ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK KEMER BARAJLARIN HASAR DEĞERLENDİRMESİ

T. Türker[1], B. Sevim[2], A. Bayraktar[3], H.B. Başağa[4]

[1]*Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
[2]*Yrd.Doç.Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane*
[3]*Prof.Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
[3]*Yrd.Doç.Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
Email: temelturker@ktu.edu.tr, bsevim18@hotmail.com, alemdar@ktu.edu.tr, hasanbb69@hotmail.com

ÖZET:
Bu çalışmada, laboratuar ortamında oluşturulan ölçekli bir kemer baraj modeli üzerinde rastgele balyoz darbeleriyle oluşturulan hasar etkisinin çevresel titreşim yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Hasar durumunun değerlendirilmesinde analitik model güncelleme yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma, baraj modelin başlangıç analitik modelinin oluşturulmasını, bu modelin hasarsız duruma ait ölçüm sonuçları dikkate alınarak kalibre edilmesini ve model güncelleme yöntemiyle hasarlı durum ölçüm sonuçları kullanılarak olası hasar dağılımının belirlenmesini içermektedir. Model üzerindeki deneysel ölçümler Operasyonal Modal Analiz yöntemiyle tek eksenli ivmeölçerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerler baraj modelinin kret seviyesine yerleştirilmiş ve ölçümlerden ilk beş doğal frekans, modal sönüm oranları ile mod şekilleri elde edilmiştir. Baraj modelinin ilk beş frekans değeri dikkate alınarak gerçekleştirilen hasar değerlendirmesinden, hasar dağılımı gerçek duruma oldukça yakın bir şekilde elde edilebilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Analitik model güncelleme yöntemi, çevresel titreşim testi, hasar değerlendirme, kemer barajlar.

1. GİRİŞ

Yapısal hasarların belirlenmesinde kullanılan temel yaklaşım, yapının rijitliğinde meydana gelen bir azalmanın veya hasarın yapının dinamik davranışında meydana getireceği değişimdir. Bu değişim doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak bilinen dinamik karakteristiklerde ortaya çıkmaktadır. Hasar tespiti konusunda yaygın olarak kabul gören sınıflandırma Rytter (1993) tarafından yapılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre,

1. Seviye: Yapıda hasar olup olmadığının tespit edilmesi
2. Seviye: Hasar mevcut ise hasar yerinin belirlenmesi
3. Seviye: Yeri belirlenen hasarın büyüklüğünün belirlenmesi
4. Seviye: Hasarın yapı davranışına etkisinin belirlenmesi

şeklinde dört hasar değerlendirme seviyesi ortaya konulmuştur.

Hasar tespiti üzerine gerçekleştirilen çalışmaları başlıca teorik ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Teorik çalışmalarda, hasarlı durumlar için deneysel ölçümlerden elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak analitik modeller oluşturulmuş; analitik ve deneysel sonuçlar geliştirilen birçok yöntem kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise hasarsız ve hasarlı durumlar için deneysel ölçümlerden elde edilen veriler birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sadece deneysel veriler tam bir hasar değerlendirme yapmak için yeterli olmadığından, çoğu durumda analitik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirme yapılmıştır. Son yıllarda ise özellikle analitik modellerin güncellenmesine dayalı hasar tespit uygulamaları daha fazla tercih edilir hale gelmiştir.

Farrar ve Jauregui (1998a, 1998b), hasar tespitinin yapıların sınır şartlarındaki, rijitliklerindeki, kütle ve sönüm gibi fiziksel özelliklerindeki değişimlerin, yapılardaki frekans, mod şekli ve modal sönüm gibi dinamik karakteristiklerinde yaptığı değişimler kullanılarak gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada, deneysel ve sayısal olarak iki ayrı bölüm bulunmakta, hasarlı ve hasarsız köprülerden elde edilen ölçüm sonuçları birbiriyle karşılaştırılmaktadır. Cantieni (2001), 170m kret uzunluğuna ve 46m yüksekliğe sahip Norsjö Kemer Barajı'nın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Baraja öncelikle çevresel titreşim testi uygulanmış ve barajın temel doğal frekansı 3.2Hz olarak bulunmuştur. Barajın dinamik karakteristikleri, sonlu eleman modeli MARC programında oluşturularak belirlenmiştir. Analizler sonucunda analitik dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilenlerden biraz farklı olduğu vurgulanmıştır. Oliveira ve Faria (2006), kemer barajların hasar seviyelerini tespit edebilmek için küçük ölçekli modeller kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. Modellerin birinde, baraj hasar görene kadar uygulanan yük sistematik bir şekilde artırılmıştır. Diğer baraj modelinde ise izin verilen maksimum yerdeğiştirme değerine kadar yükleme yapılmıştır. Barajların kret seviyesin biraz altında orta bölgelerde çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Deneysel olarak incelenen hasar durumları için analitik modeller üzerinde değerlendirmeler yapılmış ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla benzer olduğu görülmüştür. Ramos vd. (2010), laboratuar ortamında yığma yapıları temsilen oluşturulan bir kemer model üzerinde tedrici olarak oluşturulan hasar durumları için hasar değerlendirmesi yapmışlardır. Çalışmada, model üzerindeki hasar düzeyi birinci, ikinci ve üçüncü seviyeye kadar belirlenebilmiş, dördünce seviye hasar değerlendirmesi yapabilmek amacıyla analitik model güncelleme yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmada, ölçekli bir kemer baraj modeli üzerinde rastgele oluşturulan hasar etkisi deneysel modal analiz ölçüm sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. Hasar değerlendirme işleminde analitik model güncelleme yöntemi kullanılmış ve ölçümlerden elde edilen ilk beş doğal frekans, modal sönüm oranları ile mod şekilleri değerleri kullanılarak değerlendirme yapılmıştır.

2. YÖNTEM

Yapıların hasar durumlarını değerlendirebilmek için kullanılan yaklaşım, yapıların analitik modellerinin deneysel ölçüm sonuçlarına göre güncellenmesini içermektedir. İki aşamadan oluşan yaklaşımın esası, analitik modeller üzerinde değişiklikler yapılarak deneysel ve analitik dinamik karakteristikler arasındaki farkın minimize edilmesine dayanmaktadır. Bu amaçla, ilk aşamada yapının hasarsız durum için oluşturulan analitik modeli yapının gerçek davranışını yansıtacak şekilde kalibre edilmekte; ikinci aşamada ise ilk aşamada elde edilen model kullanılarak yapının hasarlı durumu için elde edilen deneysel ölçümlere göre analitik modelin güncellenmesi yapılmaktadır. İki aşama arasındaki temel farklar: 1. Başlangıç modellerinin farklı olması 2. Güncelleştirme için dikkate alınan parametrelerin farklı olmasıdır.

Kullanılan yaklaşımın hesap adımları aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

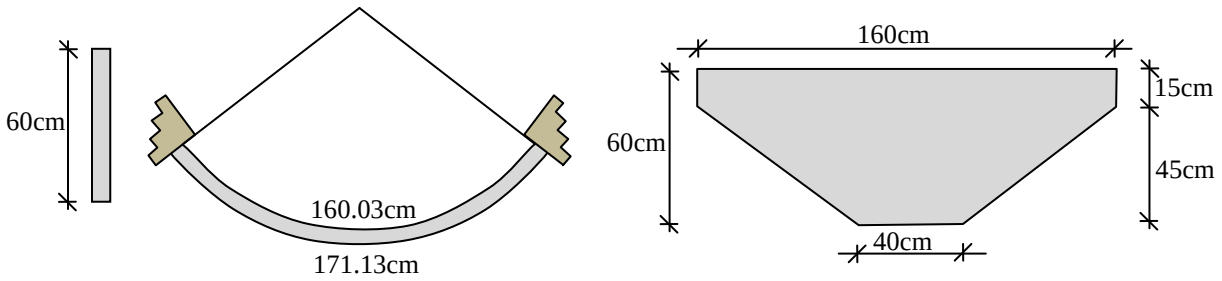
1. Aşama
   1. Başlangıç analitik model oluşturulur.
   2. Hasarsız durum ölçümleri gerçekleştirilir.
   3. Başlangıç analitik model kalibre edilir.
      3.1. Deneysel ölçüm düzeneğinde tanımlanan modelin düğüm noktaları ile analitik olarak oluşturulan modelin düğüm noktaları eşleştirilir.
      3.2. Deneysel ve analitik frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılır.
      3.3. Frekanslar için yakınsama kriteri seçilir.
      3.4. Mod vektörleri için yakınsama kriteri seçilir.
      3.5. Değişken parametre olarak elastisite ve/veya yay sabitleri seçilir ve parametreye ait sınır değerler ile değişim aralığı tanımlanır.
      3.6. Yakınsama kriterleri sağlanana kadar çözüm aranır.

2.Aşama
4. Hasarlı durum ölçümleri gerçekleştirilir.
5. Kalibre edilmiş analitik model hasarlı durum için güncellenir.
5.1. Deneysel ölçüm düzeneğinde tanımlanan modelin düğüm noktaları ile analitik olarak oluşturulan modelin düğüm noktaları eşleştirilir.
5.2. Deneysel ve analitik frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılır.
5.3. Frekanslar için yakınsama kriteri seçilir.
5.4. Mod vektörleri için yakınsama kriteri seçilir.
5.5. Değişken parametre olarak kesit ataleti ve/veya duvar kalınlığı seçilir ve parametreye ait sınır değerler ile değişim aralığı tanımlanır.
5.6. Yakınsama kriterleri sağlanana kadar çözüm aranır.
6. Yapı elemanlarından kesitinde ve/veya duvar kalınlığında azalma olan elemanlar hasarlı eleman olarak belirlenir.

Bu çalışmada analitik modellerin oluşturulması aşamasında SAP2000 sonlu eleman programı (SAP2000, 2008), deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesi aşamasında PULSE ve OMA yazılımları (PULSE, 2006; OMA 2006) ve model güncelleme aşamasında ise Femtools yazılımı (Femtools, 2003a, 2003b) kullanılmıştır.

3. BARAJ MODEL UYGULAMASI

Bu çalışmada, kemer barajlardaki hasar etkileri laboratuar ortamında oluşturulan kemer baraj modeli üzerinde incelenmiştir. Laboratuar ortamında ölçekli olarak oluşturulan model tek eğriliklidir (Sevim, 2010). Bu baraj modeli üzerinde hasarsız ve hasarlı durumlar için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de oluşturulan baraj modele ait boyut bilgileri verilmektedir.



Üstten görünüş Önden görünüş

Şekil 1. Baraj modelinin üstten ve önden görünüşleri ile boyutları

Gövde kalınlığı 6cm olarak seçilen baraj modelin inşa edilmiş durumuna ait görüntüler Şekil 2'de verilmektedir.

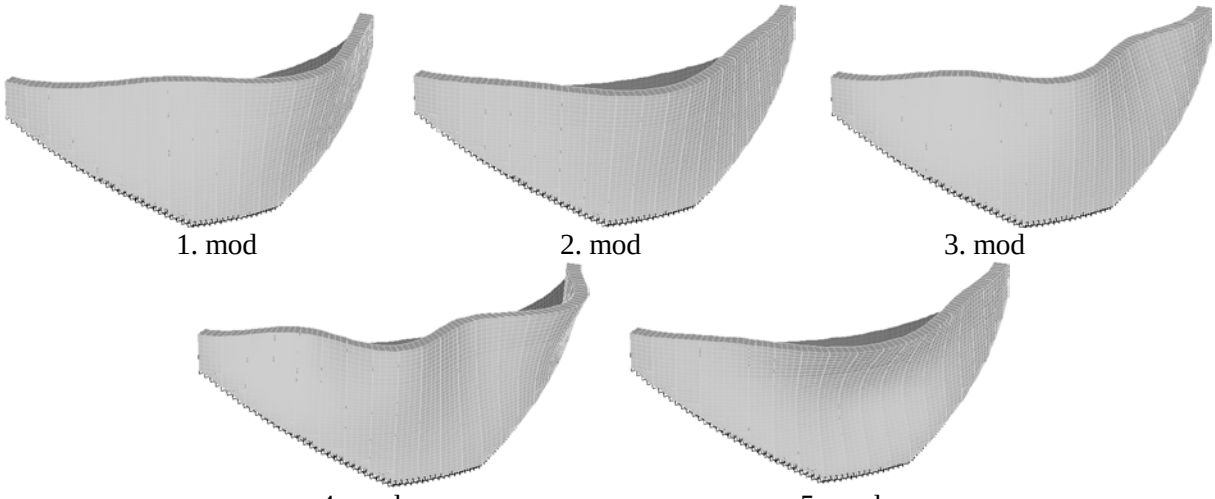
Şekil 2. Laboratuarda oluşturulan baraj modelinin üstten ve önden görünüşleri

3.1. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

Baraj modeli SAP2000 programı kullanılarak sonlu eleman yöntemiyle analitik olarak modellenmiş ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Baraj modeline ait analitik modelin oluşturulmasında katı elemanlardan yararlanılmıştır. Model, yan yüzeylerinin tamamen tutulu olduğu varsayılarak mesnetlenmiştir. Analitik modelin barajın gerçek davranışını temsil edebilmesi için baraj gövdesi düzgün olarak elemanlara bölünmüştür. Barajın başlangıç analitik modelinin oluşturulmasında elastisite modülü $2.8*10^{10}$ N/m^2 ve birim kütle 2300 kg/m^3 olarak dikkate alınmıştır. Barajın başlangıç analitik modelinin modal analizden elde edilen ilk beş doğal frekans değeri Tablo 1'de, mod şekilleri ise Şekil 3'te verilmektedir.

Tablo 1. Barajın başlangıç analitik modelinden elde edilen doğal frekansları

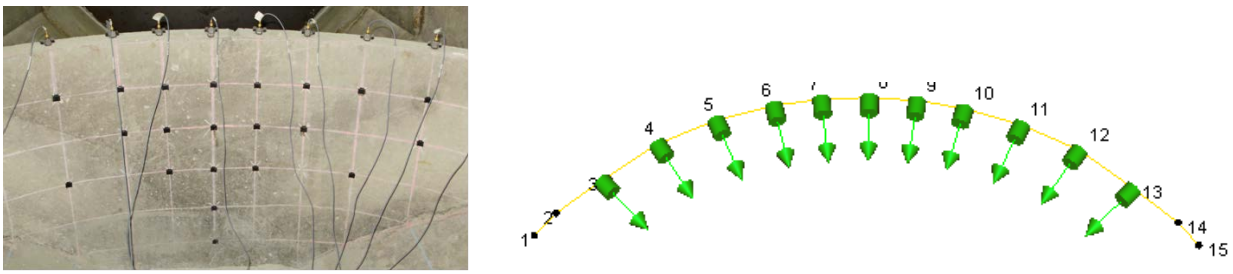
Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)
1	423.09
2	432.92
3	594.46
4	730.43
5	867.64



Şekil 3. Barajın başlangıç analitik modeline ait mod şekilleri

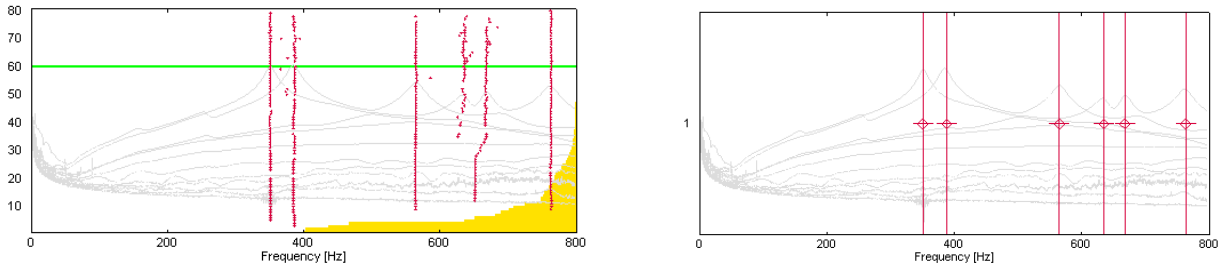
3.2. Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Baraj modeli üzerindeki ölçüm çevresel titreşim şartları altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümde toplam on bir adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerler kemer kısmın en üst kotuna yani kret seviyesine bağlanmıştır. Şekil 4'te ivmeölçer bağlantıları ve ölçüm düzeni gösterilmektedir.



Şekil 4. Baraj modeli üzerinde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi

Ölçümde baraj modeline ait ilk beş frekans değerinin ve mod şekillerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen ölçümde frekans aralığı 0-800Hz olarak seçilmiş ve toplam 10dk'lık bir ölçüm alınmıştır. Baraj modelin modal parametreleri Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Barajın hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen karalılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 5'te verilmektedir.



a. Kararlılık fonksiyonu b. Spektral yoğunluk fonksiyonları

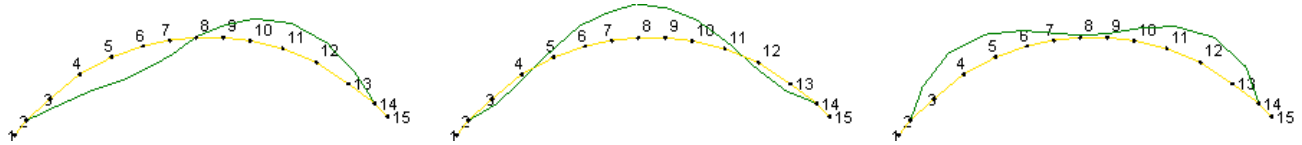
Şekil 5. Baraj modelin hasarsız durumu için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları

Baraj modelin hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen ilk beş doğal frekans değeri ve modal sönüm oranları Tablo 2'de verilmektedir.

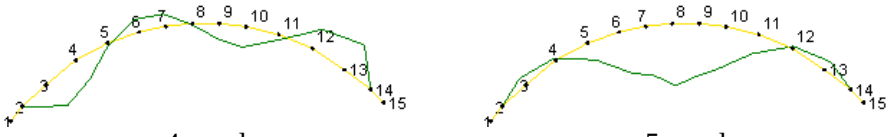
Tablo 2. Barajın hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	315.1	1.442
2	341.3	1.538
3	501.9	1.119
4	573.1	0.961
5	683.1	1.482

Baraj modeli üzerinde hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen mod şekilleri Şekil 6'da verilmektedir.



1. mod 2. mod 3. mod



4. mod 5. mod

Şekil 6. Barajın hasarsız durum ölçümünden elde edilen mod şekilleri

3.3. Analitik Modelin Kalibre Edilmesi

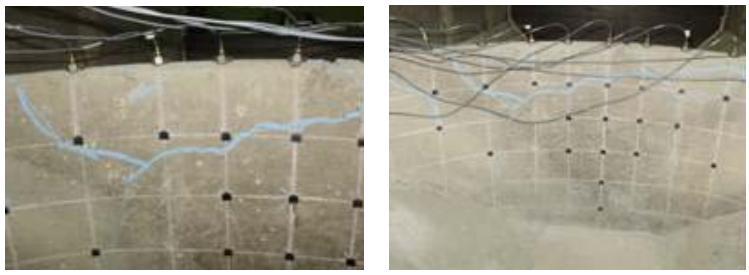
Baraja ait analitik modelden elde edilen frekansların deneysel frekanslardan oldukça farklı olduğu ve frekanslar arasındaki farklılığın %34.27'lere varan değerlere ulaştığı görülmektedir. Oluşturulan baraj modelinde elastisite değeri değişken olarak seçilip model kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç modelin kalibre edilmesinde doğal frekans, mod şekli ve Modal Güvence Kriteri (MGK) değerlerinde en fazla %1 farklılık sağlanacak şekilde kriterler ortaya konulmuştur. Seçilen hedef doğrultusunda elastisite değerinde %10'luk bir değişim olabileceği varsayılarak başlatılan iterasyonlar neticesinde verilen yakınsama kriteri sağlanmış ve seçilen elastisite değeri için doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Başlangıç analitik modelin kalibrasyonu neticesinde elde edilen frekans değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Baraj modelin kalibre edilmiş durumu için doğal frekansları

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)		
	Hasarsız Deneysel	Analitik Kalibre	Fark (%)
1	315.1	315.09	0.00
2	341.3	341.27	0.01
3	501.9	501.86	0.01
4	573.1	573.08	0.00
5	683.1	683.07	0.00

3.4. Hasarlı Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Baraj model üzerinde, kretin orta kısımlarında rastgele vurulan balyoz darbeleriyle yeri ve büyüklüğü belirsiz hasarlar oluşturulmuştur. Şekil 7'de bu hasar durumuna ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 7. Baraj modelde hasar dağılımı

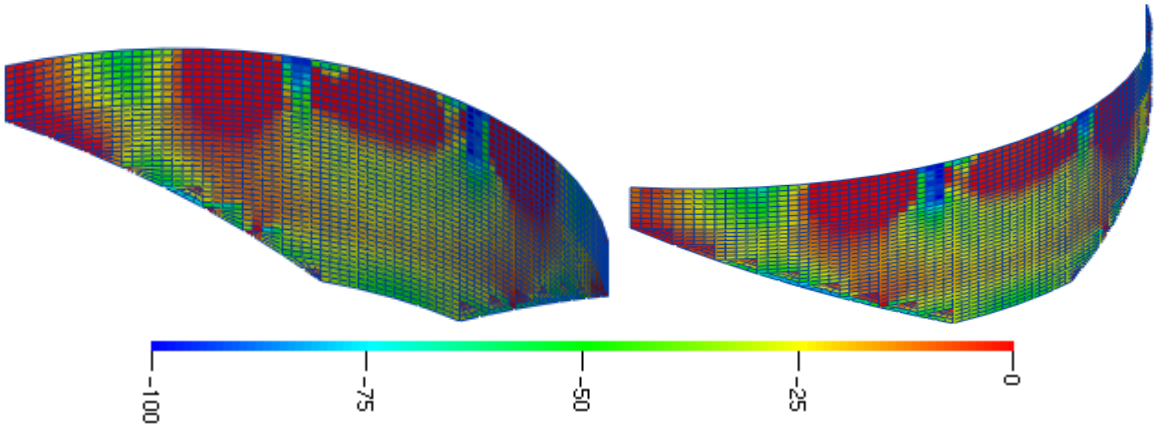
Bu hasar durumu için çevresel titreşim şartları altında gerçekleştirilen ölçümden elde edilen veriler SAB yöntemiyle değerlendirilmiştir. Spektral yoğunluk fonksiyonları kullanılarak doğal frekanslar ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Baraj modelin hasarlı durumu için ölçümden elde edilen ilk beş doğal frekans değeri ve modal sönüm oranları Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Baraj modelde hasarlı durum için ölçülen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	211.30	1.047
2	223.70	1.497
3	293.80	1.644
4	374.70	1.355
5	410.40	1.406

3.5. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Baraj modelde oluşturulan hasarın yerinin belirlenebilmesi amacıyla, her bir elemanda kesit kalınlığı değişken alınarak analitik modelde güncelleme yapılmış ve deneysel frekanslar ile en iyi uyum elde edilmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen adım adım çözümlemeler sonucunda, yakınsamanın elde edildiği durum için baraj gövdesinde beton kalınlığının değişimi Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8. Baraj modelde hasarlı durum için her bir elemanda beton kalınlığının değişimi

Baraj modele ait analitik modelin güncellenmesi sonucunda, elde edilen dağılımın gerçek hasar durumu ile örtüştüğü görülmektedir. Baraj modele ait güncellenmiş analitik model üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen frekanslar ile hasarlı durum ölçümünden elde edilen frekanslar karşılaştırıldığında, güncelleme işlemiyle frekanslar arasındaki farklılığın maksimum %0.13'e kadar indirgenebildiği görülmektedir. Tablo 5'te baraj modelin hasarlı durum için deneysel ve analitik frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 5. Baraj modelde hasarlı duruma ait deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	211.30	211.28	0.01	1.000
2	223.70	223.99	0.13	0.999
3	293.80	294.19	0.13	0.996
4	374.70	374.70	0.00	0.997
5	410.40	410.46	0.01	0.990

4. SONUÇLAR

Laboratuar ortamında oluşturulan bir kemer baraj modeli üzerinde, analitik model güncelleme yöntemiyle deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak hasar değerlendirmesi yapılması amaçlanan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir:

- Oluşturulan laboratuar modellerin deneysel dinamik karakteristiklerinin, bu modellere ait başlangıç analitik değerlerden oldukça farklı olduğu, bu farklılıkları gidermek amacıyla, başlangıç analitik modeller, malzeme özellikleri, sınır şartları gibi parametrelerdeki değişimler dikkate alınarak kalibre edildiği,
- Kemer baraj modelinin hasarsız durum için ilk beş frekansı 211.30Hz ile 410.40Hz aralığında ölçülmüş, başlangıç analitik modelin modal analizinden ise 315.09Hz ile 683.07Hz aralığında hesaplanmıştır. Hasarsız durum için elde edilen frekans değerleri arasında oldukça büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Başlangıç analitik modelin kalibre edilmesi sonucunda, frekanslar arasındaki fark %0.01 düzeyine kadar azaltılabilmiştir.
- Baraj modelde rastgele balyoz darbeleri sonucu oluşturulan hasar durumu için hasar değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan hasar etkisi frekanslarda %66'lara varan değişimler meydana getirmiştir. Bu hasar durumu için gerçekleştirilen değerlendirmeden, gerçeğe oldukça yakın bir dağılım gösteren hasar durumu elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmadan kullanılan analitik model güncelleme yönteminin baraj modeli üzerinde oldukça etkin sonuç verdiği görülmüştür. Yapılara hasar vermeden gerçekleştirilen bu değerlendirmenin gerçek yapıların hasar durumlarının belirlenmesinde etkin sonuç vereceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Cantieni, R. (2001). Assessing a dam's structural properties using forced vibration testing, *Proc. IABSE International Conference on Safety*, Risk and Reliability-Trends in Engineering, Malta.
Farrar, C.R. ve Jauregui, D.A. (1998a). Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I, Experiment, *Smart Materials Structure*, **7**, 704-719.
Farrar, C.R. ve Jauregui, D.A. (1998b). Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical Study, *Smart Materials Structure*, **7**, 720-731.
Femtools. (2003a). Femtools Model Updating Theoretical Manual, Version 3.3, Dynamic Design Solutions, Leuven, Belgium.
Femtools (2003b). Femtools Software, Version 3.3, Dynamic Design Solutions, Leuven, Belgium.
Oliveira, S. ve Faria, R. (2006). Numerical simulation of collapse scenarios in reduced scale tests of arch dams, *Engineering Structures*, **28**, 1430-1439.
OMA (2006). Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
PULSE (2006). Analyzers And Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound And Vibration Measurement A/S, Denmark.
Ramos, L.F., Roeck, G.D., Lourenço, P.B. ve Campos-Costa, A. (2010). Damage identification on arched masonry structures using ambient and random impact vibrations, *Engineering Structures*, **32**, 146-162.
Rytter, A. (1993). Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures, Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
SAP2000 (2008). Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
Sevim, B. (2010). Kemer Barajlarin Dinamik Davranişlarinin Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.