

SÜREKLİ KİRİŞ BİR KÖPRÜNÜN GRUPLAR HALİNDEKİ DAVRANIŞ ÖLÇÜMLERİNDEN MODAL PARAMETRELERİNİN TAYİNİ

¹Hasan CEYLAN, ²Gürsoy TURAN

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, İYTE, Urla / İzmir
Tel: +90(232) 750 66 08 E-mail: hasanceylan@iyte.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, İYTE, Urla / İzmir
Tel: +90(232) 750 68 04 E-mail: 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 iletişimle ise sorunlu olmaktadır. Bu çalışmada, az sayıda algılayıcı ile grup halinde birbirine yakın ölçümler kullanılmıştır. Grupların kaydırma işlemi ile bütün köprünün eşdeğer ölçümü yapılabilmektedir. Algılayıcılar kaydırılırken her defasında bir algılayıcının yeri değiştirilmeyip referans sinyali olarak kullanılmıştır. Grup halindeki ölçümler eşdeğer 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 özsistem realizasyonu 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.

Giriş

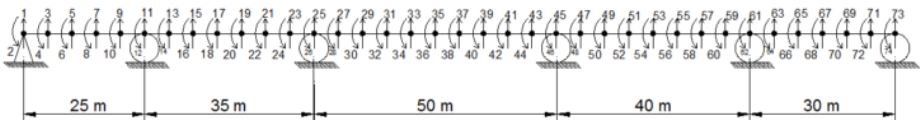
Köprü gibi büyük inşaat yapılarının modal analizi için gerekli ölçümlerin temini bir hayli zordur. Köprüler uzun yapılar oldukları için, ölçüm sinyallerinin toplanabilmesi ya algılayıcılardan gelen sinyalleri veri toplama sistemine taşıyan uzun kablolar ile, ya da kablosuz iletişimle mümkün olmaktadır. Kablolulu iletişimle yapılan ölçümlerde kabloların çok uzun olması ölçüm verilerinde gürültü artışını 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 ağ 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 kurulumu 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 bağlanan algılayıcı sayısı ile orantılı olarak azalacağı için toplanan verilerin örnekleme frekansı kanal sayısına göre değişiklik gösterecektir (Beyen ve diğ., 2011). Bundan dolayı modal analizi yapılacak olan sistemlerin yüksek modlarının tanınmasını güçleştirecektir.

Yukarıda belirtilen sorunlar ölçüm esnasında çok sayıda algılayıcı kullanılmaktan kaynaklanmakta olup az sayıda algılayıcı kullanımı bu tür sorunlara çözüm getirebilmektedir. Bu çalışmada, az sayıda algılayıcı ile gruplar halinde birbirine yakın ölçümler toplanarak inşaat mühendisliği yapılarının modal analizinin yapılıp yapılamayacağı araştırılmıştır. Araştırmayı uygulamaya koymak amacıyla sayısal olarak sürekli giriş bir köprü modeli oluşturulmuştur. Algılayıcılar köprü modeli üzerinde gruplar halinde kaydırılarak farklı zaman aralıklarında grup ölçümleri elde edilmiştir. Bu ölçümler kullanılarak köprü'nün eşdeğer tek bir ölçümünün elde edilmesi amaçlanmıştır. Köprü'nün analizinde kullanılacak olan bütün sinyaller toplanıp grup halindeki ölçümleri eşdeğer tek bir ölçüm haline getirmek üzere grup ölçümleri arasındaki transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Köprü'nün eşdeğer ölçümü elde edildikten sonra sistem parametrelerinin tanınması için kullanılan sadece-çıkı yöntemlerinden olan NExT metodu düzenlenmiş ve ardından ERA metodu kullanılarak modal parametreler tayin edilmiştir. Köprü'nün sayısal modeli MATLAB (2012) programı kullanılarak simüle edilmiştir. NExT-ERA sistem tanımlama yöntemi ile bulunan sonuçlar köprü'nün sayısal modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Uygulamada Kullanılan Köprü'nün Sayısal Modeli

Sözü edilen yöntemin uygulaması için her biri farklı uzunluklarda olan 5 açıklıklı sürekli giriş 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 eş parçaya bölünmüş olup her elemanın her bir ucuna düşey deplasman serbestlik derecesi ve dönme serbestlik derecesi olmak üzere 2 serbestlik derecesi tanımlanmıştır. Toplamda 37 düşey deplasman ve 37 dönme serbestlik derecesi olmak üzere toplam 74 serbestlik dereceli bir sistem oluşturulmuştur. Şekil 1'de oluşturulan köprü modeli mesnet koşulları ve serbestlik dereceleri ile birlikte sunulmuştur. Enkesitin eğilme yönündeki atalet momenti 0.0731 m^4 olarak hesaba katılmıştır. Köprü kesiti belirlenirken orta açıklıkta statik yükler altında maksimum 6 cm düşey deplasman olması amaçlanmıştır.



Şekil 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.

Genel Bilgi, Analizde İzlenen Metod ve Simülasyonu

Genel Bilgi ve Analizde İzlenen Metod

Köprü gibi oldukça büyük inşaat yapılarından sistem tanılama 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 şehir hayatını aksatacak, olumsuz sonuçlar doğuracaktır. Bu sebeplerden dolayı bu gibi yapılara sistem tanılama için büyük uyarımlar vermektense bu tip yapıların modal analizinde 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 tanılama sürecinde sadece-çıkı (sadece sistem tepkisinin ölçüldüğü) yöntemlerinin kullanılması daha uygun olacaktır (Gündoğan, 2012).

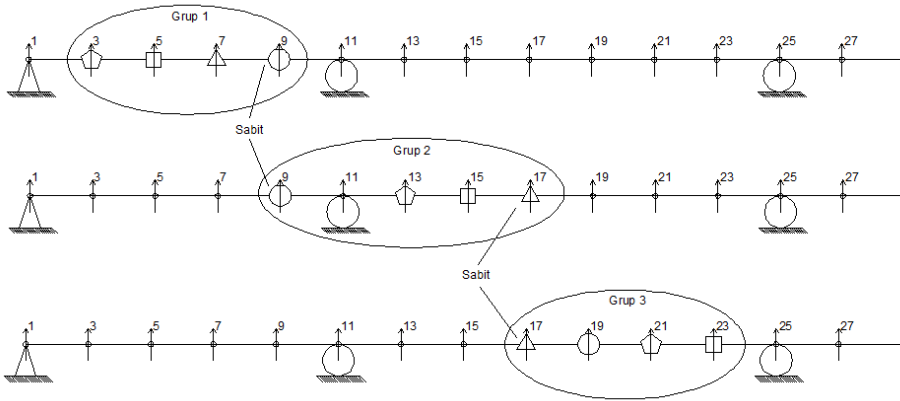
Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada sadece-çıkı sistem tanılama yöntemlerinden biri olan NExT-ERA yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, NExT ve ERA olarak iki kısımdan oluşmaktadır. NExT kısmında, ortamsal titreşimlerle uyarılan sistemin verdiği tepki ölçümleri arasındaki çapraz güç spektral fonksiyonları kullanılarak sistemin serbest titreşim davranışı ile eşdeğer bir tepki elde edilir. Sistemden alınan ölçüm değerleri kullanılarak NExT yöntemi sonucunda elde edilen çapraz korelasyon fonksiyonları sistemin serbest titreşim tepkisine eşdeğerdir (James III ve diğ., 1993). ERA kısmında ise sistemin Markov parametreleriyle oluşturulmuş Hankel matrisinin tekil değer ayrıştırması yapılar modal parametreleri tayin edilir (Juang ve Pappa, 1985). Buradaki Markov parametreleri sistemin zaman tanım aralığındaki serbest titreşim verilerinden oluşur. Bu aşamada, NExT kısmında elde edilen serbest titreşim verileri kullanılarak sistemin durum-uzay dinamik modeli oluşturulur. Oluşturulan modelin özdeğer analiz çözümü yapılar modal parametreleri tahmin edilebilmektedir (Caicedo, 2001; Nayeri ve diğ., 2009).

Yöntemin NExT 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 NExT-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.

Simülasyon

Sözü edilen yöntem, kurulan köprü modeli üzerinde sayısal olarak simüle edilmiştir. Köprü modelinde her bir düşey deplasman serbestlik derecesine algılayıcı yerleştirileceği varsayılmış olup 4 adet algılayıcı kullanılarak köprünün tüm düşey deplasman 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 yerleşim şeması Şekil 'de gösterilmiştir. Köprünün analizi için gereken tüm düşey deplasman serbestlik dereceleri için toplam 10 grup halinde ölçüm alınması gerekmektedir. Şekilde 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 şekildeki grup 1 ve grup 2 arasındaki referans sinyali daire şeklindeki algılayıcı ile, grup 2 ve grup 3 arasındaki referans sinyali üçgen şeklindeki algılayıcı ile sağlanmıştır. Diğer gruplar da aynı mantıkla yerleştirilmiştir. Her bir algılayıcı grubu ile farklı zaman aralıklarında çevresel uyarılardan kaynaklanan titreşimler ölçülmüştür.



Şekil 2 Algılayıcıların köprü modeli üzerinde gruplar halinde yerleşimi.

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 NExT-ERA yöntemi kullanılarak düşük frekansların tanınması 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 karşısındaki tepkisi elde edilmiştir. Analiz için ivme ölçüm sonuçları kullanılmıştır. 10 farklı simülasyondan elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 'teki konfigürasyonda gösterildiği gibi 10 grup halinde kaydedilmiştir.

Grup ölçümlerinin NEXt-ERA metodu ile kullanılabilmesi için eşdeğer 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 oluşmuştur. Bu iki ölçüm arasındaki transfer fonksiyonu kullanılarak grupların birbirlerine dönüşümü yapılabilmektedir. Zaman tanımında alınan grup ölçümlerinin transfer fonksiyonlarını elde edebilmek amacıyla tüm ölçümlere Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanmış olup frekans tanım aralığındaki karşılıklı bulunmuştur. Amaç, tüm grup ölçümlerinin 1. simülasyon zamanındaki ölçüm eşdeğerlerini tahmin edebilmektir. Bu nedenle, yapılan dönüşüm işlemi sonucunda oluşturulan sinyallerin 1. simülasyon ölçümleriyle eş zamanlı ölçülmüş gibi olmaları beklenmektedir.

Grup ölçümleri üzerinde yapılacak olan dönüşümler formüle edilecek olursa Şekil 'teki konfigürasyona göre, 1. grup ölçümlerinin 3., 5., 7. ve 9. düşey deplasman serbestik derecesindeki FFT'leri $u_3^1(w)$, $u_5^1(w)$, $u_7^1(w)$ ve $u_9^1(w)$; 2. grup ölçümlerinin 9., 13., 15. ve 17. düşey deplasman serbestik derecesindeki FFT'leri $u_9^2(w)$, $u_{13}^2(w)$, $u_{15}^2(w)$ ve $u_{17}^2(w)$ olmak üzere dönüşüm işlemi, denklem (1)'de ifade edildiği şekilde bir dönüşüm katsayısı kullanılarak sağlanmıştır.

$$\alpha_{21}(w) = \frac{u_9^1(w)}{u_9^2(w)} \quad (1)$$

Denklemden u ile ifade edilen ölçüm sonuçlarında alt indeks ölçümün ait olduğu düşey serbestik derecesini, üst indeks ölçümün ait olduğu grup numarasını göstermektedir. $\alpha_{21}(w)$, 2. grup ölçümlerinin 1. grup ölçümlerine eşdeğer dönüşüm katsayısıdır.

$$u_{13}^1(w) = \alpha_{21}(w) \bullet u_{13}^2(w) \quad (2)$$

$$u_{15}^1(w) = \alpha_{21}(w) \bullet u_{15}^2(w) \quad (3)$$

$$u_{17}^1(w) = \alpha_{21}(w) \bullet u_{17}^2(w) \quad (4)$$

Daha sonra 2. grup içinde kalan diğer tüm ölçümler $\alpha_{21}(w)$ dönüşüm katsayısıyla çarpılarak 2. grup ölçümlerinin 1. grup ile eşdeğer ölçümleri elde edilmiştir. Denklem (2), (3) ve (4)'te 2. grup ölçümlerinin 1. grup eşdeğerine dönüştürme işlemi gösterilmektedir. Denklemlere göre $u_{13}^1(w)$, $u_{15}^1(w)$ ve $u_{17}^1(w)$ 2. grup ölçümlerinin 1. grup eşdeğer ölçümüne dönüştürülmüş halidir.

$$\alpha_{31}(w) = \frac{u_{17}^2(w)}{u_{17}^3(w)} \bullet \alpha_{21}(w) \quad (5)$$

Aynı şekilde denklem (5)'te 3. grup ölçümlerinin 1. grup ölçümlerine dönüştürülebilmesi için $\alpha_{31}(w)$ dönüşüm katsayısı hesaplanmıştır. Dönüşüm yapılırken denklemde görüldüğü üzere önce 3. grup ölçümleri 2. grup ölçümlerinin eşdeğerine çevrilip daha sonra 2. grup eşdeğerleri $\alpha_{21}(w)$ katsayısı ile çarpılarak 1. grup eşdeğer ölçümlerine çevrilmiştir.

$$u_{19}^1(w) = \alpha_{31}(w) \bullet u_{19}^3(w) \quad (6)$$

$$u_{21}^1(w) = \alpha_{31}(w) \bullet u_{21}^3(w) \quad (7)$$

$$u_{23}^1(w) = \alpha_{31}(w) \bullet u_{23}^3(w) \quad (8)$$

Denklem (6), (7) ve (8)'de 3. grup ölçümlerinin 1. grup eşdeğerine dönüştürme işlemi gösterilmektedir. 3. grup içindeki tüm ölçümler $\alpha_{31}(w)$ dönüşüm katsayısıyla çarpılarak 3. grup ölçümlerinin 1. grup ile eşdeğer ölçümleri elde edilmiştir. Denklemlere göre $u_{19}^1(w)$, $u_{21}^1(w)$ ve $u_{23}^1(w)$ 3. grup ölçümlerinin 1. grup eşdeğer ölçümüne dönüştürülmüş halidir.

Kalan diğer tüm grupların yukarıda anlatılan mantıkla 1. grup eşdeğer ölçümüne dönüşümleri yapılmıştır. Dönüşüm esnasında kullanılan ölçüm sonuçları frekans tanım aralığındadır. Veri toplama sistemleri ile toplanan veriler zaman tanım aralığında olduğu için dönüştürülen ölçüm sonuçları üzerinde Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (IFFT) uygulanarak ölçümlerin zaman tanım aralığındaki karşılıkları bulunmuştur. Böylece ölçümler NEXt-ERA yönteminde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.

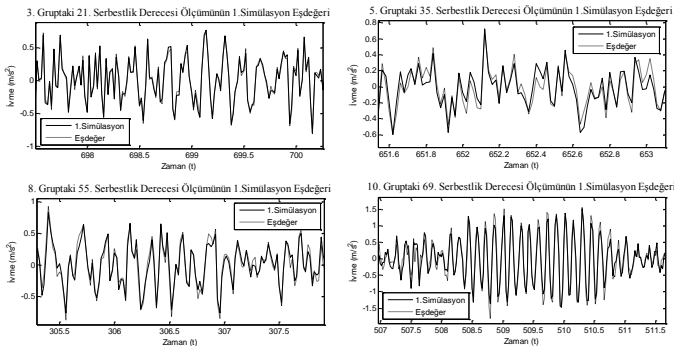
Bu çalışmada, veri toplama hızının 200 Hz olduğu kabul edilmiş olup simülasyonda oluşturulan ivme ölçümlerinin örnekleme frekansları da 200 Hz'dir. Sistemin, frekansları düşük olan ilk

modlarını daha doğru bir şekilde belirleyebilmek amacı ile 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 odaklanılıp daha doğru bir şekilde tanılanmaları sağlanmıştır. Sistem tanılama için kullanılacak olan NEXT-ERA yönteminde Nyquist frekansı teoremine göre örnekleme frekansının yarısına kadar olan frekanslar tanılanabilmektedir. Yeni örnekleme frekansı 50 Hz olduğu için teorik olarak Nyquist frekansı olan 25 Hz'e kadar olan modların tanılanabilmesi gerekir. Bu çalışmada köprü'nün ilk 10 modunun tanılanabilmesi amaçlanmıştır. Sayısal modele göre köprü'nün 10. mod frekansı 23.58 Hz'dir. Bu nedenle simülasyonun Nyquist frekansı olan 25 Hz, 10. mod frekansını kapsayacak şekilde seçilip ilk 10 modun doğru bir şekilde tanılanabilmesi amaçlanmıştır.

Ölçümlerin gerekli parametreleri oluşturulduktan sonra sözü edilen grüplama yöntemi işleme sokulmuştur. Elde edilen eşdeğer ölçüm sonuçları kullanılarak NEXT-ERA metoduyla sistem tanılama yapılmış, oluşturulan köprü modelinin modal parametreleri tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bulgular ve sonuçlar kısmında açıklanmaktadır.

Bulgular ve Sonuçlar

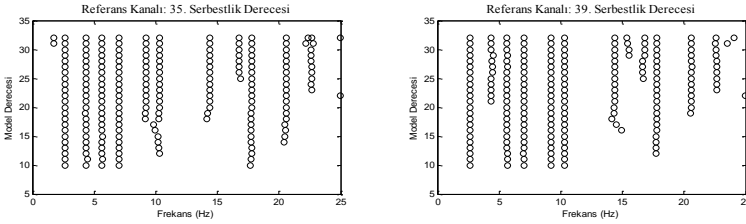
Bu çalışmada, az sayıda algılayıcı ile grüplar halinde ölçümler kullanılarak köprü gibi büyük inşaat yapılarının modal analizinin yapılabilmesi amaçlanmıştır. Grüplar halindeki tüm ölçüm sonuçları simülasyon alt başlığında anlatıldığı üzere 1. grüplama simülasyonu ölçüm eşdeğerlerine dönüştürülmüştür. Bu nedenle, yapılan dönüşüm işlemi sonucunda oluşturulan frekans tanım aralığındaki sinyallerin IFFT işleminden sonra 1. simülasyon ölçümleriyle eşdeğer olması ve örtüşmesi beklenmiştir. Şekil 'te farklı grüpların düşey serbestlik derecelerinden alınan 1. simülasyon ölçüm sonuçlarıyla dönüştürülmüş 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.



Şekil 3 Farklı grüplama ölçümlerinin 1. Simülasyon Eşdeğerleriyle Karşılaştırılması.

Dönüştürülmüş ölçüm değerleri doğrulandıktan sonra oluşturulan sayısal modelin özdeğer analizi yapılarak köprünün titreşim frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri tayin edilmiştir. Bu durumda herhangi bir tanılama işlemi kullanılmadığı için bulunan değerlerin köprünün gerçek modal parametreleri olduğu düşünülmüştür. Daha sonra dönüştürülmüş ölçümler NEXT-ERA yönteminde kullanılarak köprünün modal parametreleri tanılanmıştır. Modal parametrelerin tanılanabilmesi için stabilizasyon diagramlarından yararlanılmıştır. Sistemin doğru modlarının (özdeğer analizi sonucu ile örtüşen), her bir düşey deplasman serbestlik derecesinin referans kanalı olarak alınarak çizilen tüm stabilizasyon diagramlarından elde edilebilmesi beklenmiştir (Mahmood ve diğ., 2014).

Sistemin model derecesi ve NEXT kısmında kullanılan referans kanalı değiştirilerek Nyquist frekans aralığında çizilen stabilizasyon diagramlarından 2 tanesi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4 Nyquist Frekans Aralığındaki Stabilizasyon Diagramları.

Burada referans kanalı olarak hareketin en fazla olduğu köprünün orta açıklığındaki ölçümler örnek olarak gösterilmiştir ve model derecesi 10'dan 32'ye kadar değiştirilip sonuçlara etkisi incelenmiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere tanılanan mod frekansları farklı referans kanallarında sabit kalıp tutarlılık göstermiştir. Çizilen stabilizasyon diagramlarında tutarlı görülen frekanslar için ilgili mod şekilleri kontrol edilmiştir. Sistemin özdeğer analizi sonucunda elde edilen mod şekilleri ile uyum sağlayan mod şekilleri sistemin gerçek modları olarak doğrulanmıştır (Caicedo, 2011). Köprünün sayısal modelinin ilk 10 mod frekansı ve gruplama metoduyla NEXT-ERA sonucunda çizilen stabilizasyon diagramları analiz edilerek tanılanan ilk 10 mod frekansları ve sönüm oranları karşılaştırmalı olarak 1'de verilmiştir.

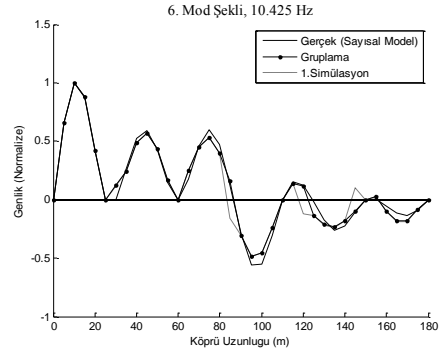
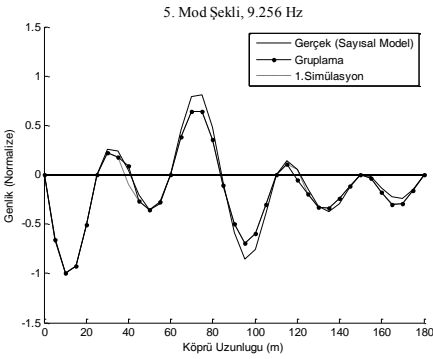
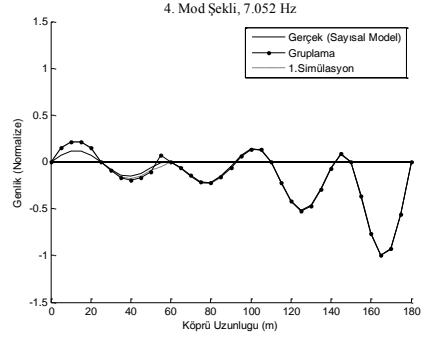
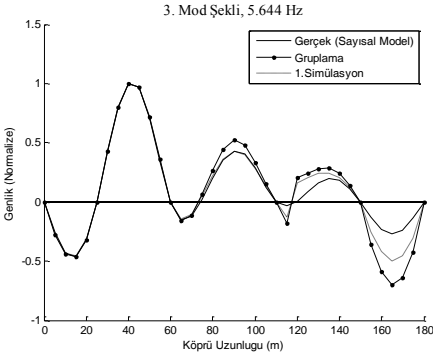
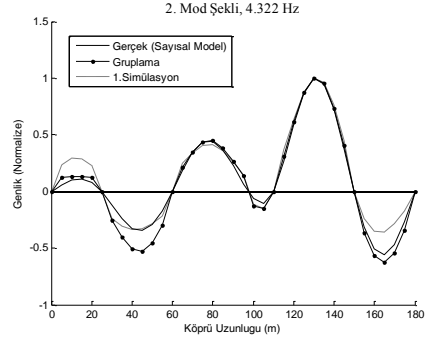
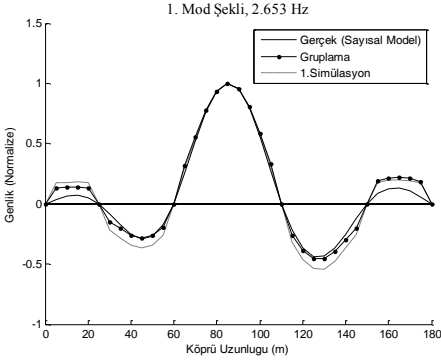
Tablo 1 Modelin gruplama yöntemiyle tanılanan frekansları ve sönüm oranları

	Gerçek Frekanslar (Hz)	Gruplama ile Tanılanılan Frekanslar (Hz)	Hata payı (%)	Gerçek Sönüm Oranları (%)	Gruplama ile Tanılanılan 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

Tablodan görüldüğü üzere frekans tanılama işleminde en yüksek hata payı 10. mod frekansında olup %2.905'tir. Kullanılan yöntem sistem frekanslarını kabul edilebilir sınırlar içerisinde tanımlayabilmiştir. Fakat, sönüm oranlarına bakılacak olursa kabul edilebilir değerlerin bulunmasına rağmen en yüksek hata payı 1. mod sönüm oranında olup %53.5'tir. Buradan kullanılan yöntemin veya yöntemdeki belirli bir parametrenin sönüm oranı tanımlanmasında yetersiz kaldığı çıkarılabilir.

Kullanılan gruplama yöntemine karşılık eş zamanlı ölçüm sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğunu göstermek amacıyla 1. simülasyon ölçüm sonuçları doğrudan NExT-ERA metodu ile kullanılarak köprünün modal parametre tanımlaması yapılmıştır. 1. simülasyon sonucunda elde edilen mod şekilleri, eşdeğer ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri ve sistemin sayısal modelinin özdeğer analizinden elde edilen mod şekilleri karşılaştırılarak doğrulama işlemi yapılmıştır. Köprü modelinin gruplama yöntemi ile tanımlanan ilk 6 mod frekansındaki mod şekilleri ve 1. simülasyonda elde edilen mod şekilleri, gerçek mod şekilleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5'te sunulmuştur.

Şekildeki grafiklerde görüldüğü üzere kullanılan gruplama yöntemi ile bulunan mod şekilleri, gruplama yapılmadan tanımlanan mod şekilleriyle ve sistemin gerçek mod şekilleriyle kabul edilebilir bir uyum sağlamaktadır. Bu da gruplar halinde alınan ölçümlerin birbiriyle eşdeğer ölçümler haline dönüştürüldükten sonra köprü gibi yapıların modal parametrelerinin tahmininde kullanılabileceği sonucunu vermektedir. Elde edilen sonuçlardan bazıları -özellikle sönüm oranları- tatmin edici olmayıp çıkan sonuçların daha da iyileştirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir.



Şekil 5 Köprü Modelinin İlk Altı Mod Şekli.

Kaynaklar

1. 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.
2. Beyen, K., Kutanis, M., Tanöz, H. Ö., Başkan, D. (2011) "Yapı Sağlığı İzleme ve Yapı Tanı Çalışmaları için Akıllı Aktarma Protokollü Kablosuz Sensör Ağı.", Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30 Mayıs-3 Haziran, 2011, İstanbul.
3. 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.
4. Caicedo, J.M. (2003), "Structural Health Monitoring of Flexible Civil Structures.", Doktora Tezi, Washington University, St. Louis, Missouri.
5. 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.
7. Gündoğan, M. (2012) "Çelik Model Köprünün Yapı Sağlığının Gözlenmesi.", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
8. 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.
9. 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)
10. 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.
11. MATLAB (2012), Version R2012b 8.0.0.78, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc
12. Nayeri, R.D, Tasbihgo, F., Wahbeh, M., Caffrey, J.P., Masri, S.F., Conte, J.P. and Elgamel, 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.

Anahtar Sözcükler: Köprü, Modal Parametre, Grup Ölçümleri, NExT, ERA