıtların büyük çoğunluğunun açıklık ortasında bulunduğu andaki eksenel kuvvetler en büyük değerlerdir.



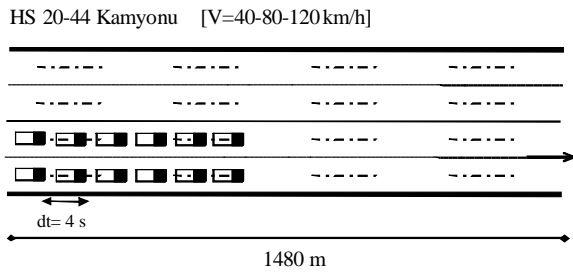
Şekil 19. En uzun kabloya ait eksenel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi (Trafik 1) (Axial force-time variation of the longest cable for Traffic 1 load combination model)

Şekil 19'da da görüldüğü gibi açıklık ortasında bulunan taşıt sayısı azaldıkça kablo eksenel kuvvet

değerlerinde de büyük azalmalar görülmektedir. Açıklık ortasından taşıtların uzaklaşması neticesinde her üç yükleme altında meydana gelen kablo eksenel kuvvet değerleri birbirine çok yaklaşmakta ve taşıtların açıklık ortasında bulunduğu durum için çıkan değerlere göre çok küçülmektedir

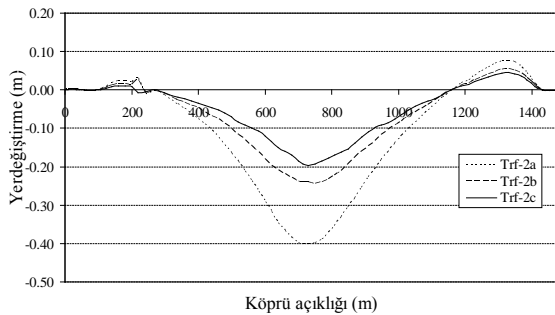
4.2 Trafik 2 Yüklemesi (Traffic 2 Loading)

Şekil 20’de görüldüğü gibi Trafik 2 yüklemesinde köprünün yalnızca gidiş yönündeki iki şeridinden 4s zaman aralığıyla altışar adet HS20-44 kamyonu geçirilmiş ve köprünün bu yükleme altındaki davranışı önceki yükleme durumuyla karşılaştırılarak, tasarımda dikkate alınması gereken noktalar belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 20. Trafik 2 yük kombinasyonu modeli (Traffic 2 load combination model)

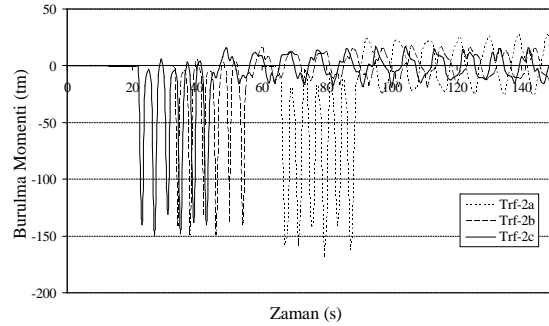
Trafik 2 yüklemesi altında, köprü üzerinde farklı hızlarla hareket eden taşıtların yarattıkları yerdeğiştirme değişimleri irdelenmiş ve köprü boyunca meydana gelen maksimum yerdeğiştirme profili Şekil 21’de verilmiştir. Taşıt sayısı ve yük kombinasyonları değiştirilse de şekilden açıkça anlaşılmaktadır ki taşıt hızı azaldıkça ve taşıtın köprü üzerinde kalış süresi arttıkça köprü boyunca meydana gelen yerdeğiştirmeler de artmaktadır. Köprünün yalnızca tek yönünün dolu olması yerdeğiştirme profilini değiştirmemiş, sadece Trafik 1 yüklemesinde meydana gelen yerdeğiştirmeleri yarıya indirgemıştır.



Şekil 21. Trafik 2 yüklemesi için köprü boyunca oluşan maksimum yerdeğiştirme profili (Maximum displacement profile of the bridge deck for Traffic 2 load combination model)

Trafik 2 yüklemesi, köprünün yalnızca tek yönünün taşıt trafiği taşıdığı yükleme kombinasyonudur. Kablolu köprüler gibi narin köprüler için dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biri de burulma momentidir. Tek yöndeki trafik yükü arttıkça burulma

momenti de artış gösterecektir. Şekil 22 irdelendiğinde, Trafik 2 yüklemesi altında açıklık ortasındaki burulma momentlerinin taşıtların hızlarından neredeyse bağımsız olarak birbirine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Burada hız parametresinin burulma momentini fazla etkilemediği görülmektedir. Köprünün burulma davranışında yükler ve yüklerin konumu ön plandaki parametrelerdir. Burada trafik yüklemesinin yalnızca gidiş yönünden iki şeritli olması nedeniyle burulma momentlerine ait maksimum değerler, negatif işaretli olarak ortaya çıkmıştır. Elde edilen bu negatif maksimum değerler, trafik yüklemesinin hem geliş hem de gidiş yönünde ikişer şerit olarak verildiği Trafik 1 yüklemesi ile elde edilen negatif burulma momentlerine oldukça yakın çıkmıştır. Bunun yanında trafik yüklemesinin her iki yönden irdelenmesine bağlı olarak, Trafik 1 yüklemesinde ayrıca pozitif işaretli maksimum burulma momentleri ortaya çıkmıştır.



Şekil 22. Açıklık ortası burulma momentlerinin zamana bağlı değişimi (Trafik 2) (Torsional moment-time variation of the deck center for Traffic 2 load combination model)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada köprü tasarımında da dikkate alınması gereken taşıt kaynaklı titreşimlerin irdelenmesi amaçlanmıştır. Hız parametresinin taşıt köprü etkileşimindeki önemini irdelemek amacıyla, dünyanın ikinci büyük açıklığa sahip kablolu köprüsü olan Tatar Köprüsü nümerik model olarak seçilmiştir. Taşıt kaynaklı köprü titreşiminde, hız parametresinin önemini irdelemek amacıyla iki farklı trafik yükleme kombinasyonu oluşturulmuş ve bu trafik kombinasyonları altında köprünün dinamik davranışı 40km/h, 80km/h ve 120km/h hızlar için incelenmiştir. Trafik 1 yüklemesinde köprünün bütün şeritleri trafik yükü taşırken, Trafik 2 yüklemesinde yalnızca gidiş yönünde iki şeritten trafik yükleri geçirilmiştir.

İki ayrı yükleme kombinasyonu için yapılan analiz sonuçlarının irdelenmesi neticesinde hız parametresinin köprü dinamik davranışında etkili olan önemli parametrelerden biri olduğu anlaşılmaktadır. Bu bakımdan taşıt kaynaklı köprü titreşim problemlerinin incelenmesinde hız parametresi dikkate alınmalıdır. Taşıt hızlarının azalmasıyla taşıtların köprü üzerinde kalış sürelerinin artması ve dolayısıyla yüklerin köprüye daha uzun etki etmesi

nedeniyle, taşıt kaynaklı titreşimlerin neden olduğu tepki kuvvetleri genellikle taşıtların hızları azaldıkça artış göstermektedir. En büyük tepki kuvvetleri genellikle düşük hızlarda meydana gelmesine rağmen, taşıtların köprü açıklık ortasından ayrılmasından sonra, en büyük tepki kuvvetleri yüksek hızlarda elde edilebilmektedir. Bu aşamada ortaya çıkan pozitif ve negatif tepki kuvvetlerine neden olan yüklemeler, zamanla köprünün merkez açıklığını oluşturan çelik elemanlarda yorulmalara neden olabilir. Bu önemli detay tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

Kablo eksenel kuvvetlerinde hıza ve zamana bağlı büyük artış ve azalışların olması istenmeyen bir durumdur. Çalışmada dikkate alınan yük grupları için kulelerde uzun süreli sayılabilecek deformasyonlar gözlenmiştir. Bu durum kabloların eksenel kuvvetlerinde ve yük taşıma kapasitelerinde düşüşe neden olabilecektir. Taşıt yüklerinin daha da artışının deplasmanları da arttıracığı dikkate alındığında, tasarımda bu durum üzerinde önemle durulmalıdır. Bu bakımdan kule elemanlarının trafik yükleri de dikkate alınarak yeterli rijitlikte tasarlanması, kablo eksenel kuvvetlerindeki azalmayı asgari düzeye indirecektir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

c_v	Süspansiyon sönümlenme katsayısı
$[c_b]$	Köprü elemanı sönümlenme matrisi
f_c	Taşıt ve köprü elemanı arasındaki temas kuvveti
g	Yerçekimi ivmesi
$[k_b]$	Köprü elemanı rijitlik matrisi
k_B	Köprü kirişi rijitliği
k_v	Süspansiyon rijitlik katsayısı
m_w	Tekerlek kütlesi
$[m_b]$	Köprü elemanı kütle matrisi
M_v	Taşıttan gelen kütle
$\{N_c\}$	Kübik Hermitian interpolasyon fonksiyonlarını içeren vektör
p	Tekerlek kütlesi ve taşıttan gelen kütlelerin toplam ağırlığı
$\{p_b\}$	Köprü üzerinde hareket eden dış noktasal kuvvetler
r_c	Yüzey düzensizliği
$r(x)$	Yüzey düzensizliği
$\{u_b\}$	Kiriş elemana ait düğüm noktası yerdeğiştirme
x_c	Taşıttan etkime noktasına ait koordinat
$\{z\}$	Noktasal düşey yerdeğiştirme

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Meisenholder, S.G. ve Weidlinger, P., "Dynamic Interaction Aspects of Cable-Stayed Guideways for High Speed Ground Transportation", **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, ASME**, 74-Aut-R, 180-192, 1974.
2. Wang, T.L. ve Huang, D., "Cable-Stayed Bridge Vibration due to Road Surface Roughness", **Journal of Structural Engineering, ASCE**, Cilt 118, No 5, 1354-1374, 1992.
3. Khalifa, M.A., "Parametric Study of Cable-Stayed Bridge Response due to Traffic-Induced Vibration", **Computers and Structures**, Cilt 47, 321-339, 1993.
4. Yang, F. ve Fonder, G. A., "Dynamic Response of Cable-Stayed Bridges Under Moving Loads", **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, Cilt 25, 195-215, 1998.
5. Diana, G., Cheli, F. ve Bruni, S., "Railway Runnability and Train-Track Interaction in Long Span Cable Supported Bridges", **Advances in Structural Dynamics**, 43-54, 2000.
6. Au, F.T.K., Cheng, Y.S. ve Cheung, Y.K., "Impact Study of Cable-Stayed Bridge Under Railway Traffic Using Various Models", **Journal of Sound and Vibration**, Cilt 240, No 3, 447-465, 2001.
7. Au, F.T.K., Cheng, Y.S. ve Cheung, Y.K., "Effects of Random Road Surface Roughness and Long-Term Deflection of Prestressed Concrete Girder and Cable-Stayed Bridges on Impact due to Moving Vehicles", **Computers and Structures**, Cilt 79, 853-872, 2001.
8. Guo, W.H. ve Xu, Y.L., "Fully Computerized Approach to Study Cable-Stayed Bridge-Vehicle Interaction", **Journal of Sound and Vibration**, Cilt 248, No 4, 745-761, 2001.
9. Yau, J.D. ve Yang, Y.B., "Vibration Reduction for Cable-stayed Bridges Traveled by High Speed Trains", **Finite Elements in Analysis and Design**, Cilt 40, 341-359, 2004.
10. Yang, Y.B., Yau, J.D. ve Wu, Y.S., **Vehicle-Bridge Interaction Dynamics**, World Scientific, Singapore, 2004.
11. SAP2000 V11, **Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures**, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 2008.
12. Yabuna, M., Fujiwara, T., Sumi., K., Nose, T. ve Suzuki, M., "Design of Tataru Bridge", **IHI Engineering**, 1-17, 1999.
13. AASHTO, **American Association of State Highway And Transportation Officials**, Standard Specification For Highway Bridge, Thirteen Edition, Washington, 1983.