DÜMF Mühendislik Dergisi

web: http://dergipark.gov.tr/dumf

15 Temmuz Şehitler Köprüsü yeni ve eski askı kablosu düzenlemelerinin karşılaştırmalı yapısal analizi

Çağrı MOLLAMAHMUTOĞLU*
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, ,34220, İstanbul
Cagri.mollamahmutoglu@gmail.com , ORCID: 0000-0002-8847-0087, Tel: (212) 383 51 40

Geliş: 09.10.2017, Kabul Tarihi: 09.11.2017

Öz

1973'den beri İstanbul'un trafik yükünün büyük bir kısmını taşıyan, tamamı çelik kutu kesitli bir asma köprü olan 15 Temmuz Şehitler Köprüsün'de, 2015/2016 yılları arasında gerçekleştirilen geniş kapsamlı bir yenileme ve tadilat işlemiyle orijinal çapraz askı düzeni kaldırılarak düz askı sistemine geçilmiştir. Kaynaklarda eski çapraz sistem üzerine yapısal analiz alanında hemen her yönden (statik, sıcaklık değişimi, serbest titreşim, deprem) birçok çalışma bulunurken yeni düzen için bir çalışma henüz görülmüş değildir. Bu çalışmada eski ve yeni düzen için, geçmiş modellerde görülmeyen realist bir yaklaşım çerçevesinde 3 boyutlu bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen model kule ve tabliyedeki rijitleştirici levhalardan, ana kablolunun semerler üzerinden sürekli olarak geçirilmesi ve sürtünmeli temasına, plastik malzeme modeli kullanılmasından mafsal davranışı içeren gerçekçi mesnet koşullarına kadar birçok ince detay içermektedir. Bu 3 boyutlu model ile eski ve yeni düzen için köprü üzerindeki trafik yüküne, termal etkilere bağlı olarak kablo kuvvetlerindeki ve serbest titreşim frekansındaki değişimler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *15 Temmuz Şehitler Köprüsü, sonlu elemanlar yöntemi, serbest titreşim, termal etkiler*

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI:

Giriş

15 Temmuz Şehitler Köprüsü ülkemizin ilk asma köprüsü olarak 1973 senesinde hizmete girmiştir. Freeman, Fox and Partners (1968) tarafından dizayn edilen, üçer şerit gidiş ve geliş şeklinde düzenlenen, askı düzeni olarak çapraz bir sistemin seçildiği, kuleleri ise tamamen çelik kutu kesitlerden imal edilmiş köprünün ana açıklığı 1074, tabliye genişliği 33.4, deniz üzerindeki yüksekliği 65 ve kule yüksekliği ise 165 metredir. Köprü 2015/2016 yılları arasında geçirdiği tadilat sonucunda yeni düz askı kablo sistemine kavuşmuştur. Köprü, haiz olduğu önem dolayısıyla, eski çapraz sistemli haliyle daha önce birçok araştırmaya konu olmuş ve yapısal bakımdan hemen her yönden irdelenmiştir. Bugün literatürde deneysel ve teorik, hesaplamalı yapısal analiz şeklinde yaklaşımlar içeren sayısız çalışma bulmak mümkündür.

Köprü ile ilgili deneysel çalışmaların çoğu, Petrovski ve diğ. (1974), Tezcan ve diğ. (1975), Brownjohn ve diğ. (1989), Erdik ve Uçkan (1989), köprünün serbest ve/veya zorlanmış titreşimi üzerinde ölçümler yaparak, dinamik davranış karakteristiğinin ortaya çıkarılmasına, özellikle de serbest titreşim frekans ve mod şekillerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Genellikle ivmeölçerlerin kullanıldığı bu tip deneysel çalışmalarda son yıllarda uydu ve GPS (Global Positioning System) yardımıyla hassas konumlama ile uzaktan hareket algılayan yeni teknolojilerden de faydalanıldığı görülmektedir (Erdoğan ve Gülal 2010). Deneysel çalışmalar, ölçümler geliştirilen modellerin doğrulanması ve kalibrasyonunda kullanıldığı gibi yapı sağlığının sürekli takibi (structural health monitoring) bakımından da önemlidir.

Teorik çalışmalar ise sonlu elemanlar gibi sayısal metotların ve bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasına bağlı olarak artan karmaşıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Özellikle gerçek zamanlı ölçümlerle bu tip analizlerin birleştirilmesi neticesinde yapısal sağlık takibinin etkinleştirilmesi de söz konusu olmaktadır. (Çatbaş ve diğ., 2003) Buna göre yapının çeşitli yerlerine yerleştirilmiş sınırlı sayıdaki sensörden gelen verilerle kalibre edilen analiz modeliyle yapının geneli hakkında bir kanaat geliştirmek mümkün olabilmektedir. Ayrıca köprü tipi karmaşık yapıların tasarım aşamasında modellerden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla birçok dizayn parametresi kolayca optimize edilebilmektedir. Kabaca iki kategoride sınıflandırılabilecek modelleme çalışmalarında köprünün genel davranış karakteristiğini elde etmek için basit yapı elemanlarıyla (kiriş ve kafes çubuk elemanlar) bir yaklaşıma gidilmesi veya yerel etkilerin de incelenebileceği detaylara sahip, gelişmiş yapı elemanlarının da (kabuk, plak, 3D katı elemanlar) kullanıldığı karmaşık modellerin geliştirilmesi öne çıkmaktadır. İlk tipteki basit yaklaşımda (Apaydın, 2010, Günaydın ve diğ., 2014) köprü tabliyesini ve kuleleri gerçeğine yakın rijitlik ve kütle değerlerine sahip eşdeğer kiriş elemanlarla veya ikame plak elemanlarla modellemeye gidilmektedir. Daha detaylı ve sofistike olan yaklaşımda ise (Baş ve diğ.,2016), (Kılıç ve diğ. 2016) kutu kesitler ve hacimler için kabuk elemanların birleştirilmesi neticesinde gerçeğiyle birebir ölçülere sahip model parçalarının kullanıldığı görülmektedir. Genellikle daha güçlü paket programların kullanılmasını gerektiren bu anlayışta, hareketli yapısal elemanlar arasında temas tanımlanması, plastik davranış içeren gelişmiş malzeme modellerinin de kullanılmasına imkân olması bu tip modelleme tekniğinin avantajlı yönleriyken, artan hesap hacmi ve karmaşıklık dezavantaj olabilmektedir. Dolayısıyla karmaşık ve detaylı bir modelin gerçekçi ve etkin olarak oluşturulması da önemli konulardan biri haline gelmektedir.

Literatürde 15 Temmuz Şehitler Köprüsü'nün detaycı yaklaşımla modellenmesinin en gelişmiş örneği olarak, eski çapraz askı düzeni kabulü ile Huseynov (2012) öne çıkmaktadır. Bu çalışmada dahi köprü tabiyesi ve kuleler için eşdeğer kutu kesitler kullanılması yönüne gidildiği görülmektedir. 15 Temmuz Köprüsü için hâlihazırdaki çalışmaların en ilerisi Huseynov (2012) iken, Kılıç ve diğ. (2016) Fatih Sultan Mehmet Köprüsü için önerdikleri modelde tamamen orijinal geometriye sadık kalarak,

yapının birebir modelini geliştirmişlerdir. Kılıç ve diğ. (2016)'ne ait modelde mesnet koşullarının da gerçekçi bir şekilde ele alınmasına rağmen yine de bazı idealleştirmelere gidildiği görülmektedir. Her iki modelde de ana kablo süreksiz olup açıklıktan gelen kısım yaklaşım tarafına devam etmeden direkt olarak kuleye bağlanmaktadır. Statik yükleme ve frekans analizi için yapılan çözümlerde bu fark önemli olmasa da, şiddetli deprem yüklerinin etkidiği durumlarda kabloların semerle olan göreceli hareketinin göz önüne alınması önem arz edebilecektir. Eldeki çalışmada bu kısıtlama da ortadan kaldırılmakta ve 15 Temmuz Şehitler Köprüsü ilk defa hem birebir geometriye sadık kalınarak modellenmekte hem de semer ve kablolar arasında sürtünmeli bir temas tanımlanarak göreceli hareket kabiliyeti getirilmektedir. Bu şekilde 15 Temmuz Şehitler Köprüsü'nün eski çapraz ve yeni düz askı kablolu şimdiki hali ilk defa karşılaştırmalı olarak yapısal analize konu edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda kablo kuvvetlerindeki değişim ve köprü üzerinde değişik trafik yükü dağılım durumları için serbest titreşim frekanslarındaki farklılıklar irdelenmiştir.

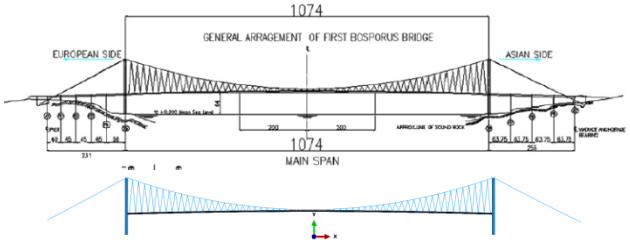
Model Geometrisi ve Malzeme Bilgisi

15 Temmuz Şehitler Köprüsü modellenirken Freeman, Fox and Partners (1968)'e ait orijinal çizimlerden yararlanıldı. Köprü kuleler, tabliye, askı kabloları ve ana kablo çifti şeklinde modellenmiştir ve bu çalışmada yaklaşım viyadükleri göz önüne alınmamıştır. Detay konusunda hassas olacak modellemede önemli olan tabliye geometrisi ve ölü yük altındaki ana kablo ve askı düzeninin gerçeğe sadık bir şekilde modele aktarılabilmesidir. Çoğu çalışmada bir çember yayı ile ifade edilen köprü ekseni çizimler üzerinden yapılan okumalar neticesinde büyük bir hassasiyetle parabol şeklinde ifade edilmiştir. Aynı şekilde ana kablo da semere yaklaşım açıları ve açıklık ortasındaki kotu temel alınarak bir parabol ile ifade edilebilmiştir. Buna göre tabliye eksenini ve ana kabloyu ifade eden denklemler aşağıdaki gibidir.

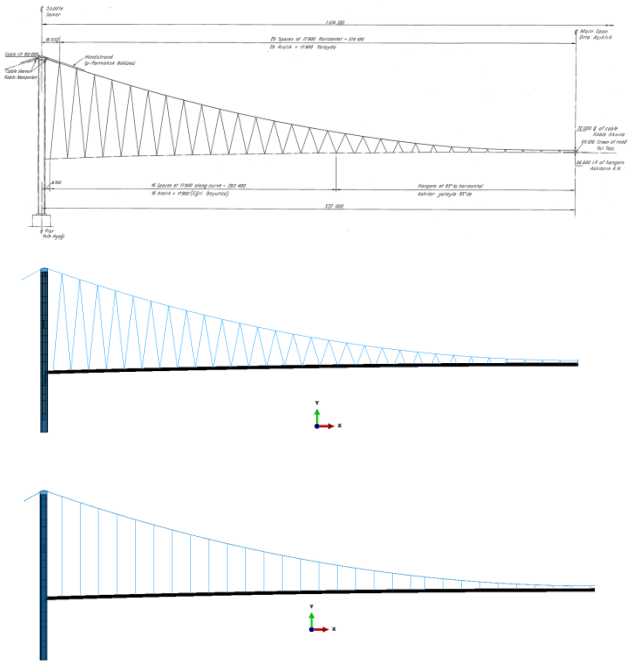
$$y_{tab_ekseni} = -2.794x10^{-5}x^2 + 68.25 \quad (1.a)$$

$$y_{ana_kablo} = 3.224x10^{-5}x^2 + 72 \quad (1.b)$$

Burada y ekseni deniz yüzeyinden metre cinsinden yüksekliği ifade etmektedir. Şekil 1.'de köprünün orijinal çizim planları ve bu hal için üretilmiş model gözükmektedir. Ana kablo Avrupa ve Asya yakasında sırasıyla 231 m. ve 255 m. uzakta ankrajlanmaktadır. Toplamda 1074 m. uzunluğunda olan ve 17,9 metrelik parçalar (Şekil 3.) ile oluşturulan tabliye, ana kablolara bu parçaların ortasından yükselen askı kablolarıyla bağlanmıştır. Çapraz askı düzeninde, askıların tabliyeye bağlantı noktaları, açıklık ortasına doğru ilk 17 aralık için eşit ve 17,9 metredir. Bundan sonraki aralıklarda askı kablolarının yatay ile 65°'lik açılar yapması öngörülmüştür. Askı kablolarının ana kabloya bağlantı noktaları arası köprü boyunca eşit ve 17,9 metredir.



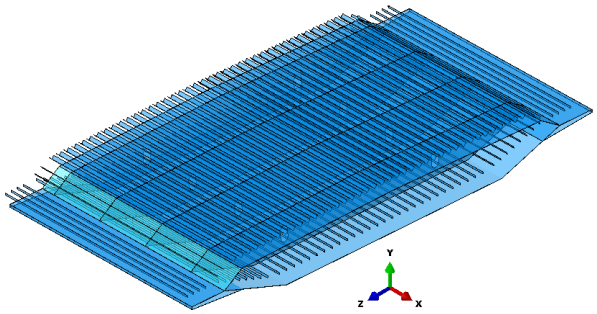
Şekil 1. Orijinal Çapraz Askılar - Çizim ve Model



Şekil 2. Orijinal Çizim, Çapraz ve Düz Askılı Köprü Profili

Şekil 2.'de hem çapraz hem de düz askı kablosu için üretilmiş model ve orijinal çapraz düzen

çizimleri karşılaştırılmıştır. 2015/2016 yılları arasında yapılan tadilat çalışmalarında düz askı kablosu düzeni için askıların ana kabloya bağlandığı yerler değiştirilmemiş, tabliye bağlantı noktaları kablolar dikey olacak şekilde kaydırılmıştır. Buna göre tabliye artık her 17.9 metrede bir olacak şekilde ana kablolardan inen birer kablo çifti ile taşınmaktadır.



Şekil 3. Montaja Hazır 17,9 m. Tabliye Parçası

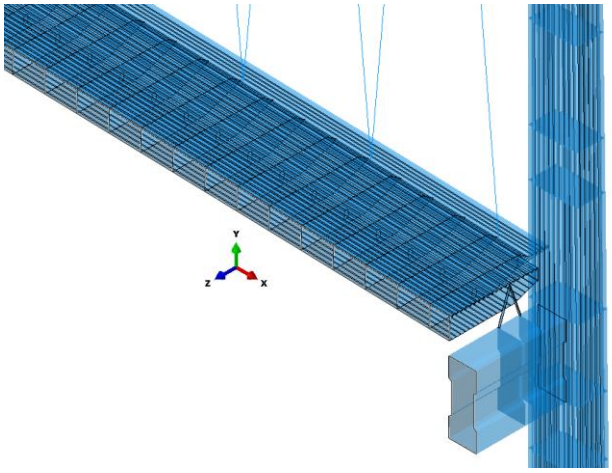
Tablo 1. Geometrik özellikler

kablo kesit alanları (m^2)	ana kablo (açıklık)	0.205
	ana kablo (gergi)	0.219
	askı kablosu	1.96E-03
levha kalınlıkları (mm)	kule ana levhalar	22
	kule rijitleştiriciler	17
	kule kirişleri	20
	kule diyaframları	20
	tabliye üst döşeme	12
	tabliye rijitleştiricileri	9
	tabliye diyaframları	6
mesnet atalet momentleri (mm^4)	I_1	4.24E+07
	I_2	6.04E+07
mesnet kesit alanı (mm^2)	A	1.60E+05

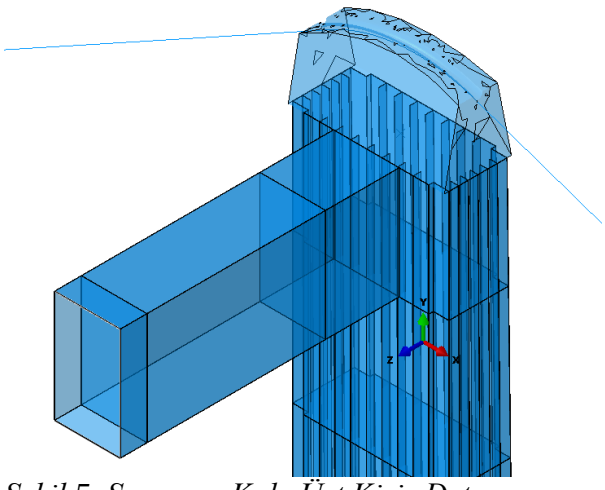
Tablo 2. Malzeme özellikleri

Elastisite modülü (Gpa)	200
Poisson oranı	0.25
kablo çeliği akma dayanımı (Mpa)	1500
yapısal çelik akma dayanımı (Mpa)	320
yoğunluk (t/m3)	7,85
yoğunluk* (t/m^3) **tabliye üst plak*	14,98
yoğunluk** (t/m^3) ***tabliye üst plak tam trafik yüküyle*	22,45

Tablo 1. ve Tablo 2.'de sırasıyla köprü yapı elemanlarının geometrik ve malzeme özellikleri gösterilmiştir. Malzeme yoğunluğu olarak tabliye döşeme plağı haricinde çelik için 7,85 (t/m^3) değeri kullanılırken, trafik yükü olmayan döşeme plağı için asfalt kaplamayı hesaba katan 14,98 (t/m^3) değeri, tam trafik yükünü vermek için de 22,45 (t/m^3) değeri kullanılmıştır. Şekil 4. ve Şekil 5.'de tabliye ve kuleye ait detaylar (boyuna rijitleştiriciler ve diyafram levhaları) görülmektedir. Şekil 4'de tabliyeyi ana kirişlere bağlayan salıncak tarzı mafsal mesnet sistemi yine plaklarla oluşturulmuş olup bağlantı noktaları menteşe tipi bağlantı elemanlarıyla modellenmiştir. Mafsal bağlantı, "A" şeklinde bir çerçeve olup her bir kolun atalet momenti ve kesit alanı yine Tablo 1'de belirtilmiştir. (Huseynov, 2012)



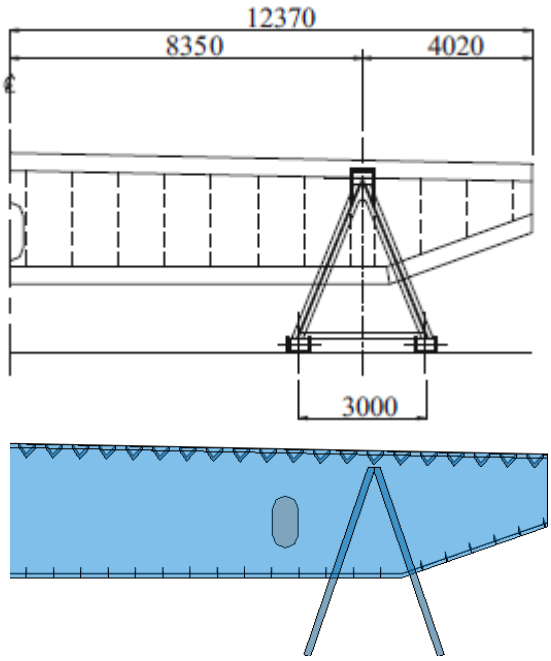
Şekil 4. Tabliye, Kule ve Kule Alt Kiriş Detayı



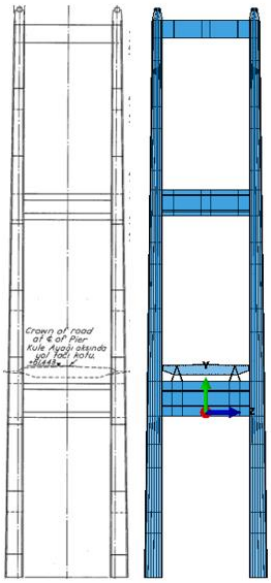
Şekil 5. Semer ve Kule Üst Kiriş Detayı

Şekil 6'da, orijinaline ulaşılamadığı için Apaydın 2010'da bulunduğu şekliyle alınan mafsal

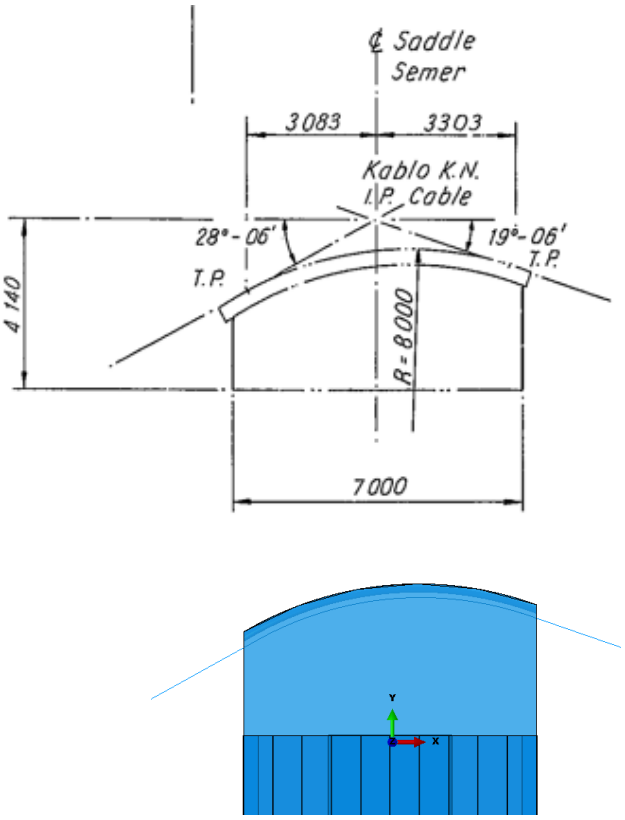
bağlantı detay ve model karşılığı beraberce görülebilir. Burada tabliye diyaframlarında sağ ve sol olmak üzere iki boşluk bulunduğu bilinmektedir. Şekil 7 kule için orijinal çizim ve modeli içermektedir. Şekil 8 semerin orijinal halini ve modelini göstermektedir. Burada yaklaşma açılarına ve semer geometrisine kablolunun sürekliliğini sağlayacak şekilde tamamen sadık kalınmıştır.



Şekil 6. Mafsal Bağlantı Çizim ve Modeli (uzunluklar mm cinsinden)

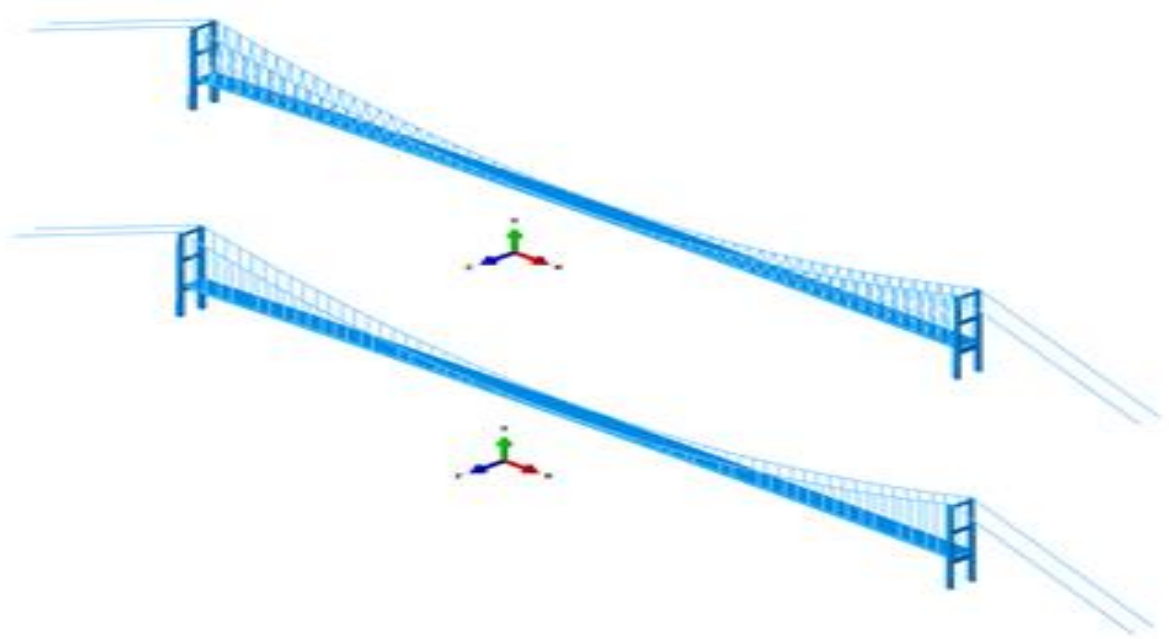


Şekil 7. Kule Çizim ve Modeli



Şekil 8. Semer Çizim ve Modeli

Son olarak Şekil 9'da askı kablolarının düz ve çapraz olduğu haller için genel model görünümleri verilmiştir.



Şekil 9. Çapraz ve Düz Askı Kablolu Modellerin Genel Görünümü

Modellemeye Temel Olan Esaslar

Modellemede ABAQUS™ adlı paket program kullanılmıştır. Bütün yapısal plak ve levhalar S4R tipi genel kabuk elemanıyla, kablolar ise T3D2 tipi kafes elemanıyla modellenmiştir. Semerler rijit kabul edilip, R3D4 tipi ayrık rijit elemanlardan oluşturulmuştur. 126000 civarında elemandan oluşan modelin geometrisi Python dilinde yazılan bir kod ile tamamen otomatik olarak elde edilmiştir. Ana kablo ile semer arasında Coulomb tarzı sürtünme (μ=*0,3*) ile temas düşünülmüştür. Bu şekilde ana kablonun gerçekte olduğu gibi sürekliliği sağlanmıştır. Servis yükleri altında semer ve kablo arasında herhangi bir rölatif yer değiştirme olmasa da deprem gibi şiddetli etkiler için bu durumun göz önüne alınmasının daha isabetli olacağı aşikârdır. Yapının imalatı sırasında kendi ağırlığı altında aldığı form çizimlerde verilen form olduğundan modelde bunun kablolarda oluşacak bir öngerilmeyle karşılanması gerekecektir. Buna göre analiz süresince lineer olarak yerçekimi ivmesi ve öngerilme değerleri aynı sürede tam değerlerine ulaşacak şekilde

artırılmıştır. Burada önemli olan öngerilme seviyesinin yükleme altında orijinal konfigürasyon korunacak şekilde belirlenmesidir. Bu amaçla düzgün yayılı yük altındaki parabol kablo denklemiyle ana kablodaki normal kuvvet ve karşı gelen gerilme değeri kullanılabilir. Askıdaki toplam yapısal kütle 14500 ton, ve buna karşı gelen yatayda düzgün yayılı yük şiddeti (kablo başına) ise *q=66,5* kN/m'dir. Buradan kablo başına ana kablodaki yatay kuvvet H ise, parabolik kablo denkleminden:

$$H = \frac{qL^2}{8f} \quad (2)$$

sehim *f=93* m., açıklık *L=1074* m., kullanılarak H=103000 kN olarak hesaplanabilir. Artık herhangi bir *x* koordinatındaki ana kablo parçasına (elemana) gelecek eksenel öngerilmeye ait kuvveti N(x):

$$N(x) = \sqrt{H^2 + (qx)^2} \quad (3)$$

olarak verilecektir. Aynı şekilde tabliyeyi taşıyan askı kablo çiftlerine bir ilk yaklaşım olarak ortalama eşit kuvvet geldiği kabul edilerek sahip olmaları gereken öngerilme değerleri hesaplanabilir. Buna göre *V* kablo başına kuvvet olmak üzere, yatayla θ_i açısı yapan herhangi bir i. askı kablosuna gelecek eksenel kuvvet T_i için:

$$T_i = V/cos\theta_i \quad (4)$$

kullanılabilir. Elde edilen kuvvetler kesit alanlarına bölünerek uygulanması gereken

eksenel öngerilme değerleri büyük bir yakınlıkla elde edilmiş olmaktadır. Ana kablonun köprüye yaklaşım tarafındaki öngerilme değerleri için ise kablo kuvvetinin yatay bileşeni kullanılarak:

$$N_{ykş} = H/\cos\theta_{ykş} \quad (5)$$

yaklaşım kablolarındaki kuvvet için $N_{ykş}$ kullanılabilir. Aşikar olarak (5)'de $\theta_{ykş}$ kablonun semere yaklaşım açısıdır. Burada her ne kadar sürtünme kuvvetleri dolayısıyla semer üstünden aşan kablonun taşıdığı yatay kuvvet değişecek olsa da bir yaklaşım olarak (5) kabuluyle hesaba gidilmiştir ve sonradan görüldüğü şekilde gayet tatminkar sonuçlar elde edilmiştir.

Kullanılan Analiz Teknikleri

Sistemin ilk defa dengeye gelişi (kendi ağırlığı ve öngerilme etkisi altında) sürtünmeli temas, karmaşık model yapısı ve geometrik nonlinearite nedeniyle statik çözümlemede yakınsama sorunlarına yol açtığından kapalı bir dinamik (implicit dynamic) çözümlemeye gidilmiştir. Buna göre sonlu eleman denge denklemleri zaman artımı aralığı sonu için yazılarak çözülmektedir. Yükleme her ne kadar dinamik olarak çözülse de, yapının kendi ağırlığı ve öngerilme etkisi altında deformasyonu yavaş gelişen bir süreç olarak ele alınabileceğinden, quasi-statik kabul altında, atalet kuvvetlerinin etkisi göz ardı edilebilir. Buna göre öngerilme ve yer çekimi ivmesi modele 500 saniyelik bir sürede rampa şeklinde lineer olarak etkitilmiştir. Sonuçta elde edilen çözüm konfigürasyonda kendi ağırlığı altındaki öngerilmeli yapıda frekans analizine gidilmiştir. Eğer trafik yükü söz konusuysa, bir ara basamak olarak, 500 saniyelik önyükleme tamamlandıktan sonra tabliye üst plağının yoğunluğu değiştirilerek sistem tekrardan statik dengeye gelecek şekilde simülasyona devam edilmiştir. Trafik yoğunluğunun frekansa etkileri bu durum sonunda uygulanan frekans analizinden elde olunmuştur.

Ön Yükleme ve Statik Denge

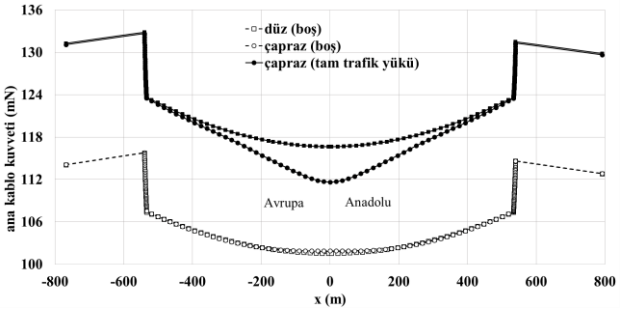
Daha önceden bahsedildiği gibi köprünün kendi ağırlığı altında dengeye gelmesi bağlamında bir ön yükleme safhasına ihtiyaç vardır. Burada yüklemenin yavaş bir şekilde gerçekleştirileceği düşünülerek atalet kuvvetlerinin ihmaliyle quasi-statik bir çözümlemeye gidilmiştir. Bu duruma ait denge denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$K^t u^t = F^t \quad (6)$$

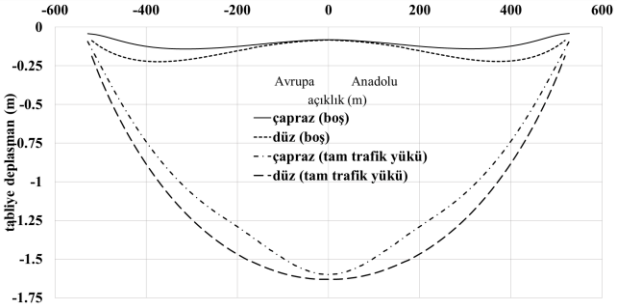
K^t, u^t ve F^t sırasıyla t anındaki sistem rijitlik matrisi, sistem yer değiştirme vektörü ve global yük vektörü olarak karşımıza çıkmaktadır. Geometrik ve malzeme (plastik şekil değişimi) nonlinearitelerinden dolayı her zaman adımında denge denkleminin sağlanması için R_i^t artık vektörünün minimizasyonu üzerinden bir iterasyona gidilmesi gerekmektedir.

$$R_i^t = K_{i-1}^t u_i^t - F^t \quad (7)$$

Sonuç olarak her zaman adımında denge denklemi iterasyonlar neticesinde sağlanmış olmaktadır. 500 saniyelik bir analiz sonucunda lineer olarak artan bir yükleme neticesinde öngerilme kuvvetleri ile ağırlık nihai değerlerine ulaştırılmış ve analiz tamamlanmıştır. Şekil 10'da köprünün boş ve tam trafik yükü altında olduğu durumlar için ana kablo kuvvetinin uzunluk boyunca değişimi görülebilir.

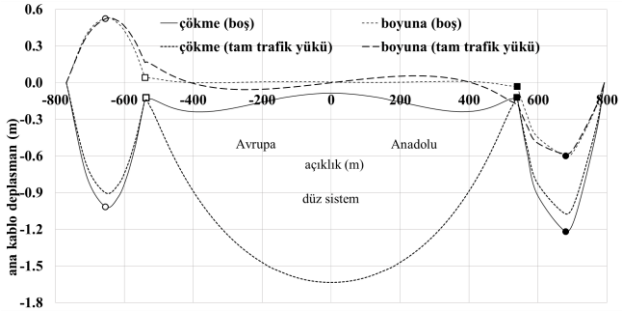


Şekil 10. Statik Yük Altında Ana Kablo Kuvvetleri

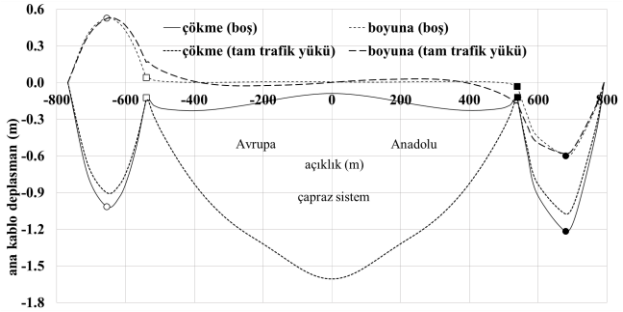


Şekil 11. Statik Yük Altında Tabliye Yer Değiştirmeleri

Şekil 11 ise yine yanı durumlarda tabliye ekseninin maruz kaldığı düşey yer değiştirmeleri göstermektedir. Şekil 12 ve 13 sırasıyla düz ve çapraz askı sistemleri için ana kablo düşey ve boyuna yer değiştirmelerini göstermektedirler.

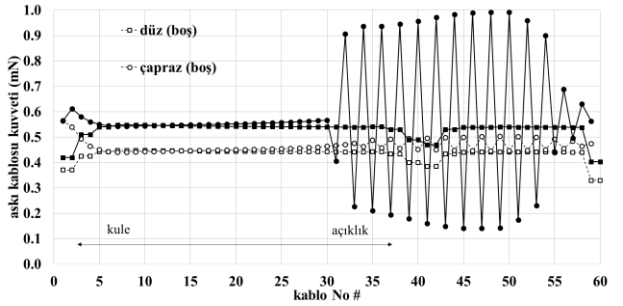


Şekil 12. Düz Askılı Sistemde Statik Yük Altında Ana Kablo Yer Değiştirmeleri



Şekil 13. Çapraz Askılı Sistemde Statik Yük Altında Ana Kablo Yer Değiştirmeleri

Kablo düzeninin küçük de olsa sonuçlarda farklılık oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 14.Statik Yük Altında Askı Kablolarında Oluşan Kuvvetler

Şekil 14'de ise askı kablolarında dolu ve boş durumlar için oluşan kuvvetler görülmektedir. Çapraz sistemde açıklık ortasına yaklaştıkça bazı kablolarda boşalma olurken bazılarında yük artışı olduğu görülmektedir. Bu çapraz sistemin sürekli bir yorulma tarzı yükleme altında olduğunun açık göstergelerindendir. Trafik yükü dolayısıyla meydana gelen düşey ve yatay yer değiştirmeler çapraz kablolardaki yüklerde bu tip artış ve eksilmelere neden olmaktadır.

Frekans Analizi

Modelin doğrulanması literatürde sadece eski çapraz hale ait frekans ölçümleri bulunduğundan bunlar üzerinden gerçekleştirilecektir. Kaynak olarak alınan çalışma Brownjohn ve diğ. (1989) olup frekans deneyleri köprüde araç geçişinin de olduğu rüzgâr gibi dış etkilere açık bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Buna göre sadece kendi ağırlığı altındaki modelde düşey doğrultudaki titreşimde ilk 10 frekans için Tablo 3'deki karşılaştırma ve hata değerleri elde edilmiştir. En büyük hatanın 10. mod için %8.89 civarında olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Çapraz Sistem Düşey Titreşim Frekansları Karşılaştırması

Düşey Titreşim				
Mod#	**Düz Model**	**Çapraz Model**	**Brownjohn ve Diğ. (1989) Deneysel**	**% Bağıl Hata**
1	0.10384	0.12695	0.129	1.59%
2	0.1573	0.16784	0.16	4.90%
3	0.21022	0.23161	0.217	6.73%
4	0.25144	0.2888	0.277	4.26%
5	0.32777	0.38163	0.362	5.42%
6	0.4063	0.46667	0.446	4.63%
7	0.49492	0.57292	0.544	5.32%
8	0.58879	0.67882	0.637	6.57%
9	0.69246	0.78469	0.739	6.18%
10	0.80265	0.90376	0.83	8.89%

Tablo 4. Çapraz Sistem Enine Titreşim Frekansları Karşılaştırması

Enine Titreşim				
Mod	**Düz Model**	**Çapraz Model**	**Brownjohn ve Diğ. (1989) Deneysel**	**% Bağıl Hata**
1	0.073647	0.07243	0.07	3.47%
2	0.20782	0.21433	0.209	2.55%
3	0.27852	0.27855	0.284	1.92%
4	0.2892	0.29164	0.294	0.80%
5	0.36413	0.36499	0.365	0.00%
6	0.38467	0.38512	0.382	0.82%
7	0.43715	0.44125	0.44	0.28%
8	0.57	0.57019	0.525	8.61%
9	0.73062	0.73304	0.762	3.80%

Tablo 5. Çapraz Sistem Burulma Titreşimi Frekansları Karşılaştırması

Burulma Titreşimi				
Mod#	**Düz Model**	**Çapraz Model**	**Brownjohn ve Diğ. (1989) Deneysel**	**% Bağıl Hata**
1	0.32229	0.33356	0.324	2.95%
2	0.43459	0.49833	0.474	5.13%
3	-	0.50976	0.492	3.61%
4	0.6584	0.6705	0.649	3.31%
5	0.86899	0.89433	0.877	1.98%

Benzer şekilde Tablo 4 ve Tablo 5 sırasıyla enine ve burulma titreşimleri için yapılan karşılaştırmaları göstermektedir. Enine titreşimde en büyük hata %3.47'de kalırken ortalama %2.45'lik bir hata payı elde edilmiştir. Burulma titreşimleri için en büyük hata %5.13 olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuçların, ölçümlerin araç geçişi ve rüzgâr gibi etkilerin de bulunduğu bir ortamda alındığı düşünülürse, gayet tatminkâr olduğu anlaşılmaktadır. Esasında Deneysel ölçümlerdeki frekans değerlerinin çoğunun model sonuçlarından daha düşük olması aradaki araç geçişlerine bağlı ekstra kütle ile anlaşılabilir. Trafik yüklü modelde kütle artacağı için frekans değerlerinin düşeceği ve ölçüm değerlerine daha da yaklaşacağı aşikârdır. Düz sistemdeki frekans değerlerinin çapraz sistemdeki karşılıklarına yakın olmakla beraber neredeyse hemen her durumda daha düşük kaldığı görülmektedir. Buna göre genel olarak çapraz sistemden düz sisteme geçilmesiyle rijitliğin hafif azaldığı anlaşılmaktadır.

Termal Etkiler

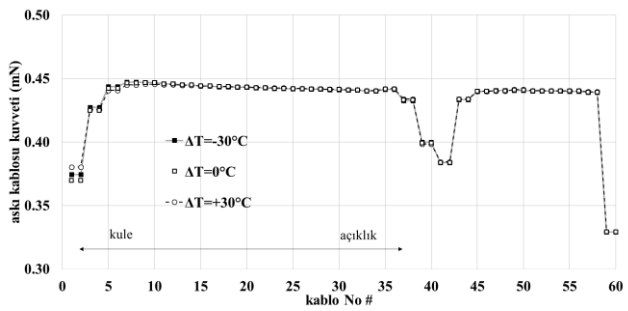
Model ile incelenen durumlardan birisi de sıcaklık değişimlerinin etkilerini içermektedir. Buna göre Mevsimine göre ortalama sıcaklıktan +30 °C ve -30 °C şiddetinde vuku bulacağı düşünülen farazi sıcaklık değişimleri köprünün her yerine verilerek genel olarak sistemin serbest titreşimlerinin ve kablo kuvvetlerinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Beklendiği gibi sıcaklığın düşmesi/artması frekans değerlerinin artırıp/düşürürken bu değişimin her iki kablo düzenlemesi için de ihmal edilebilecek seviyelerde olduğu saptanmıştır. Örnek olarak Tablo 6'da düz ve çapraz sistem için düşey, enine ve burulma titreşimlerine ait ilk iki modun titreşim frekanslarının sıcaklık değişiminden çok az etkilendikleri görülmektedir. Bu durum diğer yüksek modlar söz konusu olduğunda da değişmemektedir.

Tablo 6. Çapraz ve Düz Sistemlerde Sıcaklığın Serbest Titreşim Frekanslarına Etkisi

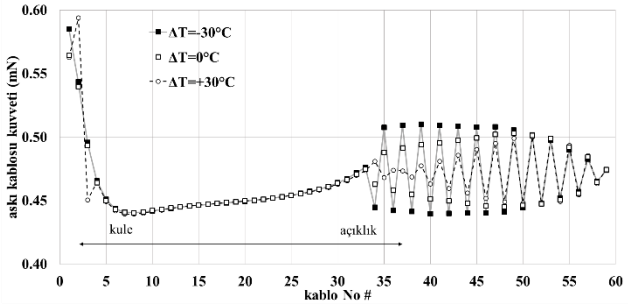
Çapraz Model	Mod#	ΔT=-30°C	ΔT=0°C	ΔT=+30°C
Düşey	1	0.12791	0.12695	0.12609
	2	0.16719	0.16784	0.16842
Enine	1	0.07256	0.07243	0.07231
	2	0.21460	0.21433	0.21405
Burulma	1	0.33261	0.33356	0.33453
	2	0.50026	0.49833	0.49697

Düz Model	Mod#	ΔT=-30°C	ΔT=0°C	ΔT=+30°C
Düşey	1	0.10390	0.10384	0.10347
	2	0.15728	0.15730	0.15741
Enine	1	0.07041	0.07036	0.07020
	2	0.20778	0.20782	0.20765
Burulma	1	0.32209	0.32229	0.32355
	2	0.43454	0.43459	0.43397

Şekil 15 ve 16'da ise sırasıyla düz ve çapraz durumlarda sıcaklık değişimi sonucunda askı kuvvetlerinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Buna göre düz sistemin sıcaklık değişiminden ihmal edilebilecek seviyede az etkilendiği görülürken çapraz sistemde kablo kuvvetlerinin önemli şekilde değiştiği görülmektedir. Özellikle açıklığa doğru sıcaklığın düşmesiyle bu etki daha belirgin bir hal almaktadır. Bu durum çapraz sistemde termal etkilerin inişli çıkışlı kısaca yorulma tipi bir yükleme rejimine yol açtığını ortaya koymaktadır.



Şekil 15.Sıcaklık Değişimi Altında Askı Kablolarında Oluşan Kuvvetler – Düz Sistem



Şekil 16.Sıcaklık Değişimi Altında Askı Kablolarında Oluşan Kuvvetler – Çapraz Sistem

İrdelemeler

Burada geliştirilen detaylı model ile ilk defa 15 Temmuz Şehitler Köprüsü'nün yeni (düz) ve eski (çapraz) askı kablolu hali hâlihazırda literatürdeki en gerçekçi şekliyle ortaya konulmuştur. Deneysel ve model frekans karşılaştırmalarından modelin (çapraz durum) gerçekçi sonuçlar ürettiği gösterilmiştir. Benzer şekilde düz durum için elde edilen frekans değerlerinden düz sistemin çapraz olana göre kısmen daha "yumuşak" olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Köprüde tam trafik yükü olması durumunda askı kablolarındaki kuvvetlerin karşılaştırılmasından çapraz sistemin genel olarak yorulma tipi bir yükleme rejimi altında olduğu görülmektedir. Benzer yorulma tipi rejim termal etkiler dikkate alınarak sıcaklık değişimleri neticesinde de kendini belli etmektedir. Buna göre düz sistem sürekli değişen sıcaklık ve trafik yükü altında daha istikrarlı bir yükleme rejimi altında kalmaktadır. Model ile çalışılabilecek daha birçok durum vardır. Bunların başında deprem etkilerinin incelenmesi, doğrusal olmayan sönümleyicilerin davranışa katkısı, dinamik trafik yükleri altında zorlanmış sistem davranışı, boğaz hava akımlarının etkisi gibi başlıklar sayılabilir. Sistemde tam trafik yükü altında dahi herhangi plastik davranışa veya semerler üzerinde sürekli tanımlanmış ana kablonun rijit yer değiştirmesine (kayma) rastlanmamıştır. Bununla beraber özellikle şiddetli bir deprem yükü altında bu tip detayların daha gerçekçi sonuçlar üreteceği kuvvetle beklenir. Bütün bu detay seviyesinin makul sürelerde çözüm üretebilecek bir model ile ortaya konması çalışmanın bir diğer öne çıkan özelliğidir. Bu çalışmaya devam mahiyetinde ilk olarak incelenecek durum deprem etkileri ve viskoz sönümleyicilerin davranışa katkısı olacaktır.

Kaynaklar

Apaydın, N. M. (2010). Earthquake performance assessment and retrofit investigations of two suspension bridges in Istanbul. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(8), 702-710.

Bas, S., Apaydin, N. M., & Catbas, N. (2016) Considerations for Finite Element Modeling of the Bosphorus Suspension Bridge. Istanbul Bridge Conference 2016, Istanbul-Turkey.

Bosporus Bridge Towers, Suspended Structures, Cables, Anchorage Drawings. (1968) Consulting Engineers; Freeman, Fox and Partners, Westminster, London, SW.1; 1968.

Brownjohn, J. M., Dumanoglu, A. A., Severn, R. T., & Blakeborough, A. (1989). Ambient vibration survey of the bosporus suspension bridge. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 18(2), 263-283. doi:10.1002/eqe.4290180210

Catbas, F. N. , Ciloglu, S. K., Grimmelsman S. K., Pan, Q., Pervizpour, Q. and Aktan A. E. (2013). Limitations in the Structural Identification of Long-Span Bridges. Drexel University Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute

Erdik, M., Uçkan, E., (1989). Ambient vibration survey of the Boğaziçi Suspension

Bridge, Report No: 89-5. Istanbul-Turkey: Department of Earthquake

Engineering Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Boğaziçi University;1989.

Erdoğan, H., & Gülal, E. (2013). Ambient vibration measurements of the Bosphorus suspension bridge by total station and GPS. *Experimental Techniques*, *37*(3), 16-23.

Günaydin, M., Adanur, S., Altunişik, A. C., Sevim, B., Türker E. (2014). Determination of structural behavior of Bosporus suspension bridge considering construction stages and different soil conditions. Steel and Composite Structures, Vol. 17, No. 4 (2014) 405-429

Huseynov, F. (2012). *Finite Element Modelling of Bosporus Bridge* (Unpublished doctoral dissertation). The University of Sheffield.

Kilic S. A., Raatschen H. J., Körfgen B., Apaydin N. M., Astaneh-Asl A. (2016). FE Model of the Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge Using Thin Shell Finite Elements

Petrovski J, Paskalov T, Stojkovich A, Jurokovski D., (1974). Vibration studies of Istanbul Bogazici suspension bridge, report OIK 74-7. Skopje, Yugoslavia: Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, IZIIS; 1974.

Tezcan, S., Ipek, M., Petrovski, J., Paskalov, T. (1975). Forced Vibration Survey of Istanbul

Boğaziçi Suspension Bridge. Proceedings of the Fifth ECEE, Vol.2, Istanbul, Turkey; 1975.p.152.

internet kaynakları

http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html

https://www.python.org/doc/

Comparative Structural Analysis of 15th Martyrs Bridge's Old and New Cable Systems

Extended abstract

15th Martyrs Bridge is the first suspension bridge in Istanbul, Turkey. It was constructed from steel hollow sections and originally the deck was carried by hanger cables in a diagonal setting. Connecting two continents and carrying one of heaviest traffic for more than 50 years it recently went under a heavy retrofitting process. The diagonal hanger system was replaced with a vertical configuration. The importance of the bridge has drawn attention from numerous researchers and almost every aspect of the original diagonal configuration has been addressed in the context of structural mechanics. The recently introduced vertical configuration is yet to be addressed and this study aims for this purpose in a comparative fashion. A very detailed structural modeling of the bridge both for diagonal and vertical configuration is completed. The detail level is unmatched as even the main cable is modeled continuous over the saddles with a frictional contact- a feature which has not been seen before. The model incorporates material (such as plastic material model) and geometrical nonlinearities and aimed for utmost realistic simulation. The detail level required a script based automated approach for the implementation and this allows quick manipulations of the model parameters at will. Drawings of the bridge were given with respect to the structure under its own weight and this fact is implemented with a pre-stress loading of the model. The required levels of pre-stress in the main cable and in the hanger cables can be calculated with remarkable accuracy with shallow cable equation and it seemed that there was no need for an iterative procedure in order to find the equilibrium geometry of the original drawings.

As mentioned above experimental studies non-exist for the new configuration and the model is verified with the diagonal configuration by comparing existing ambient vibration tests. It is seen that relative percentage error levels remain well below %10 for most of the modes. Infact model produced the first 10 vertical modes, first 9 lateral modes, and first 5 torsional modes with average relative errors of %5.5, %2.47and %3.4 respectively. Vibration results of the model with vertical configuration showed that although frequencies are close to the corresponding ones for diagonal configuration they are always smaller. Thus it can be concluded that vertical configuration offers a more flexible system. Effect of static traffic load on the frequencies are also found to be insignificant.

Model produced similar displacement patterns for the loaded and unloaded deck for both configurations, whereas hanger cable forces appeared remarkably different. Cross-sectional areas of the hangers are same for both configurations and it is observed that diagonal configuration results in a fatigue type loading regime for hangers.

Thermal effects are also studied with the given model. A general temperature increase (ΔT=+30°C) and a decrease (ΔT=-30°C) are considered for the whole model. Model indicates that under the temperature changes frequencies are not affected at all for both configurations whereas forces developing in hangers are considerably changing for diagonal case. This is not the case for vertical configuration as changes are insignificant. The fatigue type loading regime also manifested itself for the diagonal case under temperature changes.

This study reveals a clear disadvantage of the diagonal system; during service life of the structure, under the effect of traffic and temperature variations, forces inside the hanger cables varies considerably thus more prone to fatigue type failures.

No plastic deformations or rigid body displacements of the main cable on the saddles were observed for the static loading. This features would greatly enhance the realism of the model for analysis of earthquakes and/or strong air current interactions.

The detail level and the capabilities of the model is not used to its full potential. This study is considered as an introduction of comparative structural static and basic dynamic analysis of the bridge's old and new versions. Model can be readily utilized for investigation of strong ground motion response analysis, effects of viscous dampers, effects of live loads, effects of strong air currents etc. Infact upcoming research papers are under preparation.

***Keywords**: 15th Martyrs Bridge, finite element method, free vibration, thermal effects*