SENSÖR YOĞUNLUĞU VE GÜRÜLTÜ FAKTÖRLERİNİN MODEL BİR KÖPRÜNÜN DİNAMİK PARAMETRELERİNİN TAHMİNİNE ETKİSİ

Mohammad Salavati[1], Özgür Özçelik[2], İ. Serkan Mısır[3], Serap Kahraman[4]

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi (Inş. Müh.), İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Kaynaklar Yerleşkesi, Buca/İZMİR
[2]Yardımcı Doçent, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Kaynaklar Yerleşkesi, Buca/İZMİR, Email: ozgur.ozcelik@deu.edu.tr
[3]Uzman (Dr.), İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Kaynaklar Yerleşkesi, Buca/İZMİR
[4]Profesör, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Kaynaklar Yerleşkesi, Buca/İZMİR

ÖZET:

Yapı sağlığının gözlenmesi (structural health monitoring) işlemi, yapıların güvenli kullanım süresinin tahmini ve/veya katastrofik olaylardan sonra önemli yapılarda hasar tespitinin yapılabilmesi için son yıllarda önemli bir araç haline gelmiştir. Titreşim-tabanlı tahribatsız hasar değerlendirmesi, yapının modal parametrelerindeki (titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) değişim takip edilerek yapılabilmektedir. Bu parametreler, deneysel modal analiz (experimental modal analysis) yöntemleriyle yapının global titreşim verileri kullanılarak tahmin edilebilir. İnşaat mühendisliği yapılarında deneysel modal analiz temelli hasar tespiti, modal parametrelerin doğru tahminine bağlıdır. Bu nedenle doğru tahmini etkileyen faktörlerin incelenmesi son derece önemlidir. Sunulan deneysel çalışmada kullanılan model köprü st37 çelik malzemesinden üretilmiş, 6.0 m açıklığa ve 2.05 m yüksekliğe sahip; döşemesiz ağırlığı yaklaşık 2425 N olan fiziksel bir köprü modeli kullanılmıştır. Köprü üzerinde ortamsal titreşim ve darbe testleri gerçekleştirilmiş, köprünün titreşimleri farklı noktalara yerleştirilmiş sekiz adet ivmeölçer yardımı ile kaydedilmiştir. Köprünün modal parametreleri, "doğal uyarım tekniği ve öz-sistem realizasyon algoritması" (Natural Excitation Tecnique with Eigensystem Realization Algorithm - NExT-ERA), ve ayrıca "öz-sistem realizasyon algoritması" (ERA) yöntemleri kullanılarak bulunmuştur. Deneysel yolla elde edilmiş bu değerler kullanılarak köprünün kalibre edilmiş sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve bu modelden elde edilen simülasyon verileri üzerinde sensör yoğunluğu ve gürültü miktarı faktörlerinin modal parametrelerin tahminine etkisi incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER*:* Çelik Model Köprü, Sistem Tanımlama, NExT, ERA, Yapı Sağlığının Gözlenmesi, Deneysel Modal Analiz.

1. GİRİŞ

Yapı sağlığının gözlenmesi (YSG), deprem kuşağında bulunan ülkelerde mevcut yapıların değerlendirilmesi, hasar tespiti ve yapıların güçlendirme sonrası durumlarının değerlendirmesi işlerinde kullanılabilen önemli bir araç haline gelmiştir. Bu çalışmada, YSG için NExT-ERA ve ERA yöntemleri kullanılmıştır. NExT tekniği bir korelasyon analizi tekniği olup geniş spektrumlu bir girdi tarafından (örn.: ortamsal titreşim) tahrik edilen bir sistemden ölçülen iki tepki sinyalinin çapraz korelasyon değerleri ile sistemin serbest titreşim tepkisinin aynı analitik forma sahip olduğu prensibine dayanır (James v.d., 1993). Elde edilen çapraz korelasyon fonksiyon değerleri serbest titreşim verileri kabul edilir.

Bu değerler, özellikle düşük sönümlü sistemlerde kullanılması durumunda uygun sonuçlar veren ERA yöntemine girilerek sistemin azaltılmış dinamik modeli elde edilir. Bu model kullanılarak da dinamik (modal) parametreler hesaplanır (Juang ve Pappa, 1985).

Sistem tanımlama (ST) ve yapı sağlığının gözlenmesi başlığı altında yapılan birçok bilimsel araştırma ve yayın bulunmaktadır. Bu alanda yapılan detaylı çalışmalardan biri 1996-2001 yılları arasını kapsayan Los Alamos (2004) raporudur. Farrar ve Worden'in 2006 yılında yaptığı çalışmada ise YSG alanındaki güncel gelişmeler, bu alanda kullanılan farklı yöntemlerin ayrıntıları, uygulama alanları ve aşamaları incelenmiştir. Daha özel çalışmalara örnek olarak lineer dinamik sistemlerin modal parametrelerinin elde edilmesi için kullanılan ve sistemin serbest titreşim veya darbe tepkisinin kullanıldığı ERA yöntemi (Juang ve Pappa, 1985) ve De Callafon v.d. 2008 yılında yayınladıkları ve rastgele girdi (input) sinyallerinin de tanımlama sürecine dahil edildiği ve bu açıdan ERA yöntemini geliştiren çalışmalar örnek verilebilir. Farrar ve James (1997) çalışması, NExT-ERA yönteminin köprü türü yapıların ortamsal titreşim verileri kullanılarak modal parametrelerinin elde edilmesi durumuna örnek gösterilebilir. NExT-ERA yönteminin bina türü yapıların modal parametrelerinin elde edilmesinde kullanımına örnek ise Caicedo v.d. (2004) yaptığı, her iki yönde iki açıklıklı, dört katlı çelik yapıda yapı sağlığının gözlenmesi ve hasar tespiti çalışması ve yine aynı yazarın (2010) yılında yayınlandığı ve yapı sağlığının gözlenmesi sürecinin detaylı olarak açıklandığı çalışmalar gösterilebilir. Modal parametrelerin tahminini etkileyen faktörlerin ayrıntılı bir şekilde incelendiği çalışmalara örnek olarak Moaveni v.d., 2007 yılında yaptığı çalışma verilebilir.

Çalışmanın amacı, sistem tanımlama yöntemleriyle elde edilen modal parametrelere sensör yoğunluğu ve ölçüm/sensör gürültü miktarı parametrelerinin etkilerinin araştırılmasıdır. Bu amaçla, fiziksel bir çelik köprü modelinin modal parametreleri önce NExT-ERA ve ERA ile tahmin edilmiş, sonrasında köprünün tahmin edilmiş parametrelere bağlı olarak kalibre edilmiş sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve bu modelden elde edilen simülasyon verileri kullanılarak sensör yoğunluğu ve gürültü miktarı parametrelerinin NExT-ERA yöntemi ile tahmin edilen modal parametrelere etkisi incelenmiştir.

2. ÇALIŞMADA KULLANILAN SİSTEM TANIMLAMA YÖNTEMİ

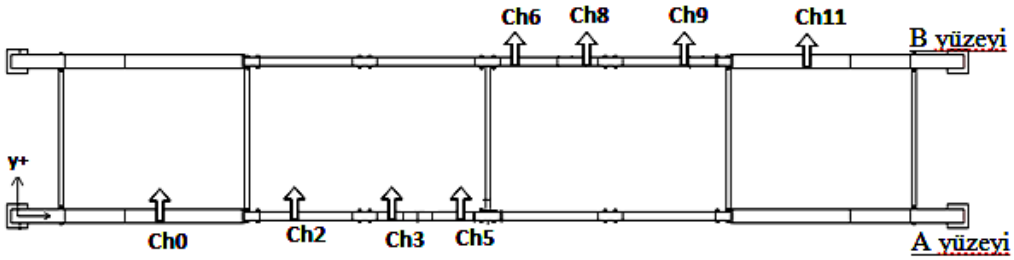
Çalışmada, modal parametrelerin tahmini için ERA ve bu yöntemin ortamsal titreşim verilerine uygulanabilir bir versiyonu olan NExT-ERA yöntemi kullanılmıştır. NExT yönteminde, yapının belli noktalarından kaydedilen ortamsal sistem titreşimleri ile seçilen bir referans kanalı arasındaki çapraz korelasyon fonksiyonu hesaplanır. Çapraz korelasyon güç spekturumu, frekans tanım aralığında Welch-Bartlett yöntemi (Manolakis v.d., 2000) kullanılarak bulunmuş ve daha sonra ters Fourier transform ile zaman tanım aralığına dönüştürülerek çapraz korelasyon fonksiyonu elde edilmiştir. Bu fonksiyonun, yapının serbest titreşim hareket denklemini sağlandığı kabul edilmektedir (James v.d., 1993). Bu aşamanın devamında, ERA yöntemi kullanılarak sistemin azaltılmış durum-uzay (state-space) dinamik modeli bulunmuştur. Bunun için çapraz korelasyon fonksiyonu değerleri kullanılarak Hankel ve kaydırılmış-Hankel matrisleri hesaplanmış, Hankel matrisi tekil-değer-dekompozisyonu (singular value decomposition) ile tekil değerlerine ayrılarak model derecesi seçilmiş ve bu dereceye bağlı olarak da sistemin indirgenmiş durum-uzay modeli oluşturulmuştur. İndirgenmiş model kullanarak, modal parametreler tahmin edilmiştir (Juang ve Pappa, 1985; Farrar v.d., 1997; Moaveni v.d., 2006; Moaveni, 2007; Caicedo vd., 2004; Nayeri vd., 2007; De Callafon vd., 2008). ERA yönteminde çapraz korelasyon fonksiyonunun tahminine gerek olmamaktadır. Bunun yerine direkt olarak sistemin darbe-tepkisi kullanılarak Hankel matrisi oluşturulmuş ve indirgenmiş durum-uzay modeli tahmin edilmiştir. NExT-ERA'nın ERA'ya göre avantajı, darbe tepkisi bilinmeyen ve/veya darbe ile tahrik edilemeyen sadece ortamsal titreşim değerleri ölçülebilen sistemlere (gerçek yapılar v.s.) uygulanabilmesidir.

3. KÖPRÜ TESTLERİ VE SİSTEM TANIMLAMA SONUÇLARI

D.E.Ü. Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuarı`nda 6.30 m açıklığında, 2.05 m yüksekliğinde ve döşemesiz ağırlığı yaklaşık 2453 N olan çelik köprü modeli Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'de ayrıca köprü döşemesi ağırlıklarını temsil eden yaklaşık 1275 N ağırlığa sahip 8 adet beton blok da görülmektedir. Seçilen döşeme ağırlıkları özellikle yüksek seçilmiştir, böylece köprünün temel titreşim frekansları düşürülmüş ve kullanılan ivmeölçer ve veri toplama cihazının sağlıklı çalıştığı frekans aralığı içinde çalışma imkanı yaratılmıştır. Çalışmada +/-4.0g şiddet aralığına sahip, frekans bant–genişliği DC-100 Hz arasında ve gürültü oranı ise 10 mg RMS olan 8 adet kapasitif ivmeölçer ve 8 kanallı PCI tipi 12 bit çözünürlüklü veri toplama kartı ve LabVIEW kullanılmıştır.

Şekil 1. Çelik model köprünün farklı açılardan görünüşleri ve döşeme ağırlıklarını temsil eden beton bloklar.

Köprü elemanları birbirlerine bulonlar vasıtası ile birleştirilmiştir; ancak bu bulonlar klasik kafes elemanı davranışı oluşturacak şekilde değil, elemanların birleşim noktalarında moment de taşımasını sağlayacak yarı-rijit birleşimler ile birbirine bağlamaktadır. Bu ayrıntı köprünün sonlu elemanlar modelini oluştururken dikkate alınmıştır. Bulonların bir tork anahtarı yardımı ile 30 Nm tork değerinde sıkılmıştır. Tüm bulonların kontrollü bir şekilde sıkılması köprünün dinamik özelliklerinin kontrol edilebilmesi açısından önemli görülmüştür ve zaman içinde bu özelliklerde oluşabilecek değişikliklerin takip edilmesine ve nedeninin saptanmasına da olanak sağlayacaktır.



Şekil 2. Köprünün plan görünüşü, deneylerde kullanılan sensör yerleşimi ve sensörlerin pozitif yönleri.

Çalışmada sadece köprünün temel hareket yönü olan lateral hareketi incelenmiştir, bu nedenle ivmeölçerler köprünün döşemesine lateral yöndeki hareketi algılayacak şekilde Şekil 2'deki gibi yerleştirilmiştir. Köprünün ortamsal titreşim (ambient vibration) ve darbe tepkileri ölçülmüş ve bu veriler

kullanılarak köprünün sistem tanımlaması NExT-ERA ve ERA yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Köprünün tahmin edilen doğal frekans ve sönüm değerleri Tablo 1'da verilmiştir.

Tablo 1. Ortamsal titreşim ve darbe testleri sonucu elde edilen sistem tanımlama sonuçları.

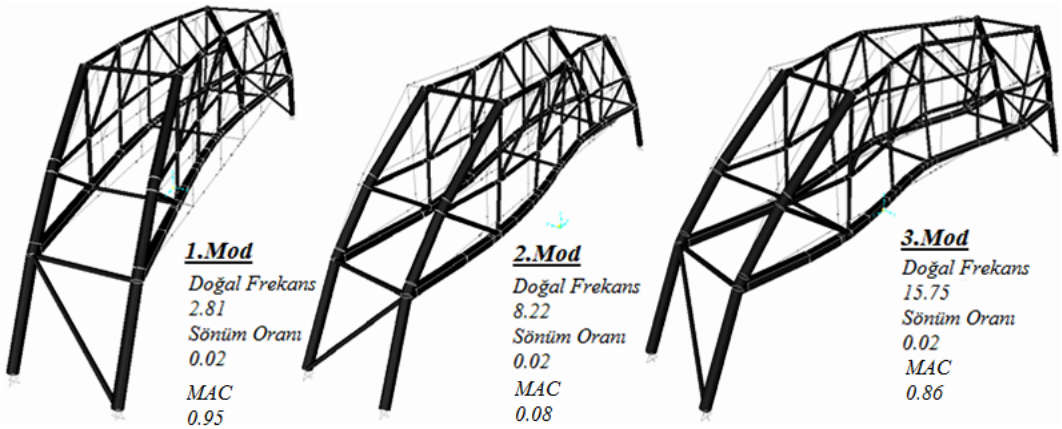
Yöntem	**Doğal Titreşim Frekans [Hz]**			**Sönüm Oranı [%]**		
	1. Mod	**2. Mod**	**3. Mod**	**1. Mod**	**2. Mod**	**3. Mod**
ERA	2.76	8.15	15.72	0.15	0.001	0.01
NExT-ERA	2.90	8.34	15.61	0.08	0.02	0.02

ERA ve NExT-ERA yönteminden elde edilen doğal titreşim frekansları birbirine çok yakındır; ancak iki yöntem ile tahmin edilen sönüm oranlarında önemli farklar görülmektedir. Ortamsal titreşim testlerini kullanan NExT-ERA yönteminden elde edilen sonuçların, sönüm değerleri için fiziksel olarak daha mantıklı olduğu ve köprü üzerinde önceden yapılmış daha ayrıntılı sistem tanımlama sonuçlarını da dikkate alındığında daha güvenli olduğu sonucuna varılmıştır. ERA yöntemi darbe testlerini kullanmaktadır ve darbe anında lokal modların da harekete geçmesi sönüm oranlarındaki bu değişimin nedenlerinden biri olabilir.

4. ANALİTİK KÖPRÜ MODELİ

Sensör yoğunluğunun ve gürültü oranın modal parametrelerin tahminine etkisini sistematik olarak inceleyebilmek için kalibre edilmiş üç boyutlu sonlu elemanlar modeline ihtiyaç vardır. Öncelikle köprünün geometrisi ve köprüyü oluşturan elemanların geometrik ve malzeme özellikleri ile bağlantı noktalarının özellikleri dikkate alınarak bir ilk model oluşturulmuştur. Analitik köprü modelini oluşturan elemanlar elastik kiriş-kolon elemanları olarak seçilmiştir. Döşeme ağırlıklarını temsil eden beton blokların ağırlıkları ise yine analitik modelin ilgili noktalarına nokta kütle kaynağı olarak yerleştirilmiştir.

Analitik modelin mesnetlerinin her biri sabit mesnet olarak atanmış, modelin sönüm oranları ise deney verileri kullanılarak elde edilmiş sonuçlar ve köprü üzerinde yapılan geçmiş sistem tanımlama çalışmaları dikkate alınarak sabit %2.0 modal sönüm olarak alınmıştır (Gündoğan v.d., 2011). Analitik modelin mod şekilleri ve bu mod şekillerine karşılık gelen doğal frekansları, fiziksel köprü modelinin sistem tanımlama sonucu elde edilen mod şekilleri ve doğal frekansları ile eşleşecek şekilde gerekli değişiklikler yapılarak ve bu değişiklerin belirli fiziksel limitler içinde kalmasına dikkat edilerek iteratif bir şekilde eşleştirilmiştir. Analitik yoldan elde edilen mod şekilleri ile deneysel yoldan elde edilen mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olup olmadığı ise modal güvence kriteri (modal assurance criteria - MAC) ile belirlenebilmektedir; MAC değeri 0 ve 1 arasında değişen değerler alabilmektedir (Allemang ve Brown, 1982). İki mod arasında hesaplanan yüksek MAC değeri bu iki modun birbirine benzer olduğu anlamına gelir. Mod şekillerinin uygunluğunun karşılaştırılabilmesi için, kalibrasyon aşamasında (iteratif bir şekilde) model her defasında 0.5 Hz – 30 Hz frekans bant aralığına sahip ve %3.0g RMS şiddetinde bant-limitli sıfır ortalamalı Gausyan beyaz gürültü (white noise) ile lateral yönde tahrik edilmiş ve belli noktalardan kayıt edilen sistem tepkileri kullanılarak NExT-ERA yöntemi ile mod şekilleri bulunmuştur. Bu mod şekilleri ile deneysel verilerden elde edilen mod şekilleri arasında hesaplanan MAC değerleri Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Kalibre edilmiş sonlu elemanlar modelinden elde edilen ilk üç mod.

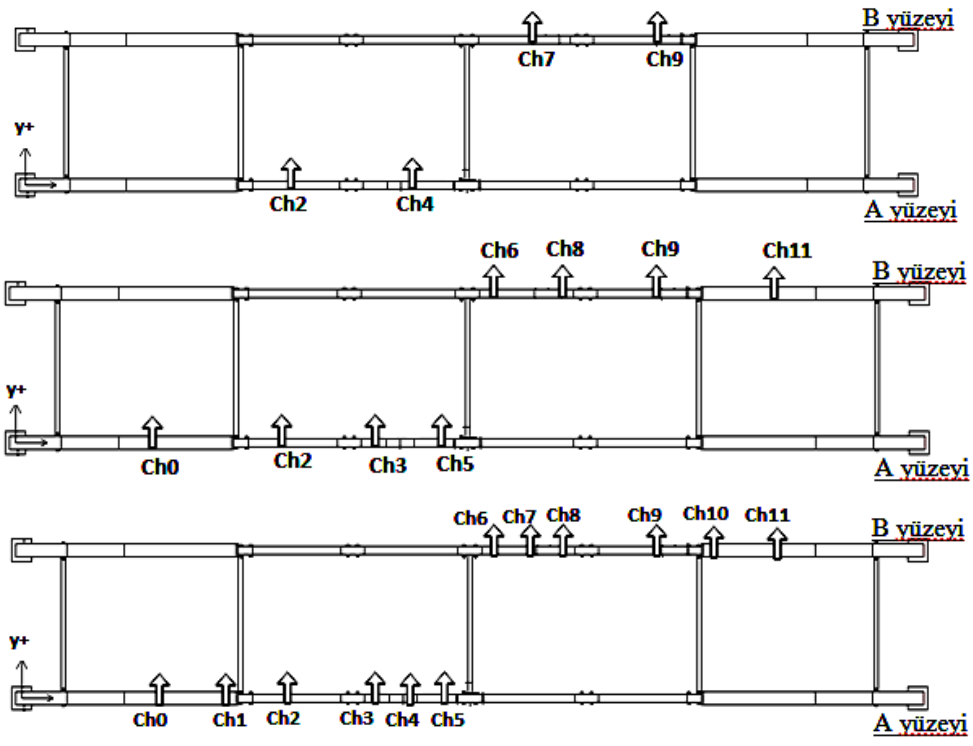
Dikkat edilirse, sistem tanımlama sonucu elde edilen doğal frekanslar ile (Tablo 1) analitik modelin verdiği doğal frekanslar birbirine çok yakındır. Şekil 3'de gösterilen kalibrasyonu yapılmış analitik modelden elde edilen modal parametre değerleri nominal değerler olarak kabul edilecektir. Analitik modelden elde edilen mod vektörleri ile sistem tanımlama sonucu elde edilen mod şekilleri arasında hesaplanan ve 1. ve 3. modlara ait yüksek MAC değerleri dikkate alındığında mod şekillerinin eşleştiği görülmektedir. Ancak 2. moda karşılık gelen MAC değeri düşük bir değerdedir. Bunun nedenini anlamak için analitik modelden elde edilen sistem tepkilerinin Fourier şiddet spektrumlarına bakılmıştır. Burada, tahrik fonksiyonun (bant-limitli beyaz gürültü) 2. modu düşük miktarda tahrik ettiği ve bunun da 2. modun toplam sistem tepkisine modal katkısının düşük olmasına yol açmıştır. Modal katkısı düşük olan bu modu, sistem tepkisinden sağlıklı bir şekilde tahmin etmek de zorlaşmaktadır.

5. SENSÖR YOĞUNLUĞU VE ÖLÇÜM GÜRÜLTÜ MİKTARI FAKTÖRLERİ

5.1. *Sensör Yoğunluğu*

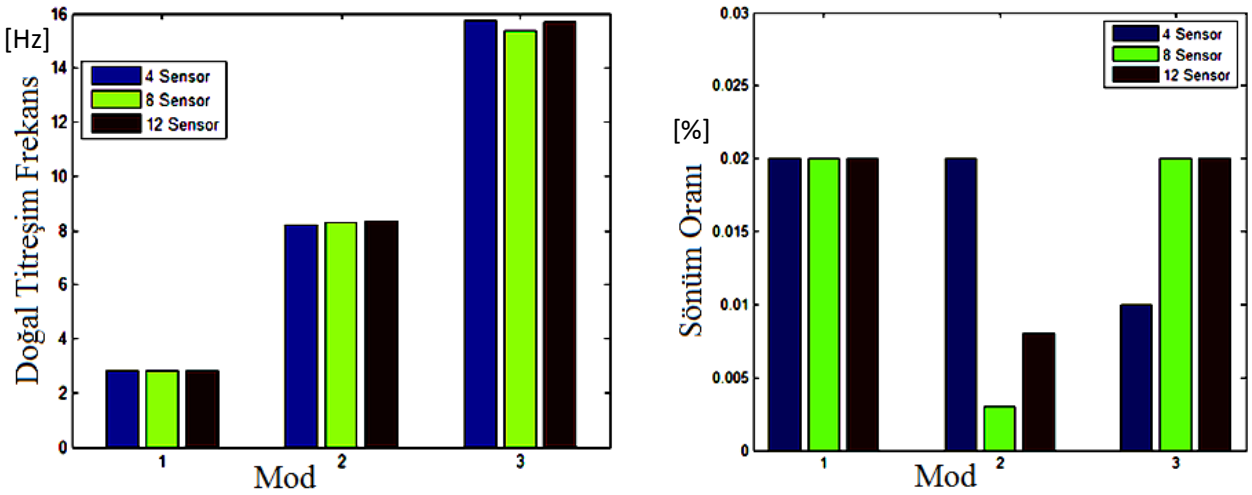
Yapı sağlığının gözlenmesi işlemi için modal parametrelerin uygun yaklaşıklıkta tahmin edilmesi son derece önemlidir. Modal parametrelerin tahminine bağlı olarak yapının mevcut durumu veya hasar durumu incelenebilmektedir. Bu nedenle, modal parametrelerin tahminini etkileyen faktörlerin araştırılması gerekmektedir. Bu faktörler arasında, sensör yoğunluğu, gürültü miktarı, kayıt uzunluğu, kullanılan sistem tanımlama yöntemi, tahrik fonksiyonunun şiddetini saymak mümkündür (Moaveni v.d 2007). Bu çalışmada ise bu faktörlerden sadece sensör yoğunluğu ve gürültü miktarının modal parametlerin tahminine etkisi incelenmiştir.

Sensör yoğunluğunun sonuçlara etkisinin incelenebilmesi için kalibre edilmiş sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinin kalibrasyonu, gerçek köprü üzerinde yapılan testlerden elde edilen modal parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyonu yapılmış model, 0.5 Hz – 30 Hz frekans bant aralığına sahip %3.0g RMS şiddetinde bant-limitli sıfır ortalamalı Gausyan beyaz gürültü (white noise) ile lateral yönde tahrik edilmiş ve analitik model üzerinde sensör yerlerini temsil eden ve köprü platformu üzerinde bulunan farklı sensör yoğunluklarını temsil eden 4, 8, ve 12 noktadan (üç farklı sensör yoğunluğu durumu) sistem tepkileri okunarak simülasyon sonuçları sistem tanımlama metotlarında kullanılmak üzere kayıt edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4: Sensör yoğunluğu: (a) 4 sensör, (b) 8 sensör ve (c) 12 sensör durumları.

Üç farklı sensör yoğunluğuna karşılık gelen durumlar için elde edilen modal parametrelerdeki değişim Şekil 5'de gösterilmiştir.

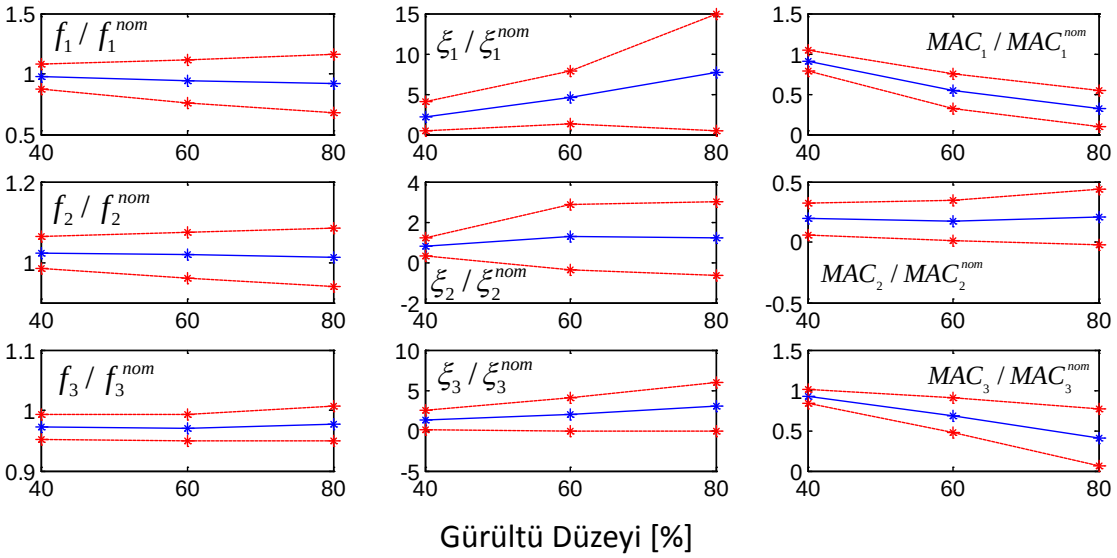


Şekil 5.Sensör yoğunluğunun modal parametrelere etkisi.

Elde edilen sonuçlar, sensör yoğunluğunun doğal titreşim frekanslarının doğru tahmininde önemli bir deiğişken olmadığını göstermiştir. Sönüm oranlarında ise durum daha farklıdır. Sensör sayısı arttıkça 3. moda karşılık gelen sönüm oranının daha doğru tahmin edildiği görülmektedir; ancak 1. modun sönüm oranının tahmini sensör yoğunluğu parametresine bağlı olmadığı görülmüştür. 2. mod sönüm oranının tahmini için ise sensör sayısındaki artışın olumlu bir etkisi görülmemiştir. Bu durum yine, 2. modun modal katkısının düşük olması ile açıklanabilir.

5.2. *Ölçüm/Gürültü Miktarı*

Ölçüm/sensör gürültü düzeyi sıfır ortalamaya sahip Gausyen beyaz gürültü prosesi olarak modellenmiş ve köprünün simülasyon tepkisi üzerine eklenerek gürültülü sistem tepkisi elde edilmiştir (modelde Şekil 2'deki 8 noktadan köprü tepkisi kayıt edilmiştir; bu durum gürültünün sıfır olduğu durumdur). Gürültü etkisi incelenirken diğer tüm değişkenler sabit tutulmuştur; sabit tutulan parametreler sistem tanımlama yöntemi, veri uzunluğu, sensör yoğunluğu (analitik model üzerinde 8 sensör noktası seçilmiştir), ve tahrik fonkisyonu olarak kullanılan beyaz gürültü ivme fonsiyonun RMS şiddetidir. Tahrik fonksiyonu %3.0g RMS şiddetinde bant-limitli sıfır ortalamalı Gausyen (0.5 Hz – 30 Hz spektrum genişliğine sahip) beyaz gürültü olarak seçilmiştir. Gürültü miktarının parametrelerin tahminine etkisinin incelenmesi için %40, %60 ve %80 olmak üzere üç farklı RMS şiddetinde gürültü düzeyi dikkate alınmıştır. Çalışmada kullanılan gürültü düzeyi, gürültü prosesinin RMS'sinin her sekiz kanalda kaydı yapılmış simülasyon değerlerinin RMS'sine oranı şeklinde tanımlanmıştır. Sekiz farklı kanala eklenen üç farklı düzeydeki sekiz gürültü prosesi birbirinden bağımsız beyaz gürültü prosesleridir. Her bir gürültü düzeyi için toplamda 8'er setten (her bir kanal için) 10 farklı beyaz gürültü prosesi kullanılmıştır, toplamda 80 gürültü prosesi, ve her bir gürültü düzeyinde 10'ar adet olmak üzere toplamda 30 adet sistem tanımlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak doğal titreşim frekansları, sönüm oranları ve MAC değerleri için Şekil 6'da özetlenmiştir.



Şekil 6. Üç lateral mod için artan gürültü düzeyinin açısal frekans, sönüm oranı ve MAC değerlerine etkisi (ortalama ve ± 1 standart sapma).

Şekil 6'da gürültü düzeyinin NExT-ERA yöntemi ile tanımlanan modal parametrelere etkisi özetlenmiştir. Sonuçların kolay takibi için modal parametreler nominal değerler (Şekil 3) dikkate alınarak normalize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre artan gürültü miktarı modal parametreleri şu şekilde etkilemektedir: (i) tanımlanan titreşim frekansları ve MAC değerlerinin varyansları (σ^2) yüksek gürültü düzeylerinde bile düşük kalmıştır, bir başka deyişle artan gürültü düzeyi titreşim frekansları ve mod şekillerinin tahminini çok olumsuz etkilememiştir; (ii) tüm modal parametreler için, gürültü düzeyi artıkça varyanslarda artma gözlenmiştir; (iii) gürültü düzeyi arttıkça modal parametrelerde oluşan en büyük belirsizlik, bir başka deyişle nominal değerden uzaklaşma, sönüm oranlarında gözlenmiştir; (iv) gürültü düzeyi arttıkça her üç mod için de MAC değerlerinde azalma yönünde bir trend görülmüştür.

6. SONUÇ

İnşaat mühendisliği yapılarında deneysel modal analiz temelli hasar tespiti, modal parametrelerin uygun yaklaşıklıkta/doğru tahminine bağlıdır. Bu nedenle, doğru tahmini etkileyen faktörlerin incelenmesi son derece önemlidir. Çalışmada, NExT-ERA yöntemiyle elde edilen modal parametrelere sensör yoğunluğu ve ölçüm/sensör gürültü miktarı parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bunun için, model bir çelik köprünün önce modal parametreleri NExT-ERA ve ERA yöntemleriyle tahmin edilmiş, köprünün tahmin edilmiş parametrelere bağlı kalibre edilmiş sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve bu model kullanılarak sensör yoğunluğu ve gürültü miktarı parametrelerinin modal parametrelerin tahminine etkisi incelenmiştir.

Sensör yoğunluğunun üç lateral modun doğal titreşim frekanslarının doğru tahminini etkilemediği görülmüş; ancak sönüm oranlarını etkilediği ortaya çıkmıştır. Özellikle, üst modların sönüm oranları sensör sayısı arttıkça daha doğru tahmin edilmiştir. Modal katkısı düşük olan modların modal parametrelerinin doğru tahmini ise özellikle sönüm oranı ve MAC değerleri açısından daha zor olmaktadır. Bu nedenle, sistemi tahrik eden fonksiyonların dikkatli seçilmesi önemlidir.

Gürültü düzeyinin modal parametrelere etkisi ise şu şekilde özetlenebilir: (i) artan gürültü düzeyi, titreşim frekanslarının tahminini çok olumsuz etkilememiştir; (ii) tüm modal parametreler için, gürültü düzeyi artıkça varyanslarda (belirsizliklerde) artma gözlenmiştir; (iii) gürültü düzeyine en hassas parametrenin sönüm parametresi olduğu görülmüştür, (iv) gürültü düzeyi arttıkça MAC değerlerinde azalma yönünde bir eğilim gözlenmektedir.

Deneysel modal analiz temelli hasar tespitinin doğru yapılabilmesi için, sensör yoğunluğu ve sensör gürültü miktarına dikkat etmek gerekmektedir; bunun yanında kayıt edilen sistem tepkisinin taşıdığı titreşim bilgisi yine parametrelerin doğru tahminini etkileyen faktörlerden biridir. Bunlara ek olarak, seçilen sistem tanımlama yönteminin, kayıt uzunluğunun ve tahrik fonksiyonun frekans içeriği ve şiddet değerlerinin modal parametrelerin tahminine etkisi incelenmesine ihtiyaç duyulan konulardır.

KAYNAKLAR

Allemang, R.J.; Brown, D.L. (1982). A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis , Proc. The 1st SEM International Modal Analaysis Conference, Orlando, FL, USA.

Caicedo, J.M.; Dyke S.J.; Johnson, E.A. (2004). Natural Excitation Technique and Eigensystem Realization Algorithm for Phase I of the IASC-ASCE Benchmark Problem: Simulated Data, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130, No. 1, pp 49-60.

Caicedo, J.M. (2010). Practical Guidelines for the Natural Excitation Technique (NExT) and the Eigensystem Realization Algorithm (ERA) for Modal Identification Using Ambient Vibration, Society for Experimental Mechanics, pp 1-7.

De Callafon, R.A.; Moaveni, B.; Conte, J.P.; He, X.; Udd, E. (2008). General Realization Algorithm for Modal Identification of Linear Dynamic Systems, Journal Of Engineering Mechanics, ASCE , pp 712-722.

Farrar, C.R.; James, H.G. III (1997). System Identification from Ambient Vibration Measurements on a Bridge, Journal of Sound and Vibration , 205(1), pp 1-18.

Farrar, C.R.; Worden, K. (2007). An Introduction to Structural Health Monitoring, Phil. Trans. R. Soc. A, 365, pp. 303-315.

Gündoğan, M.; Özçelik, Ö.; Kahraman, S.; Mısır, İ.S., Çelik Model Köprünün Yapı Sağlığının Gözlenmesi, 2. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 2011, Eskişehir.

James, G. H.III, Carne T. G., Lauffer J. P. (1993). The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction From Operating Wind Turbines, Sandia Report SAND92-1666, UC-261.

Juang, J. N.; Pappa, R. S. (1985). Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, Journal of Guidance, Control, and Dynamics ,Vol. 8, no. 5, pp 620-627.

Manolakis, D.G.; Ingle V.K.; Kogan S.M. (2000). Statistical and Adaptive signal Processing, McGraw Hill.

Moaveni B., (2007). System and Damage Identification of Civil Structures, Ph.D. Thesis, University of California, San Diego.

Moaveni, B.; Barbosa, A.; Conte, J.P.; and Hemez, F.M., Uncertainty analysis of modal parameters obtained from three system identification methods. In Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference (IMAC-XXV), 2007, Orlando, USA.

Moaveni, B.; He, X.; Conte, J.P.; Udd E. **(**2006). Effect of Damage on Modal Parameters Using Full-Scale Test Data, in Proc. of International Conference on Modal Analysis **(**IMAC-XXIV), 2006, St. Louis**,** USA.

Nayeri, R.D.; Masri, S.F.; Chassiakos, A.G. (2007). Application of Structural Health Monitoring Techniques to Track Structural Changes in a Retrofitted Building Based on Ambient Vibration, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, pp 1311-1325.

Sohn, H.; Farrar, C.R.; Hemez, F.M.; Shunk, D.D.; Stinemates, S.W.; Nadler, B.R. and Czarnecki, J.J. (2004). A Review of Structural Health Monitoring Literature form 1996-2001, Los Alamos National Laboratory Report LA-13976-MS.