

Haliç Köprüsü Sağlık İzleme Sisteminin Geliştirilmesi

Eray Temur, Ömer Galip Pınar, Barış Erkuş ve Barlas Özden
Çağlayan

İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye

bariserkus@itu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, Haliç Köprüsü sağlık izleme sisteminin geliştirilmesi amacı ile yapılan çalışmaların ilk aşaması sunulmaktadır. Haliç köprüsü 2014 yılında kullanıma açılmış olan ve demiryolu metro geçişi için kullanılan eğik askılı çelik bir köprüdür. Köprüde Vienna Consulting Engineers isimli firma tarafından kurulmuş olan kalıcı bir sağlık izleme sistemi mevcuttur. Sağlık izleme sisteminde 61 adet sıcaklık, rüzgâr, yerdeğiştirme, eğim, ivme ölçümü için kullanılan sensörler ve GPS'ler bulunmakta, veriler sürekli olarak kaydedilmekte, köprü sorumlu kuruluşu olan Metro İstanbul işletim merkezinde toplanmaktadır. Sistemi kuran firma tarafından, yapının ilk kullanımından önce geçici bir ölçüm sistemi ve ivmeölçerler ile çevresel salınım ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler ile yapılan ilk sistem tanı çalışmalarında yapı ve kablo salınım periyotları, mod şekilleri, içsel sönümlere gibi temel mekanik özellikler elde edilmiş, bu özelliklerin köprü tasarımında kullanılan değerlere yakın olduğu görülmüştür. Ancak, kalıcı yapı sağlığı izleme sistemi ile toplanan veriler kullanılarak henüz bir irdeleme yapılmamıştır. Kalıcı sistem ile elde edilen değerlerin yapı ömrü boyunca kullanılmasını özellikle depremlerden sonra acil müdahale ve yapının durumunun değerlendirilmesi için çevrimiçi kullanılacak bir sistem geliştirilmesi amacı ile Metro İstanbul ve İ.T.Ü. işbirliği ile bir çalışma başlatılmıştır. Bu çalışmanın ilk aşamasında, yapısal modelin elde edilmesi, kalıcı sistem ile elde edilen ölçümler ile temel yapı tanı çalışmalarının yapılması hedeflenmektedir. Yapısal model için çubuk elemanların kullanıldığı bir model geliştirilmiştir. Yapı tanılama yöntemi olarak transfer fonksiyonu tepe noktası seçme yöntemi kullanılmıştır. Toplanan ivme verilerinin istenilen aralıktaki değerlerinin veri bilgisayarından alabilen ve bu değerler ile yapı tanılama yapabilen bir program geliştirilmiştir. Yapı doğal salınım periyotları, içsel sönümleri ve şekilleri farklı veri grupları için elde edilmiştir. Yapı mekanik özelliklerinin geliştirilen matematiksel model özellikleri ve ilk yapılan tanı çalışmalarında elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür.

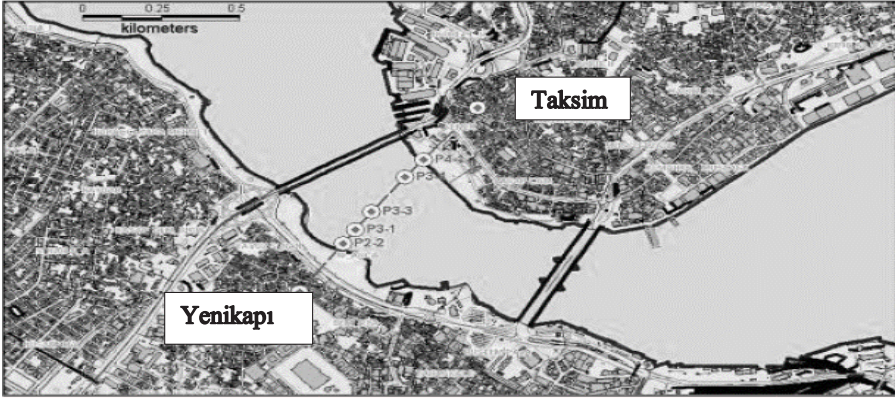
Anahtar Kelimeler: Haliç Köprüsü, Sağlık izleme sistemi, Sistem tanılama, SAP2000, MATLAB.

Giriş

Haliç Metro Geçiş Köprüsü'nün proje etüd çalışmaları 1960 lara dayanmakta olup, Gergin Eğik Askılı Köprü tipi olarak tasarlanıp, inşaatı 2 Ocak 2009 tarihinde başlamış 9 Ocak 2014 tarihinde bitirilmiş ve 15 Şubat 2014 tarihinde ise köprü hizmete açılmıştır.

Haliç Metro Geçiş Köprüsü benzerinde imal edilmiş olan gergin eğik askılı köprülere birkaç örnek verecek olursak Honk Kong da bulunan Stonecutters Köprüsü ve Rusya Vladivostok'da bulunan Russki Köprüsü'dür. Bu köprüler yapım şekilleri ile Haliç Metro Köprüsü ile benzerlik gösterebilir. Bu köprüler kullanım amaçları açısından farklılıklar göstermektedir. Zira bu köprülerde raylı hat geçişleri olmamakla beraber sadece motorlu taşıtların geçişi için tasarlanmıştır. Fakat bu köprülerde Gergin Eğik Askılı Köprü tipi olarak imal edilmiştir. Köprü'nün ilk tasarımı overdose olarak yapılmış fakat daha sonra tarihi yarımada'nın silüetinin bozulmaması adına pylon yükseklikleri 65 m.'ye düşürülmüştür.

Başlangıç tasarımında köprü pylonları daha yüksek olup, daha sonradan tarihi yarımada'nın silüetinin bozulmaması adına kablolar öngerilmeli tasarlanarak ve pylon yükseklikleri 65 m.'ye düşürülerek overdoz tipi köprüye dönüştürülmüştür. Toplam uzunluğu 920 metre ve dört adet köprüden oluşmaktadır. Bunlar eğik askılı köprü, açınır/kapanır köprü, kuzeydoğu ve güneybatı yaklaşım kanallarından oluşmaktadır. Köprü'nün ana tabliyesinin en geniş kısmında 13.7m. en dar yerinde ise 12.6 m.'dir.

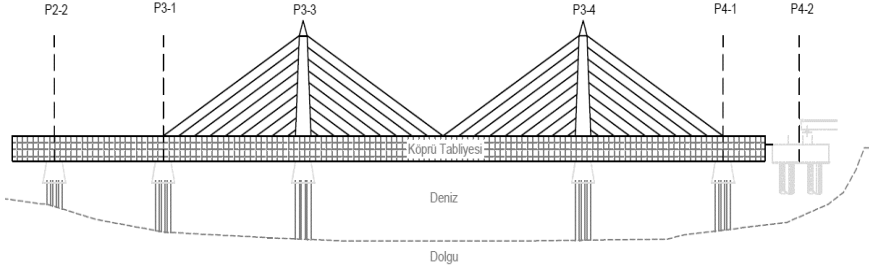


Şekil 1: Köprü'nün plandaki konumu.



Şekil 2: Haliç köprüsü.

Köprü iki ana raylı sistem olarak gidiş-geliş şeklinde düzenlenmiştir. Bunların hemen yanlarından geçen acil kaçış olarak yaya yolları vardır. Köprü'nün ana yönleri ise Taksimden (KuzeyBatı) Yenikapı (GüneyDoğu)'ya doğrudur. Köprü gemi geçileri sırasında açılıp kapanabilme özelliğine sahiptir. Zira bu bildiri kapsamında açılır/kapanır köprü ve eğik askılı köprü incelenecektir. Bu bölümde yapısal elemanlar ve çubuk modelleri açıklanmış olup köprü'nün basit şekilde gösterimi verilmiş ve köprü'nün güncel halinden görseller paylaşılmıştır. Bu görseller Şekil 2(köprü'nün güncel hali), Şekil 5(köprü modeli) ve Şekil 3 (köprü'nün şematik olarak gösterimi) ve Şekil 1'de (köprü'nün plandaki konumu) gösterilmiştir.



Şekil 3: Köprü'nün şematik gösterimi.

Deprem bölgelerinde inşa edilmiş olan yüksek bina veya köprü gibi yapıların gerek yüksek yatırımı maliyeti, gerekse bu yapıları bir gün içinde kullanan insan sayısının çok olması sebebiyle, herhangi bir hasarda kayıpların hem yüksek maliyetli hem de birçok can kaybına mal olma olasılığı yüksektir. Bu nedenle bu tür yapıların davranışlarının izlenmesi, oluşacak kayıplarının önlenmesi için gereklidir.

Mevcut yapısal sağlık uygulama yöntemlerine ek olarak, yapısal sistemin davranışının tahmin edilerek ve bu tahminler dışında bir ölçüm sonucu ile karşılaşıldığında köprü'nün kullanıma kapatılması gerektiği anların belirlenmesi olası can ve mal kaybının önüne geçilmesi sağlamak bu projenin öncelikli amaçlarından. Öte yandan böyle bir sistemin yokluğu, herhangi bir kaza durumunda Haliç köprüsü işletmesini ve kullanıcılarını zora sokmaktadır. Geçmişte gerçekleşmiş olan bir geminin köprü ayaklarına çarpması gibi bir olayda köprü'nün kullanıma devam edilmesinin sakıncalı olup olmadığı anlaşılamamıştır. Ancak bu çalışma sayesinde, anlık ivme ölçümlerinden köprü davranışı incelenebilir ve köprü'nün zararının ya da tasarım parametrelerinden ne kadar uzaklaştığının ölçüsü hesaplanabilecektir.

Yapısal sağlık izleme çalışmalarının ilk aşaması yapının davranışının gerekli elektronik sensörler aracılığıyla ölçülmesidir. Bir sonraki aşama ise alınan ivme ve çevresel koşulların ölçümünden yapısal sistemin özelliklerinin hesaplanmasıdır. Sistem tanımlama yöntemleri zorlanmış titreşim ve çevresel titreşim yöntemleri olarak sınıflandırılabilir (Juang 1994, Ljung 1997). Bu çalışmada çevresel titreşim yöntemleri uygulanacaktır. Sistem tanımlama genel olarak bilinen bir girdi ve bu girdiye bağlı olarak verilen sistemin çıktısını yorumlayarak sistem parametrelerini belirleme esasına dayanmaktadır. Ancak inşaat mühendisliği yapılarına bilinen bir girdi oluşturmak ve çıktının sonsuz serbestlik dereceli bir sistem olarak ölçülmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple bilimsel çalışmalar, yalnızca çıktının kullanılarak yapısal sistemin özelliklerini belirlemeye yönelmiştir. Felber tarafından yapılan çalışmada köprülerin çevresel salınımlarından dinamik parametrelerin bulunması için bir yöntem önerilmiştir (Felber 1993). Bu yöntem, çevresel salınının frekans alanında çözümünü yapılarak frekans

piklerinin seçilerek modlara ait frekans değerlerinin bulunmasını içermektedir. Sistem tanımlama yöntemleri arasında, yalnızca inşaat mühendisliği değil başka disiplinler tarafından da kullanılan bir başka yöntem ise Özgün Sistem Gerçekleştirme Algoritması (ERA)'dır (Juang and Pappa 1985). Bu yöntem esasında Ho-Kalman algoritmasının geliştirilmişidir ve sistem parametrelerini belirlemekle kalmayıp sistemin gerçekleştirilmesini de sağlar. Sinyal gürültüsünün etkisinin yok edilmesi için ise Tekil Değer Ayırıklaştırma (SVD) yöntemi kullanılmıştır. Bir başka yöntem ise frekans alanında ayrıştırmayı içermektedir (Brincker, Zhang et al. 2000). Bu yöntemde pik seçiminin basitliği korunarak ölçümler içeriğindeki gürültünün çok olduğu durumda dahi yüksek kesinlikte modal özelliklerin bulunabilmesidir. İbrahim zaman tanım alanı yöntemi ise sistem gerçekleştirmeye imkan tanımayan yalnızca sistem tanımlama yöntemi olarak kullanılmaktadır (İbrahim and Mikulcik 1973).

Yukarıda özetlenenler gibi bir çok yöntem sistem tanımlama yöntemi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bir çok araştırmada köprü modellerinde kullanılacak sistem tanımlama yöntemi karşılaştırılmış olup bir referans değeri olmadığından dolayı biri seçilememiş, karşılaştırılmakla yetinilmiştir (Brincker, Zhang et al. 2000). Ancak bu çalışmada frekans alanında çizilmiş güç spektrumundan pik seçimi metodu kullanılacaktır. Bu yöntemin seçilmesinin sebebi ise uygulama kolaylığı ve seçilecek mod frekanslarının bulunmasında yeterli olmasıdır. Ardından ortaya çıkarılacak olan sonlu eleman programı yazılarak bu köprüye özel doğrusal olmayan analiz programı kullanılarak köprü sistem tanımlama yöntemlerine ek bir katkı sağlanması planlanmaktadır.

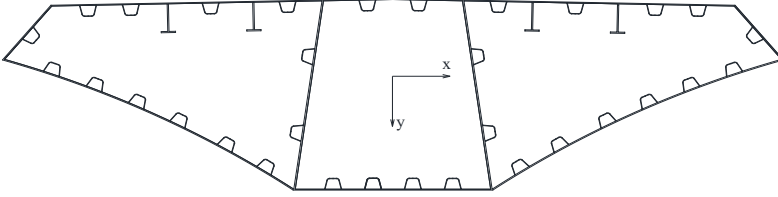
Bu çalışmada yapısal model çubuk elemanlar kullanılarak, SAP2000 programında oluşturulmuştur. Yapısal Model kullanımı için Haliç Köprüsünün elemanları eşdeğer çubuk modellere indirgenmiştir. Bu sayede analiz süresi hızlandırılmıştır. İki boyutlu elemanlardan oluşan üç boyutlu model oluşturularak yapısal modelin mod şekilleri ve frekansları elde edilmiştir. Ayrıca mevcut ivme verilerinin frekans alanında analizinden ortaya çıkan pik değer alınarak köprünün birinci mod frekansı ve mod şekli elde edilmiştir.

Haliç Köprüsü Yapısal Özellikler

Köprünün tabliye kesiti genel olarak 32 adet U profil, 4 adet I profil ve 5 adet plaka elemandan imal edilmiştir. Bu elemanların beraber oluşturdukları eşdeğer çubuk eleman özellikleri, Şekil 5'de gösterilen çubuk eleman modelinde kullanılmıştır. Modelde kullanılan çubuk elemanların eşdeğer atalet momentleride Şekil 4' de gösterilen kutu profil ve I profil şeklinde modelde tanımlanan malzeme için hesaplanmıştır. Modelde kullanılan kutu profiller tasarımcı firmadan temin edilen raporlar incelenerek U profillerin beraber kullanılması ile elde edildiği gözlemlenmiş olup modelde bu şekilde kullanılmıştır.

Tablo 1:Tabliye kesit bilgileri.

Tabliye		
Alan (m ²)		0.889
Atalet Momenti (m ²)	X	1.27
Atalet Momenti (m ²)	Y	11.84
Atalet Yarıçapı (m)	X	1.198
Atalet Yarıçapı (m)	Y	3.648

**Şekil 4: Tabliye kesitinin gösterimi.**

Köprüde kablolardan gelen yükü taşıyan ve tabliyeye rijit bağlı olan iki adet pylon vardır. Pylonların kesit alanları yukarı doğru azalmaktadır. Tabliye aşağısında ayaklara oturan pylonlar, kablolardan gelen yükleri de taşımaktadır. Kesiti değişken eleman olarak modellenen pylonlar, prizmatik olmayan 11 farklı kesitin birleştirilmesi ile ve bu kesitlerin rijitliklerinin parabolik değişken olarak ayarlanması ile modele eklenmiştir. Filhakika ortaya çıkan modelimizde ise kabloların pylonlar ile kesiştiği noktalar arasında kalan kısımlar rijitliği çok yüksek olan eleman tanımlanmış olup, en üst kısımda kablonun pylon ile kesiştiği nokta son nokta olarak kabul edilmiştir. Pylonların üst kısımlarında minare şeklinde görülen kısımlar ise modele etkilenmemiş, onun yerine yaklaşık değeri verecek şekilde pylon eleman olarak tanımlanan kısmın ağırlığı ve rijitliği artırılmıştır.

Ayaklar, içi boş dairesel kesitlerden imal edilmiştir. Bu sebeple tasarımcı firmadan alınan çizimlere göre kesit özellikleri eklenmiştir. Çubuk elemanlardan oluşan, üstten ve alttan rijit bağlantılarla birbirilerine göre hareketi kısıtlanmış elemanlar olarak hesaba katılmış olup bu bağlantı elemanları ise rijitliği çok yüksek olan malzeme tanımlanarak modele entegre edilmiştir.

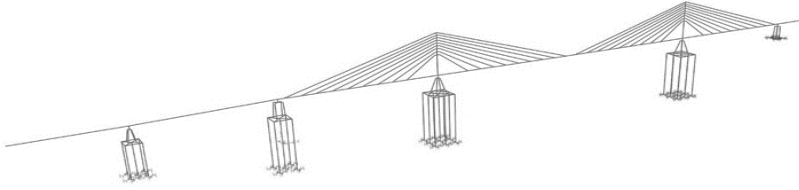
Temel kazıkları, akslarda farklılık göstererek betonarme içi dolu ve çelik içi boş dairesel kesitlerden imal edilmiştir. Tarafımızca yapılan modelde ise tasarımcı firmadan temin edilen çizimlerden ve dökümanlardan yararlanılarak bulunan kesit özellikleri eklenmiş olup, modelimizde kullanılan yay elemanları, yine dökümanlardan faydalanılarak kazıkların deniz seviyesindeki en alt tabakasına yerleştirilmiştir. Ayaklar yine çubuk elemanlardan oluşturulmuş olup, tek bir kesit özelliğine sahip elemanın, her ayakta farklı sayılarda kullanılması ile oluşturulmuştur. Söz konusu elemanlar ise çelik eleman olarak tanımlanıp, bu kullanılan elemanın 40mm et kalınlığı olan dairesel kesitten modellenmiştir. Yapmış olduğumuz modelde ise ilgili aks numarasına göre çizimlerden faydalanılarak bir ayakta 4, iki ayakta 9 ve bir ayakta ise 5 adet modellenmiştir.

İlgili idareden temin etmiş olduğumuz dökümanlardan tarandığı kadarıyla ve genel olarak zemindeki toprak etkilerinin modele uygulanması doğrusal olmayan yaylar kullanılarak yapılmış olduğu gözlemlenmiştir. Söz konusu doğrusal olmayan yaylar belli bir

koordinatta tasarımcı firma tarafından özel bir program kullanılarak yapılmış olduğu belirlenmekle beraber söz konusu ALLPILE programı ile yaylar belirlenen koordinatlarına yerleştirildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise modal analiz yapacağımız için doğrusal yaylar kullanılmıştır. Modelde kullanılan doğrusal yayların özellikleri ise tasarımcı firmadan alınan dökümanlardan faydalanılarak, Tablo 2'deki değerler kullanılmıştır. Söz konusu değerler tek bir kazık elemana yerleştirilen yay özelliği olup, yapılmış olduğumuz modelde ilgili aksda bulunan kazık sayısı kadar elemanların herbirine etkilmiştir. Kullanılan eşdeğer yayların ayaklardaki konumları ise yine tasarımı yapan firmanın sağlamış olduğu dökümanlar taranarak deniz tabanı seçilmiş olup, ilgili aks da bulunan kazık derinliğine göre yerleştirilmiştir.

Tablo 2: Zemin için kullanılan yay sabitleri.

	P2-2	P3-1	P3-3	P3-4	P4-1
k_y (kN/m)	9700	16000	11800	16200	38200

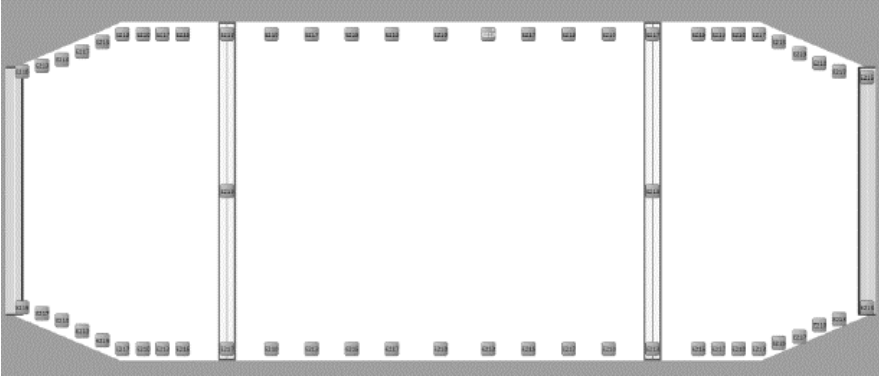


Şekil 5: Haliç köprüsü modeli.

Haliç Köprüsünde Mevcut Sağlık İzleme Sistemi

Haliç metro geçiş köprüsünde, kurulum aşamasında kalıcı sensörler yerleştirilmiştir. Bu sensörler yapısal sıcaklık (12 adet), meteoroloji (4 adet), yerdeğiştirme ve tilt (9 adet), İvme (32 adet), GPS (4 adet) sensörleri olmak üzere toplamda 61 adettir. Bu sensörlerden ölçülen veriler, METRO İSTANBUL A.Ş. bünyesinde bir bilgisayara kaydedilmekte ve internet üzerinden sensörlerin de kurulumunu yapan VCE Brimos firması sunucularına gönderilmektedir. Bu veriler ile METRO İSTANBUL A.Ş. tarafından kullanılan bilgisayar programından istenildiğinde 5 dakika aralıklı verilerin kullanılarak maksimum ve karekök ortalama veriler ile bir rapor oluşturulabilmektedir.

Kalıcı sağlık izleme programı dışında, VCE Brimos firması tarafından taşınabilir ekipmanlarla ilk ölçümler de yapılmıştır. Bu geçici sistem ölçümleri, mevcut sensörlerin kalibrasyonu, Modal Güvenilirlik Kriterinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Bu sistemlerin köprüde uygulandığı yerlerin konumları Şekil 6'da basit bir planda gösterilmiştir. Taşınabilir sensörlerin bir örneği Şekil 7'da gösterilmiş olup ayrıca bu geçici sistem ölçümleri bir rapor halinde sunulmuş olup bu dökümanlar METRO İSTANBUL A.Ş' den temin edilmiştir.



Şekil 6: Sensörlerin tabliye üzerindeki konumları.



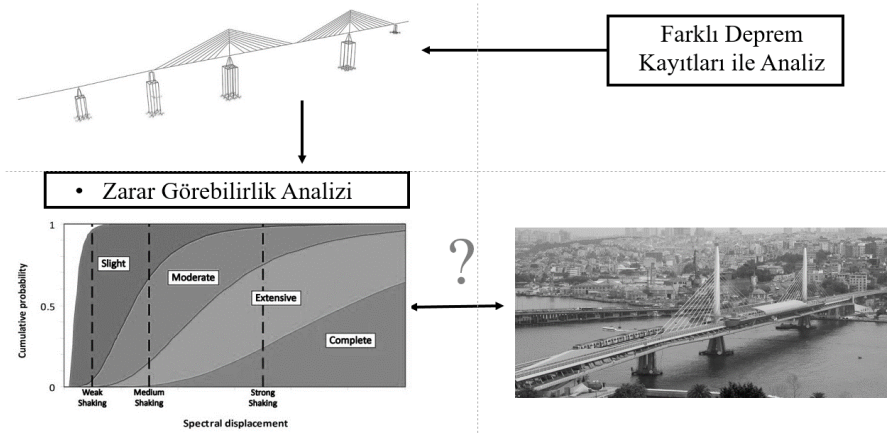
Şekil 7: Geçici sensörler.

Depreme Yönelik Sağlık İzleme Sistemi

Hasar Görebilirlik Analizi

Hasar görebilirlik, önceden öngörülebilinen bir tehlikenin, tahmin edilebilen zarar düzeyinde oluşması durumunda, bir risk unsuru grubunda meydana gelebilecek olan kayıp derecesi olarak tanımlanır. Hasar görebilirliği etkileyen parametreleri farklı başlıklar

altında toplayarak çeşitlendirek mümkündür. Bunların dışında ise yine yapı sistemlerinin özellikleri ve bunların zemin nitelikleri ile kombinasyonları da hasar görebilirlik analizlerini etkilemektedir. Yapı özelinde bakacak olursak; ele alınan hasar görebilirlik değerlendirmeleri, yapıların sismik performanslarının ortaya konması açısından önemlidir. Sismik performanslarının ortaya konulmasında bizlere gerekli olan bilgileri yapı özelinde verecektir. Yapının doğrusal olmayan modeli kurularak, çeşitli seviyelerde depreme maruz bırakılan yapısal model sonucunda, yapının spektral yer değiştirmelerine göre grafiğinin çizilmesi ile yapının hasar görebilirlik analizi yapılır. Bu çeşitli seviyelerdeki depremlere karşı alınacak hasarlar ise olasılıksal bir fonksiyonu göstermektedir. Bu çalışmada hasar görebilirlik analizi çerçevesinden, yapının maruz kaldığı yer ivmesi model için yapılan hasar görebilirlik analizindeki yer değiştirmelerle karşılaştırılarak yapının hasar görüp görmediği incelenebilecek hale getirilecektir. Bu sayede yapının deprem sonrasında, hasar görebilirlik analizlerine dayandırılarak köprünün kullanılabilirlik durumu hakkında acil olarak bir fikir verebilecek anında çözüme doğru gerekli adımların hızlı bir şekilde atılmasını kolaylaştıracaktır. Yapısal sağlık izlemenin hasar görebilirlik analizinde kullanımı şematik olarak Şekil 8'da gösterilmiştir. Basit bir biçimde Şekil 8'da da görüleceği üzere acil durumlarda köprü işletmesinin vermesi gereken bu kararlar kolaylaşacak ve acil durumlardaki ulaşımın kesilmesi ,maddi manevi kayıpların önüne geçilmesi sağlanabilecektir.



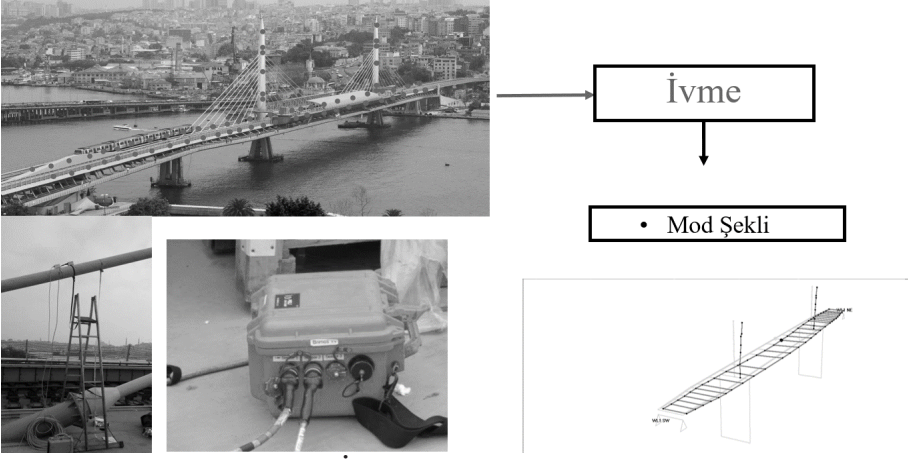
Şekil 8: Yapısal sağlık izlemenin kullanım şeması.

Yapıya özel doğrusal olmayan analiz bazı Sağlık İzleme

Yapılarda hasarlar ,yıllar ve çevresel etkenlere bağlı olarak sistem elemanlarının dayanımlarının azalması ile yapının bütünsel olarak gemoetrisinde taşıyıcı sistemlerinin zayıflamasına ve yapısal elemanların zorlanmalarına sebep olmaktadır. Sağlık izleme sonucunda yapısal elemanların maruz kaldığı ivmeler ölçülebilmektedir ki köprüde yapısal taşıyıcı sistem çeşitli sensörler yardımı ile izlemeye alınarak, yapısal olarak köprünün güvenliğinde oluşabilecek olumsuz durumların ve yapısal davranıştaki değişimlerin anında ölçümle tespit edilebilmesine imkan vermektedir. Ayrıca yapıya özel geliştirilmiş doğrusal olmayan yapı modelleri, uygulanan depremler sonucunda performans seviyelerinin gözlenmesinde kullanılmaktadır. Mevcut yapı özelinde düşüncecek olursak uzun süreli izleme sayesinde yapının yaşlılık ve dış etkenlere bağlı

olarak zamanla değişen fonksiyonlarına bağlı olarak ileriki performans seviyelerinin araştırılmasına ve tahmin edilmesine imkan verecektir.

Köprü üzerindeki geçici sistem ile ilk değerlendirme 3 Kasım 2013 tarihinde yapılmış olup kullanılan geçici sensörlerden ivme kayıtları elde edilmiş olup bu verilerden frekans analizleri yapılarak mod frekansları elde edilmiş ve buradan da ilk mod şekilleri elde edilmiştir. Bunlar şematik olarak Şekil 9'de gösterilmiştir.



Şekil 9: İlk ölçümlere göre mod şekli.

Bu çalışmada ise geliştirilecek doğrusal olmayan yapısal model, gerçek yapının maruz kaldığı yer ivmesi uygulanarak burada yapı hasarının lokasyonunun tespit edilmesi için bir araştırma yapılacaktır. Hasar lokasyonu bilindiği takdirde, hasar görmüş bölgeye yapılacak bakım sayesinde yapının kullanım ömrü ve güvenilirliği arttırılacaktır.

Sistem Tanılama

Bu çalışmada sistem tanılama yöntemi olarak kullanılan yöntem transfer fonksiyonu pik seçimi ya da bir diğer adı ile basit frekans dekompozisyonudur. Köprü üzerindeki sensörlerden elde edilen ivme datalarının frekans içeriklerinin kontrol edildiğinde köprünün titreşim frekansları gözlenebilir. Bir sinyalin frekans içeriğinin araştırılması için ise Fourier dönüşümü kullanılmaktadır (Fourier 1822). Fourier dönüşümü, zamana bağlı sinyallerin sinüs ve cosinüs da sinyallerinin toplamı cinsinden yazmak için kullanılmaktadır.

$$F(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j2\pi \left(x \frac{n}{N} \right)} \quad (1)$$

Fourier dönüşümünün yavaş olması sebebiyle daha sonradan geliştirilen hızlı fourier dönüşümü kesikli sinyallerin sinüs ve kosinüs eşdeğeri sinyallere dönüştürülmesi için kullanılmaktadır. Bir sinyalin sinüs ve kosinüs sinyallerine dönüştürüldüğünde elde edilen karmaşık düzlemde bir vektördür. Bu vektör kullanılarak sinyalin genlik faz açısı

ve frekansı bilgilerine ulaşılabilir. Ancak çevresel salınının kullanıldığı bu gibi çalışmalarda, sinyalin alınan parçasının genlik ortalaması, diğer frekanslardaki salınınlar yüzünden, sıfır olmayabilir. Bu sebeple alınan sinyal parçalarında “detrend” işlemi yapılarak sinyal genlik ortalaması sıfıra çekilmiştir. Fourier dönüşümü ile elde edilen, frekans spektrumu, sinüs dalgalarına dönüştürülmüş sinyallerin her frekanstaki genliklerini vermektedir. Bu sinyaller istenirse ters fourier dönüşümü yapılarak başlangıç sinyallerine dönüştürülebilmektedir. Frekans spektrumunda görülen pik değerler, incelenen yapıdaki salınının hangi titreşim modunda daha baskın olduğunu göstermektedir.

Basit frekans dekompozisyonunda, mod şekillerinin yakalanabilmesi için mod frekanslarının birbirinden ayırık olması gerekmektedir (Brincker and Ventura 2015). Ancak gerçek yapılarda mod frekanslarının birbirinden uzaklığı fazla olmamaktadır. Bu çalışmada, pik seçimleri birbirine çok yakın olduğundan ancak belli bir bölgede birinci mod frekansı seçilmiştir. Mod frekansının seçilmesinin ardından, diğer modların yeterince uzak olduğu kabulü ile aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$y(t) = aq(t) \quad (2)$$

Denkleminde y, yapısal davranış, a mod şekli ve q ise ele alınan modun modal koordinatı, olarak işleme katılırsa, korelasyon fonksiyonu matrisinin tanımından hareketle,

$$R(\tau) = E[y(t)y(t+\tau)^T] = aE[q(t)q(t+\tau)]a^T = R_q(\tau)aa^T \quad (3)$$

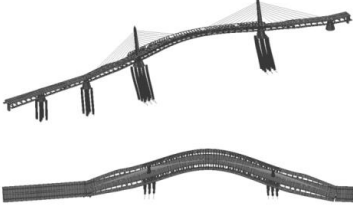
$$G_y(f) = G_q(f)aa^T \quad (4)$$

$R_q(\tau)$, modal koordinatların otokorelasyon fonksiyonu ve $G_y(f)$ yapısal tepki spektral yoğunluk matrisi ve $G_q(f)$ otokorelasyon fonksiyonu olduğuna göre, spektral matrisinin herhangi bir satırı ya da kolonu mod şekli vektörü ile orantılıdır.

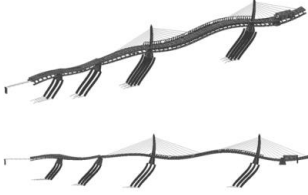
Bulgular

Yapısal model çubuk elemanların kullanımı ile oluşturulmuş olup tasarımcı firmadan temin edilen dökümanlar yardımı ile SAP2000 programı kullanılarak yapılmıştır. Bu süreçte ilk önce hazırlanan çizimler ve dökümanlar genel olarak taranmış. Bunlar üzerinden köprünün üst yapı ve alt yapı olarak iki ayrı gruba ayrılarak modelleme çalışmasına başlanmıştır. Bu işlem sırasında ilk ölçümlerin sadece kablo ve tabliyelerde yapıldığı, ayaklar ve kazıklarda bu çalışmanın yapılmadığı saptanmıştır. Yaptığımız modele ilgili dökümanlarda olmadığı içinde kütle katılım oranları hakkında bir çalışma yapılmamıştır.

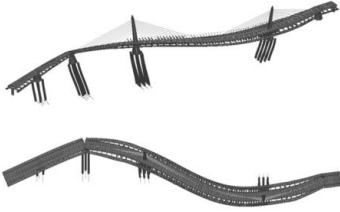
Yapısal modelin çubuk elemanlar ile SAP2000 programı ile oluşturulmasının ardından mod şekilleri ve frekanslar tasarım sırasında yapılan hesapla karşılaştırılmıştır. Mod frekansları arasındaki uyumsuzluk dışında mod şekilleri birbirine benzer şekilde elde edilmiş olup tasarım ve çubuk modeli mod şekilleri ve frekansları karşılaştırılması Şekil 10’de gösterilmektedir.

Tasarım Modeli

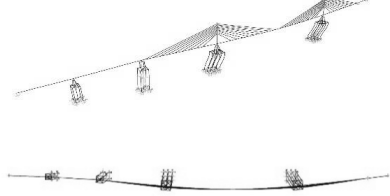
Birinci Mod: 2.475 sn



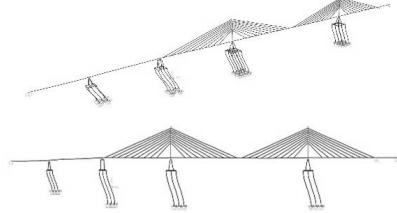
İkinci Mod: 2.188 sn



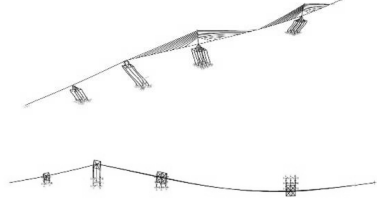
Üçüncü Mod: 1.730 sn

Çubuk Modeli

Birinci Mod: 2.955 sn



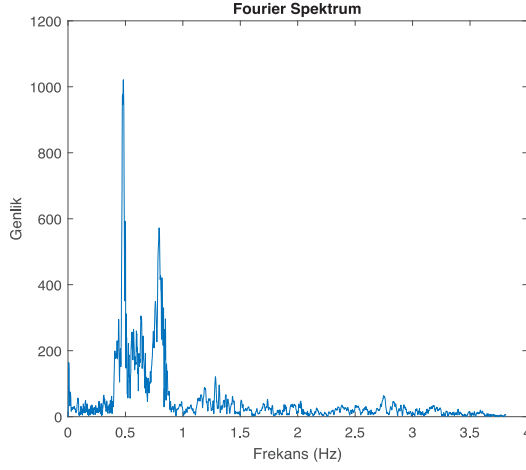
İkinci Mod: 2.589 sn



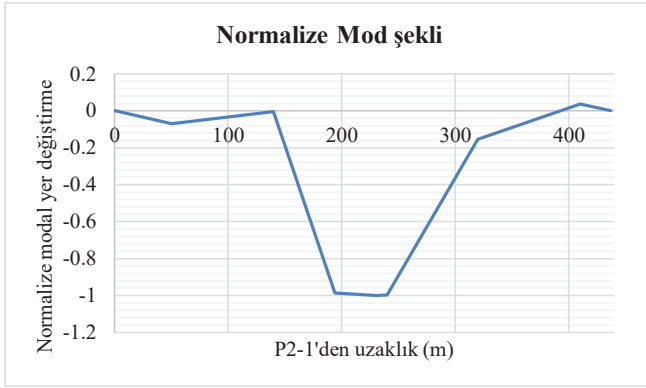
Üçüncü Mod: 2.441 sn

Şekil 10: Mod şekilleri karşılaştırması.

Ayrıca ivme sensörlerinden elde edilen verilerin fourier dönüşümü sonucunda elde edilen, genlik-frekans grafiği Şekil 11’de gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi ilk pik değeri çok yüksek ve diğer değerlerden oldukça ayrı olarak görünmektedir. Bu sayede ilk mod frekansının, ilk pikin olduğu frekans değeri olan 0.48 Hz ‘de olduğu görünmektedir. İkinci pik değeri ise 0.79 Hz’dedir. 0.48 Hz baz alınarak çizilen mod şekli ise Şekil 12’ de gösterilmektedir.



Şekil 11: İvme sensörü verilerinin frekans analizi.



Şekil 12: Frekans analizinden elde edilen 1. mod şekli.

Sonuç

Bildiri kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda yapısal modelin çubuk eleman ile oluşturulmasının ardından tasarımcı dökümanları ile karşılaştırılması ile mod şekillerinin ve mod frekanslarının birbirlerine yapısal sağlık izlemede kullanılabilecek düzeyde yakın oldukları saptanmıştır. Ayrıca ivme verilerinin frekans analizinden elde edilen mod frekansına göre elde edilen mod frekansına göre çizilen mod şekli birinci mod üzerinden karşılaştırılması sonucu mod şekillerinin yakın olduğu gözlenmektedir. Planlanmış çalışmalar arasında yapısal modelin MATLAB programı ile modellenerek doğrusal olmayan eleman modelinin yığılı plastik mafsallarla gerçekleştirilmesi, yapısal sağlık izleme yöntemlerinden pik seçiminin gerçekleştiren bir MATLAB programı geliştirerek bunların beraber çalışması ile köprünün kullanılabilirlik düzeyinin tespit edilmesinde bir yöntem araştırılması yapılacaktır. Ayrıca doğrusal olmayan yapısal model ile oluşturulacak farklı deprem seviyelerinde ki yapısal modelin görebileceği hasarın grafiğe

dökülmesi ile hasar görebilirlik analizinin uygulanması da çalışma planları arasındadır. Yapısal sağlık izleme ve sistem tanılama uygulamalarının yapının doğrusal olmayan davranış modeli ile birleştirilmesi araştırılmaya açık bir alan olarak görünmektedir.

Teşekkür Bu çalışmaya verdikleri desteklerden dolayı METRO İSTANBUL A.Ş.'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Brincker, R. and C. E. Ventura (2015). Introduction to Operational Modal Analysis, John Wiley & Sons, Ltd.

Brincker, R., L. M. Zhang and P. Andersen (2000). "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition." Imac-Xviii: A Conference on Structural Dynamics, Vols 1 and 2, Proceedings **4062**: 625-630.

Felber, A. J. (1993). Development of a Hybrid Bridge Evaluation System. Doctor of Philosophy PH.D., The university of British Columbia.

Fourier, J. B. J. (1822). Théorie analytique de la chaleur, Chez Firmin Didot, père et fils.

Ibrahim, S. R. and E. C. Mikulcik (1973). "A Time Domain Modal Vibration Test Technique." Shock Vib. Bull. **43**(4): 21-37.

Juang, J.-N. (1994). Applied System Identification, Prentice Hall.

Juang, J. N. and R. S. Pappa (1985). "An Eigensystem Realization-Algorithm for Modal Parameter-Identification and Model-Reduction." Journal of Guidance Control and Dynamics **8**(5): 620-627.

Ljung, L. (1997). System identification theory for the user, Prentice-Hall.

