DERİNER BETON KEMER BARAJI'NIN DENEYSEL DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

E.E. Başbolat[1], A. Bayraktar[2], H.B. Başağa[3] ve T. Türker[3]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
[3] *Yardımcı Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
Email: alemdar@ktu.edu.tr

ÖZET:

Beton kemer barajlar, enerji elde etmek amacıyla inşa edilen özel mühendislik yapılarıdır. Bu barajların yıkılması ya da hasar görmesi, telafisi mümkün olmayan sonuçlar oluşturabilir. Bu nedenle, güvenliklerinin sürekli kontrol edilmesi önem arz etmektedir. Kemer barajların güvenlikleri, deneysel dinamik özellikleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu çalışmada, Ülkemizde inşa edilen en yüksek beton kemer baraj olan Deriner Barajı'nın deneysel dinamik özelliklerinin (doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları) Operasyonel Modal Analizi Yöntemiyle belirlenmesi amaçlanmaktadır. 2013 yılında hizmete açılan Deriner Barajı'nın dinamik özellikleri, hassas sismik ivme ölçerler ve çevresel titreşimler kullanılarak rezervuarın dolu olması durumu (390.0m su kotu) için belirlenmiştir. İvme ölçerlerden sağlanan titreşim verileri kullanılarak doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemiyle elde edilmiştir. Belirlenen değerler barajın gelecek yıllardaki davranışının izlenmesi için bir referans değer olarak kullanılabilecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Deriner barajı, deneysel dinamik karakteristik, operasyonel modal analiz, sismik ivmeölçer, kemer baraj, çevresel titreşim.

1. GİRİŞ

Kemer barajlar, sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda deprem gibi dinamik bir etki esnasında sıvı ortamda hidrodinamik basınçlar, yapı ortamında hidrodinamik basınçlardan dolayı ilave yükler meydana gelir. Kemer barajların bu ilave yükleri taşıyamayıp hasar görmesi telafisi mümkün olmayan sonuçlara neden olabilir. Özellikle aktif deprem kuşağı bölgesinde yer alan Ülkemizdeki barajlardan birinin veya bir kaçının yıkılması halinde çok büyük can ve mal kayıpları oluşabilir. Bu tür sorunlarla karşılaşmamak için, kemer barajların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve izlenmesi gerekmektedir (Bayraktar vd., 2010).

Kemer barajlar gibi önemli mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki davranışı, dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Dinamik karakteristikler analitik veya deneysel yöntemlerle tespit edilmektedir. Analitik yöntemde, yapının sonlu eleman modeli oluşturmakta, uygun malzeme özellikleri ve sınır şartları belirlenmekte ve serbest titreşim analizleri yapılarak yapının doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmektedir. Fakat elde edilen analitik dinamik karakteristiklerin yapıların mevcut durumlarını tam olarak yansıtmadığı birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır (Morin, vd., 2002; Sasaki vd., 2004; Bayraktar vd., 2012; Sevim vd., 2010). Dolayısıyla, analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin, yapının deprem davranışının belirlenmesinde kullanılması, doğru olmayan analiz sonuçlarını da beraberinde getirmektedir. Ayrıca, yapıların düşük genlikli

titreşimlerinden elde edilen lineer dinamik karakteristiklerinin bulunması, büyük depremler sırasında yapılarda oluşabilecek lineer olmayan davranışın anlaşılması ve modellenmesi için de önemlidir (Dabre vd., 2000). Bu nedenle, analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin doğruluğunu kontrol etmek için deneysel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Deneysel yöntemler doğrudan yapı üzerine uygulanmakta ve elde edilen dinamik karakteristikler yapının o andaki mevcut durumunu yansıtmaktadır (Türker vd., 2011; Bayraktar vd., 2012).

Günümüzde kemer barajlar gibi büyük hacimli ve önemli mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır (Sevim vd., 2010; Sevim vd., 2012; Sevim vd., 2010; Sevim vd., 2011). Bu yöntemde, yapı üzerinde çeşitli noktalara hassas sismik ivmeölçerler yerleştirilmekte, ivmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesi yardımıyla toplanmaktadır. Toplanan sinyaller hem yapıdan hem de çevreden gelen sinyalleri içerdiğinden filtreleme teknikleri kullanılarak ayrıştırılmakta, yapıya ait sinyaller işlenerek dinamik karakteristikler belirlenmektedir. Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle belirlenen deneysel dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilenlerle karşılaştırılarak, yapının sonlu elemanlar modelinin gerçek yapı modelini ne kadar temsil ettiği hakkında bilgi edinilebilmektedir (Sevim vd.,2010; Bayraktar vd., 2011).

Bu çalışmada, Ülkemizde inşa edilmiş en yüksek kemer baraj olan Deriner Barajının dinamik karakteristikleri Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri barajın dolu olması durumu (su seviyesi 390.0 m kotunda) için elde edilmiştir.

2. FORMULASYON

Deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi (GFOA) kullanılmıştır. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma yöntemi kullanımı kolay olan Frekans Ortamında Ayrıştırma (FOA) yönteminin geliştirilmiş halidir. Bu yöntemde modlar, davranışın spekral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayrıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilir (Jacobsen vd., 2006; Sevim vd., 2010).

GFOA yönteminde etki ve tepki arasındaki bağıntı,

$$\left[G_{yy}\left(jw\right)\right]=\left[H\left(jw\right)\right]^{*}\left[G_{xx}\left(jw\right)\right]\left[H\left(jw\right)\right]^{T} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir (Brincker vd., 2000; Sevim vd., 2010). Burada; $G_{xx}\left(jw\right)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu, Gyy (jω) tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve $H\left(jw\right)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Bağıntı (1)'teki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozesini göstermektedir. Denklem (1)'ün çözümü literatürde detaylı bir şekilde bulunmaktadır (Brincker vd., 2000).

3. UYGULAMA – DERİNER BARAJI

Deriner barajı ve hidroelektrik santrali, Artvin'de Çoruh Nehri üzerine inşaa edilmiş çift eğrilikli beton kemer baraj olup, 249.00m gövde yüksekliği (temelden) ile Türkiye'nin en yüksek ve Dünyanın ise 6. yüksek barajıdır. İnşaatına 1998 yılında başlanmış ve Şubat 2012'de bitirilerek su tutulmaya başlanmıştır. Şu anda barajda tam kapasite ile su tutmakta olup Haziran 2013'de elektrik üretimine geçilmiştir. Barajın kret kotu 397.00m ve kret

uzunluğu 720.00m'dir. Gövde hacmi 3.400.000m^3'tür. Yaklaşık 1 milyar 400 milyon Amerikan Dolarına mal olan barajda yaklaşık 2 milyar m^3 su depolanabilmektedir. Şekil 1'de barajın bulunduğu dar vadi ve barajın kemer şeklindeki gövdesi görülmektedir.

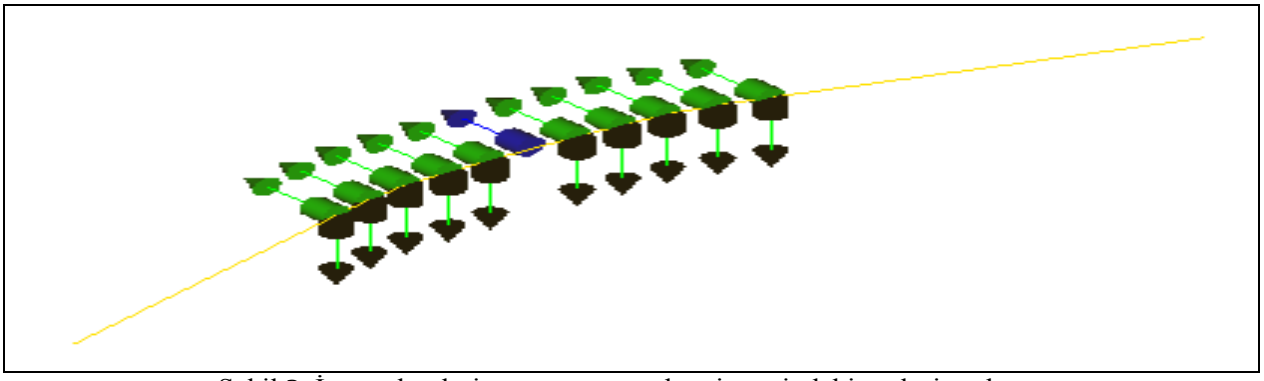
Şekil 1. Deriner Barajı'na ait resimler

3.1. Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

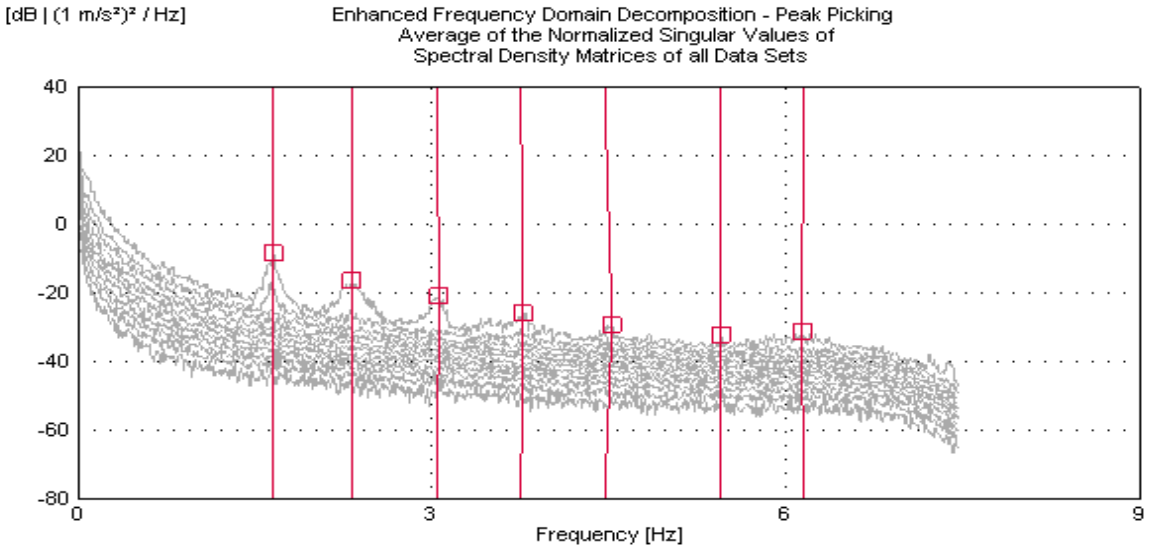
Deriner Barajı'nın dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için barajda çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde B&K 8340 tipi tek eksenli, 10 V/g hassasiyetine sahip kablolu ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerden gelen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanarak PULSE (2006) yazılımına aktarılmıştır. Dinamik karakteristikler, OMA (2006) yazılımı kullanılarak belirlenmiştir.

Deriner Barajı'nda gerçekleştirilen çevresel titreşim testinde, doğal titreşim olarak rüzgar ve su basıncı etkilerinden yararlanılmıştır. Deriner Barajı üzerinde 04 Haziran 2013 tarihinde kret seviyesinde çevresel titreşim testiyle ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılan tarihte rezervuar su kotu 390.00m'dir. Test sırasında ivmeölçerler, baraj kretine memba-mansap ve düşey doğrultuda yerleştirilmiştir (Şekil 2). İvmeölçerin sayısı ve veri toplama ünitesindeki kanal sayısı sınırlı olduğu için test sırasında 13 ivmeölçer kullanılabilmiştir. Ölçülmek istenen mesafe uzun ve ivmeölçer sayısı yetersiz olduğu için test referanslı olarak iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda 12 ivmeölçer anahtar kesit ile sol yamaç arasına, ikinci adımda 12 ivmeölçer anahtar kesit ile sağ yamaç arasına yerleştirilmiştir. Her bir adımda alınan ölçümleri birleştirmek için anahtar kesit üzerine bir referans ivmeölçeri yerleştirilmiştir (Şekil 2). Her bir adım için 45 dakika boyunca ölçüm alınarak sinyaller toplanmış ve analiz edilmiştir. Analizlerden elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 3'te verilmektedir.

Ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 1'de, mod şekilleri ise Şekil 4'te verilmektedir. Barajın ilk beş frekansı, 1.658-4.467 Hz arasında değişmektedir. Sönüm oranları literatürde de belirtildiği gibi %5'in altında elde edilmiştir (Wieland ve Ruoss, 2008).



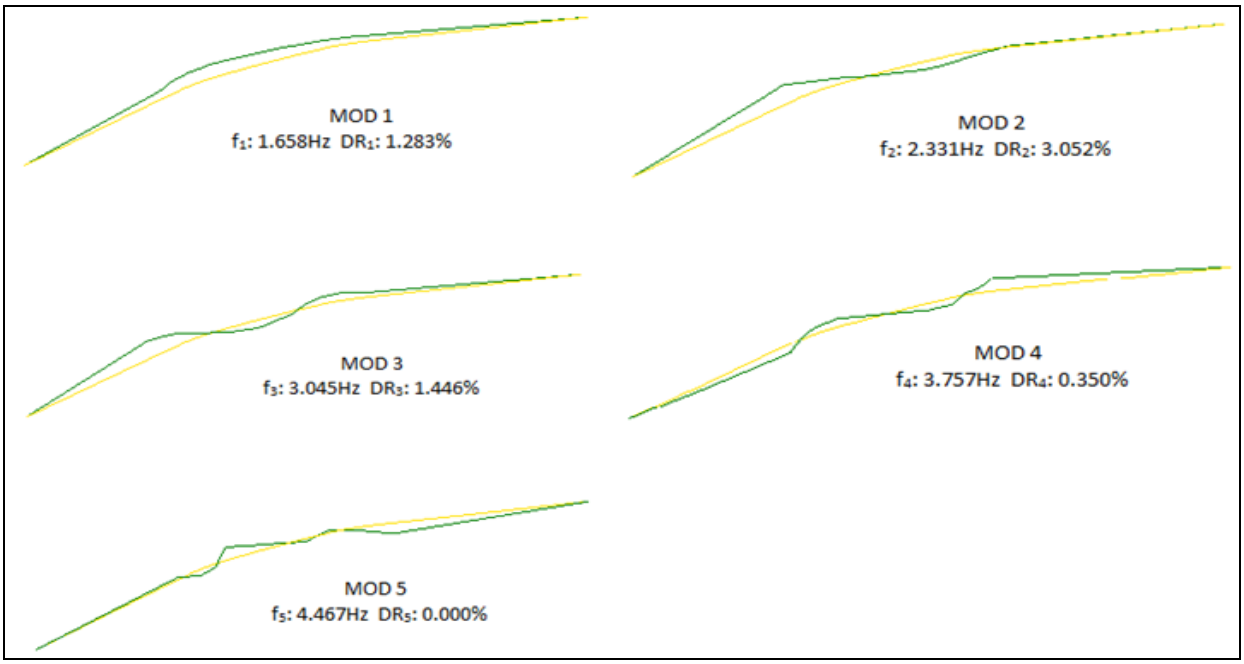
Şekil 2. İvme ölçerlerin görünümü ve baraj üzerindeki yerleşim planı



Şekil 3. Spektral yoğunluk fonksiyonları

Tablo 1. Deriner Barajı'nın ilk beş deneysel frekans ve sönüm oranı değerleri

MOD	Doğal Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	1.658	1.283
2	2.331	3.052
3	3.045	1.446
4	3.757	0.350
5	4.467	0.000



Şekil 4. Deriner Barajı'nın ilk 5 deneysel mod şekli

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ülkemizde inşa edilen en yüksek beton kemer baraj olan Deriner Barajı'nın deneysel dinamik özellikleri Operasyonal Modal Analizi Yöntemiyle çevresel titreşimlerden yararlanılarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerde hassas kablolu ivmeölçerler kullanılmıştır. İvme ölçerlerden kaydedilen titreşim sinyalleri GFOA Yöntemi kullanılarak barajın frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri belirlenmiştir. Barajı'nın 390.0m kotundaki su seviyesi için ilk beş deneysel doğal frekansı 1.658Hz ile 4.467Hz arasında elde edilmiştir. Sönüm oranları ise %5'in altında oluşmuştur.

Deriner barajı üzerinde her mevsim ve farklı su seviyeleri için dinamik ölçümlerin gerçekleştirilmesi, baraj sağlığının izlenmesi açısından faydalı olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 106M038 no'lu TÜBİTAK ve 2005.112.001.1 no'lu Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında sağlanan teçhizatla gerçekleştirilmiştir.

DSI Genel Müdürlüğü ve DSI Artvin 26. Bölge Müdürlüğü yetkilileri ve çalışanlarına ölçüm öncesi ve sonrası için vermiş oldukları katkı ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C. (2010). Operasyonel Modal Analiz Yöntemi Kullanılarak Berke Barajı'nın Deprem Performansının Belirlenmesi. *DSİ Teknik Bülten, Sayı 108*, 13-29.

Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. (2011), Finite Element Model Updating Effects on Nonlinear Seismic Response of Arch Dam-Reservoir-Foundation Systems, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47, pp.85-97.

Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. (2012). Experimental Evaluation of Crack Effects on the Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam using Ambient Vibration Tests, *Computers and Concrete*, (accepted).

Brincker, R., Zhang, L., & Anderesen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *18th International Modal Analysis Conference*, 625-630, San Antonio,USA.

Dabre, G. R., de Smet, C., & Kraemer, C. (2000). Natural frequencies measured from ambient vibration response of the arch dam of Mauvoisin. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 577-586.

Jacobsen, N. J., Andersen, P., & Brincker, R. (2006). Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis. *Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise & Vibration Engineering.* Leuven, Belgium.

Morin, P. B., Leger, P., & Tinawi, R. (2002). Seismic Behavior of Post-Tensioned Gravity Dams: Shake Table Experiments and Numerical Simılations. *Journal of Structural Engineering, ASCE*.

OMA (2006). *Operational Modal Analysis Release 4.0.* Denmark: Structural Vibration Solution A/S.

PULSE (2006). *Analyzers and Solutions Release 11.2.* Denmark: Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S.

Sasaki, T., Kanenawa, K., & Yamaguchi, Y. (2004). Simple Estimating Method of Damages of Concrete Gravity Dam Based on Linear Dynamic Analysis. *13th World Conference on Earthquake Engineering.* Vancouver, Canada.

Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Adanur, S., Akköse, M. (2010). Modal Parameter Idendification of a Prototype Arch Dam using Enhanced Frequency Domain Decomposition and Stochastic Subspace Idendification Techniques, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 38, No. 5, pp.1-10.

Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A.C. (2010). Finite Element Model Calibration of Berke Arch Dam using Operational Modal Testing, *Journal of Vibration and Control*, (accepted).

Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Adanur, S., Akköse, M. (2010). Determination of Water Level Effects on the Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam Model using Ambient Vibration Testing, *Experimental Techniques*, 2010 (accepted).

Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A.C. (2010). Investigation of Water Length Effects on the Modal Behavıor of A Prototype Arch Dam Using Operational and Analytical Modal Analyses, *Structural Engineering and Mechanics*, (accepted).

Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. (2011). Earthquake Behavior of Berke Arch Dam using Ambient Vibration Test Results, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, (accepted).

Türker, T., Sevim, B., Bayraktar, A., & Başağa, H. B. (2011). Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Kemer Barajların Hasar Değerlendirmesi. *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve sismoloji Konferansı.* Ankara.

Wieland, M., & Ruoss, R. (2008). *Design Aspects of Deriner Dam.* Water Power Magazine.