

Sürekli Kiri Bir Köprünün Gruplar Halindeki Davranış Ölçümlerinden Modal Parametrelerinin Tayini

G. Turan¹ ve H. Ceylan²

¹ Yrd.Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla, İzmir

² Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla, İzmir
Email: gursoyturan@iyte.edu.tr

ÖZET:

Köprülerin modal analizi için gerekli olan ölçümlerin temini bir hayli zordur. Köprüler uzun yapılar oldukları için, ölçüm sinyallerinin bir yerde toplanması kablolarla zor, kablosuz iletim ise sorunlu olmaktadır. Bu çalışmada, az sayıda algılayıcı ile grup halinde birbirine yakın ölçümler kullanılmıştır. Bu ölçümler simülasyon sonucu elde edilen ve içine beyaz gürültü eklenmiş sinyaller olup, grupların kaydırma işlemi ile bütün köprünün her yerinde ölçümü yapılabilmektedir. Algılayıcılar kaydırılırken her defasında bir algılayıcının yeri değiştirilmeyip referans sinyali olarak kullanılmıştır. Grup halindeki ölçümler her defa tek bir ölçüm haline getirilmiştir. Gruplar arasındaki referans ölçümlerinin Fourier dönüşümü aynı olacak şekilde gruplardan birine bir transfer fonksiyonu tayin edilmektedir. Diğer gruplara da aynı yöntem uygulandıktan sonra bütün köprü tek bir seferde ölçülmüş gibi olmaktadır. Daha sonra doğal uyarım tekniği (NExT) düzenlenmiş ve ardından öz sistem realizasyon algoritması (ERA) kullanılarak modal parametreler hesaplanmıştır. Uygulama için sürekli kiriş bir köprünün sayısal modeli kullanılmıştır. ERA hesabının sonucu köprünün sayısal modelinin modal parametreleri ile karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER : Köprü, Modal Parametre, Grup Ölçümleri, NExT, ERA

1. GİRİŞ

Köprü gibi büyük inşaat yapılarının modal analizi için gerekli ölçümlerin temini bir hayli zordur. Köprüler uzun yapılar oldukları için, ölçüm sinyallerinin toplanabilmesi ya algılayıcılardan gelen sinyalleri veri toplama sistemine taşıyan uzun kablolar ile, ya da kablosuz iletim mümkün olmaktadır. Kablolulu iletim yapılan ölçümlerde kabloların çok uzun olması ölçüm verilerinde gürültü artırımını kaçınılmaz kılmakta, kablo uzunluğu arttıkça sistemin gerçek davranış ölçümlerinden uzaklaşmakta ve ölçüm sonuçlarına güvenilirliği azaltmaktadır. Kabloların çok sayıda olması ve bir noktada toplama gereksinimi de veri toplama esnasında farklı sorunlar yaratmaktadır. Kablosuz algılayıcı kullanımı durumlarında ise kablosuz bağlantı bant genişliğinin sınırlı olması nedeniyle tek bir veri toplama merkezinden tüm algılayıcılardan gelen sinyalleri toplamak sorunlu olmakta, köprü gibi uzun yapıların ölçümleri için aynı anda birkaç veri toplama merkezinin kurulması gerekmektedir (Basten ve Schiphorst, 2012). Her iki durumda da çok sayıda algılayıcı kullanmak ve buna paralel olarak çok merkezli veri toplama istasyonu kurmak yapılacak işin maliyetini arttıracaktır. Bunlara ek olarak algılayıcı sayısının çok olması veri toplama sistemlerindeki kanal sayısının da fazla olmasını gerektirmektedir. Veri ölçüm hızı balanan algılayıcı sayısı ile orantılı olarak azalacağı için toplanan verilerin örnekleme frekansı kanal sayısına göre değişimlik gösterecektir (Beyen ve diğeri, 2011). Bundan dolayı modal analizi yapılacak olan sistemlerin yüksek modlarının tanımlanmasını güçleştirecektir.

Yukarıda belirtilen sorunlar ölçüm esnasında çok sayıda algılayıcı kullanmaktan kaynaklanmakta olup az sayıda algılayıcı kullanımı bu tür sorunlara çözüm getirebilmektedir. Bu çalışmada, az sayıda algılayıcı ile gruplar

halinde birbirine yakın ölçümler toplanarak inaat mühendisliği yapılarının modal analizinin yapıpı yapılamayacağı araştırılmıştır. Araştırmayı uygulamaya koymak amacıyla sayısal olarak sürekli kiriş bir köprü modeli oluşturulmuştur. Algılayıcılar köprü modeli üzerinde gruplar halinde kaydırılarak farklı zaman aralıklarında grup ölçümleri elde edilmiştir. Bu ölçümler kullanılarak köprünün eğerde her tek bir ölçümünün elde edilmesi amaçlanmıştır. Köprünün analizinde kullanılacak olan bütün sinyaller toplanıp grup halindeki ölçümleri eğerde her tek bir ölçüm haline getirmek üzere grup ölçümleri arasındaki transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Köprünün eğerde her ölçümü elde edildikten sonra sistem parametrelerinin tanımlanması için kullanılan sadece-çıkı yöntemlerinden olan NExT metodu düzenlenmiş ve ardından ERA metodu kullanılarak modal parametreler tayin edilmiştir. Köprünün sayısal modeli MATLAB (2012) programı kullanılarak simüle edilmiştir. NExT-ERA sistem tanımlama yöntemi ile bulunan sonuçlar köprünün sayısal modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. UYGULAMADA KULLANILAN KÖPRÜNÜN SAYISAL MODEL

Söz konusu yöntemin uygulaması için her biri farklı uzunluklarda olan 5 açıklıklı sürekli kiriş bir köprü modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan köprü modelinin toplam uzunluğu 180 metredir. Modelin dinamik analizi için gerekli olan kütle, rijitlik ve sönüm matrislerini elde edebilmek için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bunun için köprü uzunluğu 36 e parçaya bölünmüş olup her elemanın her bir ucuna düey deplasman serbestlik derecesi ve dönme serbestlik derecesi olmak üzere 2 serbestlik derecesi tanımlanmıştır. Toplamda 37 düey deplasman ve 37 dönme serbestlik derecesi olmak üzere toplam 74 serbestlik dereceli bir sistem oluşturulmuştur. ekil 1’de oluşturulan köprü modeli mesnet koşulları ve serbestlik dereceleri ile birlikte sunulmuştur. Enkesitin eğerde ilme yönündeki atalet momenti 0.0731 m^4 olarak hesaba katılmıştır. Köprü kesiti belirlenirken orta açıklıkta statik yükler altında maksimum 6 cm düey deplasman olması amaçlanmıştır.

ekil 1 Uygulamada kullanılan sonlu elemanlar köprü modeli.

Modeli kurulan köprünün MATLAB programında sonlu elemanlar analizi yapılmış olup dinamik analizde gerekli olan kütle, rijitlik ve sönüm matrisi sayısal olarak bulunmuştur. Burada tüm modların %2 sönüm oranına sahip olduğu varsayılmıştır.

3. GENEL B LG , ANAL ZDE ZLEN LEN YÖNTEM VE S MÜLASYONU

3.1. Genel Bilgi ve Analizde Zelenilen Yöntem

Köprü gibi oldukça büyük inaat yapılarından sistem tanımlama sürecinde gerekli olan titreşim davranışı ölçümlerini alabilmek için verilmesi gereken uyarımlar çok büyüktür. Bu tip yapılara kontrollü olarak uyarım vermek bir hayli zordur. Ayrıca hizmet vermekte olan köprü gibi yapıların bu denli büyük uyarımlar amacıyla kullanıma kapatılmaları eğerde hayati aksatacak, olumsuz sonuçlar doğuracaktır. Bu sebeplerden dolayı bu gibi yapılara sistem tanımlama için büyük uyarımlar vermektense rüzgar, trafik veya deprem gibi çevresel uyarımlar sonucu oluşan ortamsal titreşim davranışlarının kullanılması daha uygundur. Fakat bu durumda sistemi uyaran kuvvetler çevresel olduğu için veri toplama sistemleri tarafından ölçülemezler. Bu nedenle köprü gibi büyük yapıların sistem tanımlama sürecinde sadece-çıkı (sadece sistem tepkisinin ölçüldüğü) yöntemlerinin kullanılması daha uygun olacaktır (Gündoğdu, 2012).

Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada sadece-çıkartı sistem tanımlama yöntemlerinden biri olan NEX-T-ERA yöntemi kullanılmıdır. Yöntem, NEX-T ve ERA olarak iki kısımdan oluşmaktadır. NEX-T kısmında, ortamsal titreşimlerle uyarılan sistemin verdiği tepki ölçümleri arasındaki çapraz güç spektral fonksiyonları kullanılarak sistemin serbest titreşim davranımı ile elde edilen bir tepki elde edilir. Sistemden alınan ölçümler kullanılarak NEX-T yöntemi sonucunda elde edilen çapraz korelasyon fonksiyonları sistemin serbest titreşim tepkisine deildir (James III ve diğeri, 1993). ERA kısmında ise sistemin Markov parametreleriyle oluşturulan Hankel matrisinin tekil değeri ayrı ayrı yapılarak modal parametreleri tayin edilir (Juang ve Pappa, 1985). Buradaki Markov parametreleri sistemin zaman tanım alanındaki serbest titreşim verilerinden oluşur. Bu çalışmada, NEX-T kısmında elde edilen serbest titreşim verileri kullanılarak sistemin durum-uzay dinamik modeli oluşturulur. Oluşturulan modelin özdeğer analiz çözümü yapılarak sistemin modal parametreleri tahmin edilebilmektedir (Caicedo, 2001; Nayeri ve diğeri, 2009).

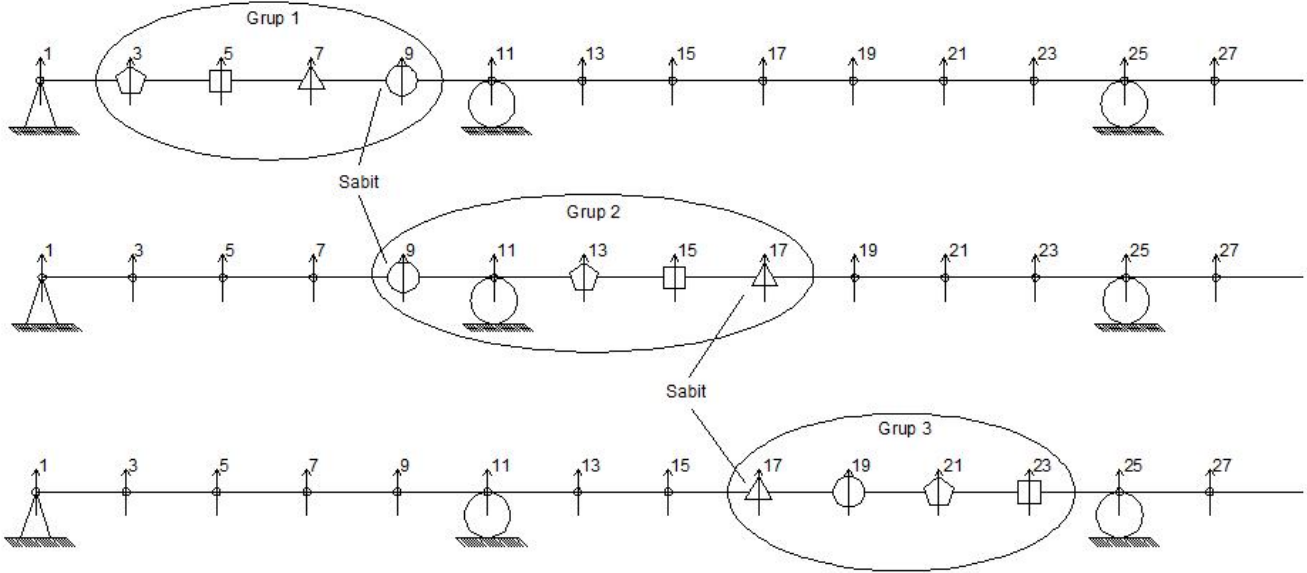
Yöntemin NEX-T kısmında, toplanan ölçümler arasındaki çapraz korelasyon değerlerinin bulunabilmesi için ölçüm kanallarından bir tanesi referans kanalı olarak seçilmekte olup diğer ölçümlerin bu referans ölçümüne göre korelasyonları bulunmaktadır. Korelasyon değerlerinin anlamlı sonuç verip sistemin serbest titreşim verisinin bulunabilmesi için sistemden eş zamanlı alınan ölçümlerin kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada az sayıda algılayıcı kullanılarak gruplar halinde ölçüm yapılması amaçlanmıştır. Gruplar halinde yapılan ölçümlerin NEX-T-ERA yöntemi içerisinde kullanılabilmesi için grup halindeki ölçümlerin eş zamanlı tek bir ölçüm haline dönüştürülmesi gerekir. Dönüşümün nasıl yapıldığı simülasyon alt başlığında ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

3.2. Simülasyon

Söz konusu yöntem, kurulan köprü modeli üzerinde sayısal olarak benzetilmiştir. Köprü modelinde her bir düzeydeplasman serbestlik derecesine algılayıcı yerleştirilmiştir ve varsayılmış olup 4 adet algılayıcı kullanılarak köprü'nün tüm düzeydeplasman serbestlik derecelerinin eş zamanlı ölçümünün yapılabilmesi amaçlanmıştır. Bunu yaparken algılayıcılar gruplar halinde sırayla birbirine komşu serbestlik derecelerine yerleştirilmiştir. Grupların kaydırma işlemlerinde her defasında bir algılayıcının yeri değiştirilmeyip analiz sırasında referans sinyali olarak kullanılmıştır. Algılayıcıların köprü üzerindeki gruplar halinde yerleşimi ekil 2'de gösterilmiştir. Köprü'nün analizi için gereken tüm düzeydeplasman serbestlik dereceleri için toplam 10 grup halinde ölçüm alınması gerekmektedir. Ekilde ilk 3 grubun yerleşimi gösterilmekte olup görüldüğü üzere her defasında grubun en sağındaki algılayıcı sabit bırakılmış, iki ardışık grup arasında referans sinyali oluşturulmuştur. Buna göre ekildeki grup 1 ve grup 2 arasındaki referans sinyali daire eklindeki algılayıcı ile, grup 2 ve grup 3 arasındaki referans sinyali üçgen eklindeki algılayıcı ile sağlanmıştır. Diğer gruplar da aynı mantıkla yerleştirilmiştir. Her bir algılayıcı grubu ile farklı zaman aralıklarında çevresel uyarımlardan kaynaklanan titreşimler ölçülmüştür.

Farklı çevresel uyarımları simüle edebilmek için MATLAB programı ile her bir grupta kullanılmak üzere 10 ayrı beyaz gürültü sinyali oluşturulmuştur. Köprü gibi yapılar düşük frekanslı sistemler oldukları için NEX-T-ERA yöntemi kullanılarak düşük frekansların tanımlanması ancak uzun süreli ölçümler sonucunda yapılabilmektedir (Caicedo, 2013). Bu nedenle oluşturulan beyaz gürültü sinyalleri 30 dakika boyunca örnekleme frekansı 200 Hz olacak şekilde ayarlanmıştır. Sisteme verilen uyarımları farklılaştırmak adına oluşturulan beyaz gürültü sinyalleri üzerine aynı uzunlukta ve aynı örnekleme frekansına sahip ve genlikleri küçültülmüş olan 10 ayrı deprem verisi eklenmiştir. Grup ölçümlerinin alınabilmesi için gerekli olan uyarım sinyalleri hazır olduktan sonra her bir uyarım sinyali sisteme verilmiş olup Newmark-Beta metodu kullanılarak sistemin 10 ayrı uyarım karışımındaki tepkisi elde edilmiştir. Analiz için ivme ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Gerçek hayattaki uygulamaları simüle etmek adına serbestlik derecelerinden elde edilen her bir ivme tepkisine, kendisinin karekök ortalamasının (RMS) %70'i olacak şekilde beyaz gürültü eklenmiştir. Uygulanan yöntemin doğrulanması için analizler sırasında önce gürültüsüz ivme kayıtları kullanılıp modelin modal parametreleri tahmin edilmiştir. Daha sonra

gürültülü kayıtlar kullanılıp elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. 10 farklı simülasyondan elde edilen ölçüm sonuçları ekil 2'deki konfigürasyonda gösterildiği gibi 10 grup halinde kaydedilmiştir.



ekil 2 Algılayıcıların köprü modeli üzerinde gruplar halinde yerleşimi.

Grup ölçümlerinin NEX-T-ERA metodu ile kullanılabilmesi için elde edilen tek bir ölçüm sinyaline dönüştürülmesi gerekmektedir. Bahsedildiği üzere her bir grup kaydırma işleminde bir algılayıcının yeri sabit bırakılıp referans sinyali olarak kullanılmıştır. Böylece referans olarak kullanılan algılayıcı için iki farklı zaman aralığında olan iki farklı ölçüm olmuştur. Bu iki ölçüm arasındaki transfer fonksiyonu kullanılarak grupların birbirlerine dönüştürümlü yapılabilmektedir. Zaman tanımında alınan grup ölçümlerinin transfer fonksiyonlarını elde edebilmek amacıyla tüm ölçümlere Hızlı Fourier Dönüştürümü (FFT) uygulanmış olup frekans tanım alanındaki karışıklık bulunmuştur. Amaç, tüm grup ölçümlerinin 1. simülasyon zamanındaki ölçüm elde edilebilirliğini tahmin edebilmektir. Bu nedenle, yapılan dönüştürme işlemi sonucunda oluşturulan sinyallerin 1. simülasyon ölçümleriyle eş zamanlı ölçümler gibi olmaları beklenmektedir.

Grup ölçümleri üzerinde yapılacak olan dönüştürme formüle edilecek olursa ekil 2'deki konfigürasyona göre, 1. grup ölçümlerinin 3., 5., 7. ve 9. düzeydeplasman serbestlik derecesindeki FFT'leri $u_3^1(\check{S})$, $u_5^1(\check{S})$, $u_7^1(\check{S})$ ve $u_9^1(\check{S})$; 2. grup ölçümlerinin 9., 13., 15. ve 17. düzeydeplasman serbestlik derecesindeki FFT'leri $u_9^2(\check{S})$, $u_{13}^2(\check{S})$, $u_{15}^2(\check{S})$ ve $u_{17}^2(\check{S})$ olmak üzere dönüştürme işlemi, denklem (1)'de ifade edilmiştir. ekilde bir dönüştürme katsayısı kullanılarak sağlanmıştır.

$$r_{21}(\check{S}) = \frac{u_9^1(\check{S})}{u_9^2(\check{S})} \quad (1)$$

Denklemden u ile ifade edilen ölçüm sonuçlarında alt indeks ölçümün ait olduğu düzeye serbestlik derecesini, üst indeks ölçümün ait olduğu grup numarasını göstermektedir. $r_{21}(\check{S})$, 2. grup ölçümlerinin 1. grup ölçümlerine elde edilen dönüştürme katsayısıdır.

$$u_{13}^1(\check{S}) = r_{21}(\check{S}) \cdot u_{13}^2(\check{S}) \quad (2)$$

$$u_{15}^1(\check{S}) = r_{21}(\check{S}) \cdot u_{15}^2(\check{S}) \quad (3)$$

$$u_{17}^1(\check{S}) = r_{21}(\check{S}) \cdot u_{17}^2(\check{S}) \quad (4)$$

Daha sonra 2. grup içinde kalan diğer tüm ölçümler $r_{21}(w)$ dönüşüm katsayısıyla çarpılarak 2. grup ölçümlerinin 1. grup ile elde edilen ölçümleri elde edilmiştir. Denklem (2), (3) ve (4)'te 2. grup ölçümlerinin 1. gruba dönüştürme işlemi gösterilmektedir. Denklemlere göre $u_{13}^1(\check{S})$, $u_{15}^1(\check{S})$ ve $u_{17}^1(\check{S})$ 2. grup ölçümlerinin 1. gruba dönüştürülmüştür.

$$r_{31}(\check{S}) = \frac{u_{17}^2(\check{S})}{u_{17}^3(\check{S})} \cdot r_{21}(\check{S}) \quad (5)$$

Aynı şekilde denklem (5)'te 3. grup ölçümlerinin 1. grup ölçümlerine dönüştürülebilmesi için $r_{31}(\check{S})$ dönüşüm katsayısı hesaplanmıştır. Dönüşüm yapılırken denklemde görüldüğü üzere önce 3. grup ölçümleri 2. grup ölçümlerinin elde edilmesine çevrilip daha sonra 2. gruba dönüştürülmesi için $r_{21}(\check{S})$ katsayısı ile çarpılarak 1. gruba dönüştürülmüştür.

$$u_{19}^1(\check{S}) = r_{31}(\check{S}) \cdot u_{19}^3(\check{S}) \quad (6)$$

$$u_{21}^1(\check{S}) = r_{31}(\check{S}) \cdot u_{21}^3(\check{S}) \quad (7)$$

$$u_{23}^1(\check{S}) = r_{31}(\check{S}) \cdot u_{23}^3(\check{S}) \quad (8)$$

Denklem (6), (7) ve (8)'de 3. grup ölçümlerinin 1. gruba dönüştürme işlemi gösterilmektedir. 3. grup içindeki tüm ölçümler $r_{31}(\check{S})$ dönüşüm katsayısıyla çarpılarak 3. grup ölçümlerinin 1. grup ile elde edilen ölçümleri elde edilmiştir. Denklemlere göre $u_{19}^1(\check{S})$, $u_{21}^1(\check{S})$ ve $u_{23}^1(\check{S})$ 3. grup ölçümlerinin 1. gruba dönüştürülmüştür.

Kalan diğer tüm grupların yukarıda anlatılan mantıkla 1. gruba dönüştürme işlemi yapılmıştır. Dönüşüm esnasında kullanılan ölçüm sonuçları frekans tanım alanındadır. Veri toplama sistemleri ile toplanan veriler zaman tanım alanında olduğu için dönüşülen ölçüm sonuçları üzerinde Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (IFFT) uygulanarak ölçümlerin zaman tanım alanındaki karılıkları bulunmuştur. Böylece ölçümler NExT-ERA yönteminde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Fakat zaman tanım alanına dönüştürme işleminin sadece gürültüsüz ivme ölçümleri kullanıldığında olumlu sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle gürültülü ivme ölçümleri kullanılırken elde edilen diğer ölçümler frekans tanım alanından zaman tanım alanına dönüştürülmemiştir, frekans tanım alanındaki sonuçlardan NExT-ERA metodunda kullanılmıştır.

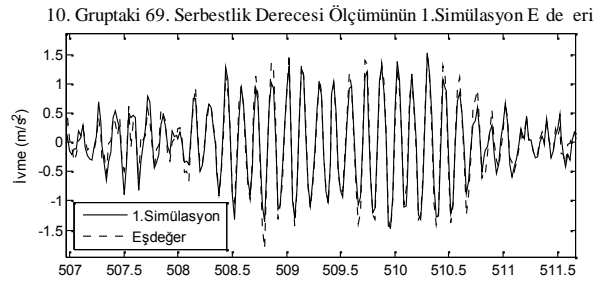
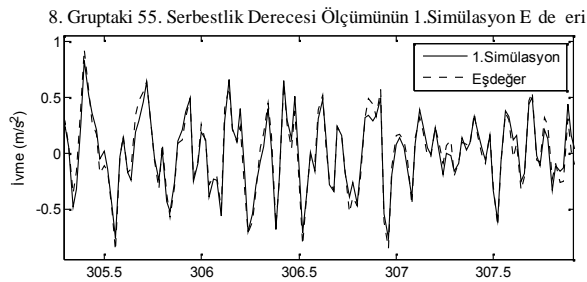
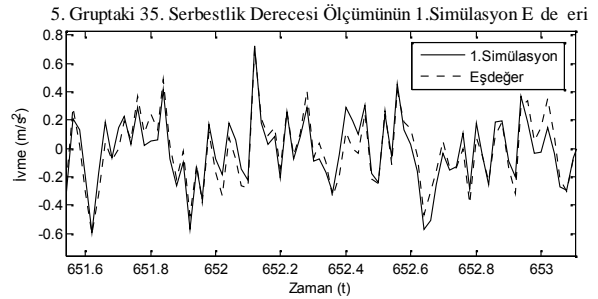
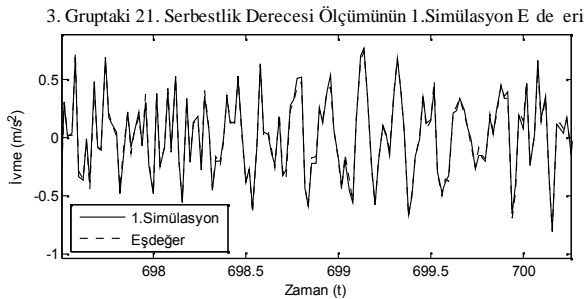
Bu çalışmada, veri toplama hızının 200 Hz olduğu kabul edilmiş olup simülasyonda oluşturulan ivme ölçümlerinin örnekleme frekansları da 200 Hz'dir. Sistemin, frekansları düşük olan ilk modlarını daha doğru bir şekilde belirleyebilmek amacıyla oluşturulan ivme tepkilerinin örnekleme frekansı MATLAB programında yapılan simülasyon esnasında yeniden örneklenip 4'te 1'ine yani 50 Hz'e düşürülmüştür. Böylece hem analizde kullanılacak olan veri sayısı azaltılmış hem de düşük frekanslara odaklanıp daha doğru bir şekilde tanımlanması sağlanmıştır. Sistem tanımlama için kullanılacak olan NExT-ERA yönteminde Nyquist frekansı teoremine göre örnekleme frekansının yarısına kadar olan frekanslar tanımlanabilmektedir. Yeni örnekleme frekansı 50 Hz olduğu için

için teorik olarak Nyquist frekansı olan 25 Hz'e kadar olan modların tanımlanabilmesi gerekir. Bu çalışmada köprünün ilk 10 modunun tanımlanabilmesi amaçlanmıştır. Sayısal modele göre köprünün 10. mod frekansı 23.58 Hz'dir. Bu nedenle simülasyonun Nyquist frekansı olan 25 Hz, 10. mod frekansını kapsayacak şekilde seçilip ilk 10 modun da bu şekilde tanımlanabilmesi amaçlanmıştır.

Ölçümlerin gerekli parametreleri oluşturulduktan sonra sözü edilen gruplama yöntemi uygulanmıştır. Gürültüsüz ivme kayıtlarıyla ve gürültülü ivme kayıtlarıyla ayrı ayrı elde edilen ve elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak NExT-ERA metoduyla sistem tanımlama yapılmıştır, oluşturulan köprü modelinin modal parametreleri tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bulgular ve sonuçlar kısmında açıklanmaktadır.

4. BULGULAR VE SONUÇLAR

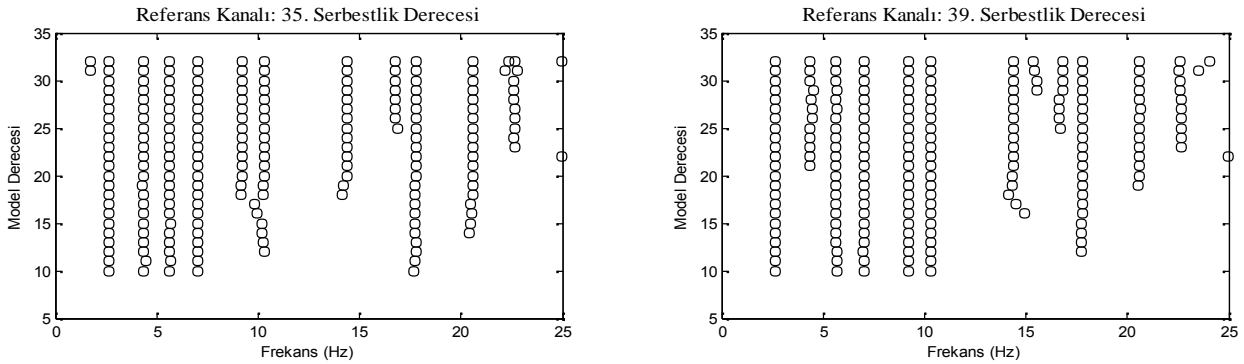
Bu çalışmada, az sayıda algılayıcı ile gruplar halinde ölçümler kullanılarak köprü gibi büyük inşaat yapılarının modal analizinin yapılabilmesi amaçlanmıştır. Gruplar halinde tüm ölçüm sonuçları simülasyon ortamında anlatıldı. Örneğin 1. grup simülasyonu ölçüm sonuçlarına dönüştürülmüştür. Bu nedenle, yapılan dönüşüm işlemi sonucunda oluşturulan frekans tanım alanındaki sinyallerin IFFT işleminden sonra 1. simülasyon ölçümleriyle elde edilmiş ve örtülmüş beklenmiştir. Fakat, gürültüsüz ve gürültülü ivme ölçümleri kullanıldığında elde edilen sonuçlar incelendiğinde bu örtülmenin sadece gürültüsüz ivme ölçümleri kullanıldığında gerçekleştiği görülmüştür. Gürültülü ivme ölçüm sonuçları kullanılarak köprü modelinin özdeğer analizi sonucunda elde edilen modal parametrelerine yakın değerler elde edilememiştir. Bu nedenle bu kısımda gürültüsüz ivme ölçümleriyle yapılan analiz sonuçları sunulmuştur. Ekil 3'te gürültüsüz ivme ölçümleriyle yapılan analizlerdeki farklı grupların döner serbestlik derecelerinden alınan 1. simülasyon ölçüm sonuçlarıyla dönüşüm ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Grafikleri verilen serbestlik dereceleri ve daha ayrıntılı bir görünüm yakalamak amacıyla gösterilen zaman aralıkları rastgele seçilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere uygulanan dönüşüm yöntemi sonucunda elde edilen ölçümler 1. simülasyon sonucunda tayin edilen ölçümlerle neredeyse birebir uyum sağlamaktadır. Bu sonuç, uygulanan dönüşüm yöntemini doğrulamaktadır.



ekil 3 Farklı grup ölçümlerinin 1. Simülasyon Elde Edilmesiyle Karşılaştırılması.

Dönü türümlü ölçüm de erleri do rulandıktan sonra olu turulan sayısal modelin özde er analizi yapılarak köprünün titre im frekansları, sönüm oranları ve mod ekilleri tayin edilmi tir. Bu durumda herhangi bir tanılama i lemi kullanılmadı ı için bulunan de erlerin köprünün gerçek modal parametreleri oldu u dü ünülmü tür.

Daha sonra dönü türümlü ölçümler NEX-T-ERA yönteminde kullanılarak köprünün modal parametreleri tanılanmı tir. Modal parametrelerin tanılanabilmesi için stabilizasyon diagramlarından yararlanılmı tir. Sistemin do ru modlarının (özde er analizi sonucu ile örtü en), her bir dü ey deplasman serbestlik derecesinin referans kanalı olarak alınarak çizilen tüm stabilizasyon diagramlarından elde edilebilmesi beklenmi tir (Mahmood ve di ., 2014). Sistemin model derecesi ve NEX-T kısmında kullanılan referans kanalı de i tirilerek Nyquist frekans aralı nda çizilen stabilizasyon diagramlarından 2 tanesi ekil 4'te gösterilmi tir.



ekil 4 Nyquist Frekans Aralı ndaki Stabilizasyon Diagramları.

Burada referans kanalı olarak hareketin en fazla oldu u köprünün orta açıklı ndaki ölçümler örnek olarak gösterilmi tir ve model derecesi 10'dan 32'ye kadar de i tirilip sonuçlara etkisi incelenmi tir. Grafiklerde de görüldü ü üzere tanılanan mod frekansları farklı referans kanallarında sabit kalıp tutarlılık göstermi tir. Çizilen stabilizasyon diagramlarında tutarlı görülen frekanslar için ilgili mod ekilleri kontrol edilmi tir. Sistemin özde er analizi sonucunda elde edilen mod ekilleri ile uyum sa layan mod ekilleri sistemin gerçek modları olarak do rulanmı tir (Caicedo, 2011). Köprünün sayısal modelinin ilk 10 mod frekansı ve gruplama metoduyla NEX-T-ERA sonucunda çizilen stabilizasyon diagramları analiz edilerek tanılanan ilk 10 mod frekansları ve sönüm oranları kar ıla tırmalı olarak Tablo 1'de verilmi tir.

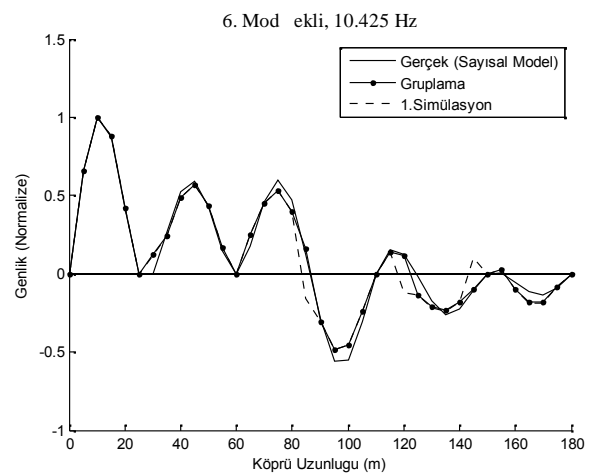
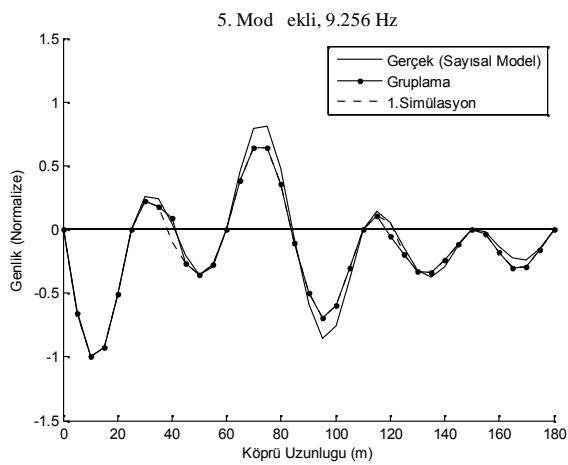
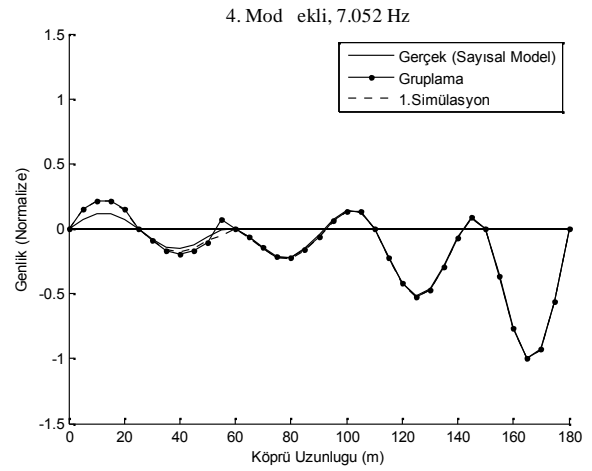
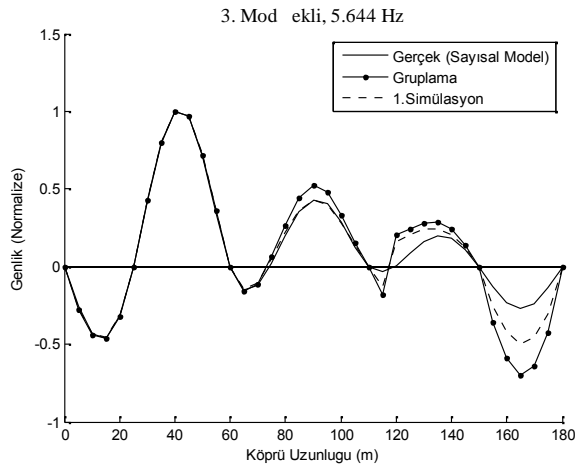
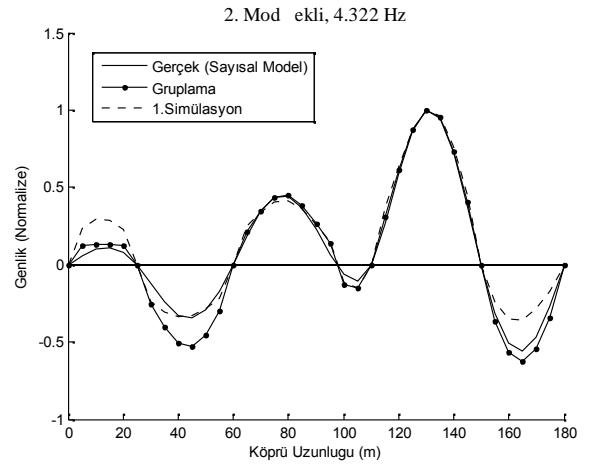
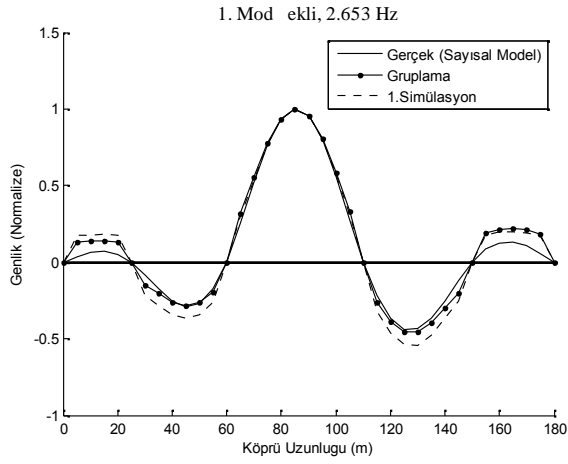
Tablodan görüldü ü üzere frekans tanılama i leminde en yüksek hata payı 10. mod frekansında olup %2.905'tir. Kullanılan yöntem sistem frekanslarını kabul edilebilir sınırlar içerisinde tanılayabilmi tir. Fakat, sönüm oranlarına bakılacak olursa kabul edilebilir de erlerin bulunmasına ra men en yüksek hata payı 1. mod sönüm oranında olup %53.5'tir. Buradan kullanılan yöntemin veya yöntemdeki belirli bir parametrenin sönüm oranı tanılanmasında yetersiz kaldı ı çıkarılabilir.

Tablo 1 Modelin gruplama yöntemiyle tanılanan frekansları ve sönüm oranları

	Gerçek Frekanslar (Hz)	Gruplama ile Tanılan Frekanslar (Hz)	Hata payı (%)	Gerçek Sönüm Oranları (%)	Gruplama ile Tanılan Sönüm Oranları (%)	Hata payı (%)
1.mod	2.654	2.634	0.753	2	3.07	53.5
2.mod	4.322	4.34	0.416		2.41	20.5
3.mod	5.644	5.657	0.230		2.18	9
4.mod	7.052	7.024	0.397		2.62	31
5.mod	9.256	9.193	0.681		1.96	2
6.mod	10.425	10.320	1.000		1.93	3.5
7.mod	14.646	14.403	1.659		2.18	9
8.mod	18.251	17.774	2.614		1.92	4
9.mod	21.375	21.719	1.609		2.66	33
10.mod	23.583	22.898	2.905		2.93	46.5

Kullanılan gruplama yöntemine karşılık e zamanlı ölçüm sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğunu göstermek amacıyla 1. simülasyon ölçüm sonuçları da dudan NExT-ERA metodu ile kullanılarak köprünün modal parametre tanılaması yapılmıştır. 1. simülasyon sonucunda elde edilen mod ekileri, e de er ölçümler sonucunda elde edilen mod ekileri ve sistemin sayısal modelinin özde er analizinden elde edilen mod ekileri karşılaştırılarak doğrulama işlemi yapılmıştır. Köprü modelinin gruplama yöntemi ile tanılanan ilk 6 mod frekansındaki mod ekileri ve 1. simülasyonda elde edilen mod ekileri, gerçek mod ekileri ile karşılaştırılarak karşılaştırılmıştır.

Ekildeki grafiklerde görüldüğü üzere kullanılan gruplama yöntemi ile bulunan mod ekileri, gruplama yapılmadan tanılanan mod ekileriyle ve sistemin gerçek mod ekileriyle kabul edilebilir bir uyum sağlamaktadır. Bu da gruplar halinde alınan ölçümlerin birbiriyle e de er ölçümler haline dönüştürüldükten sonra köprü gibi yapıların modal parametrelerinin tahmininde kullanılabilirliği sonucunu vermektedir. Fakat, gürültülü ivme ölçümleri kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının modelin özde er analizinden elde edilen modal parametreleriyle örtümediği gözlenmiştir. Yöntemin gerçek hayatta uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla gürültülü ivme ölçüm kayıtları kullanılarak sözü edilen metodun nasıl uygulanması gerektiğine dair çalışmalar devam etmektedir. Diğer yandan gürültüsüz ivme ölçümleri kullanılarak elde edilen sonuçlardan bazıları - özellikle sönüm oranları- tatmin edici olmayıp çıkan sonuçların daha da iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yürütülmektedir.



ekil 5 Köprü Modelinin İlk Altı Mod ekli.

KAYNAKLAR

- Basten, T.G.H. and Schiphorst, F.B.A. (2012) “*Structural Health Monitoring with a Wireless Vibration Sensor Network.*”, Proceedings of ISMA2012-USD2012, 3273-3284.
- Beyen, K., Kutanis, M., Tanöz, H. Ö., Ba kan, D. (2011) “*Yapı Sa lı ı zleme ve Yapı Tanı Çalı maları için Akıllı Aktarma Protokollü Kablosuz Sensör A ı.*”, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisli i Konferansı, 30 Mayıs-3 Haziran, 2011, stanbul.
- Caicedo, J.M. (2001), “*Two Structural Health Monitoring Strategies Based on Global Acceleration Responses: Development, Implementation and Verification.*”, Yüksek Lisans Tezi, Washington University, St. Louis, Missouri.
- Caicedo, J.M. (2003), “*Structural Health Monitoring of Flexible Civil Structures.*”, Doktora Tezi, Washington University, St. Louis, Missouri.
- Caicedo, J.M. (2011), “*Practical guidelines for the natural excitation technique (NExT) and the eigensystem realization algorithm (ERA) for modal identification using ambient vibration.*”, Experimental Techniques, 35(4), 52-58.
- Gündo an, M. (2012) “*Çelik Model Köprüünün Yapı Sa lı ının Gözlenmesi.*”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, zmir.
- James, G.H., Carne, T.G. and Lauffer, J.P. (1993) “*The natural excitation technique (NexT) for modal parameter extraction from operating wind turbines.*” Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM and Livermore, CA, SAND92-1666.
- Juang, J.N. and Pappa, R.S. “*An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction.*”, Journal of Guidance 8:620-627(1985)
- Mahmood, S. M. F., Haritos N., Gad E. and Zhang L. (2014) “*A Multi-referenced-based Mode Selection Approach for the Implementation of NExT-ERA in Modal-based Damage Detection.*”, John Wiley and Sons, New York.
- MATLAB (2012), *Version R2012b 8.0.0.78*, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Nayeri, R.D, Tasbihgo, F., Wahbeh, M., Caffrey, J.P., Masri, S.F., Conte, J.P. and Elgamal, A. (2009), “*Study of time-domain techniques for modal parameter identification of a long suspension bridge with dense sensor arrays*”, Journal of Engineering Mechanics, Asce, 135(7), 669-683.