ANALİTİK MODEL GÜNCELLEME YÖNTEMİ KULLANILARAK KÖPRÜLERİN HASAR TESPİTİ

T. Türker[1], A. C. Altunışık[2], A. Bayraktar[3], H.B.Başağa[2],

[1]*Dr. İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
[2]*Yrd.Doç.Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
[3]*Prof.Dr. İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
Email: temelturker@ktu.edu.tr, ahmetcan8284@hotmail.com, alemdar@ktu.edu.tr, hasanbb69@hotmail.com

ÖZET:
Bu çalışmada, laboratuar ortamında oluşturulan kutu kesitli betonarme köprü modeli üzerinde kolon üst ucu ve tabliye hasarı durumları için hasar tespiti yapılması amaçlanmıştır. Oluşturulan hasar etkisi çevresel titreşim yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak analitik model güncelleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma köprü 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 sismik ivmeölçerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerler köprünün enine ve düşey doğrultulardaki tepkilerini ölçebilecek şekilde tabliye üzerine yerleştirilmiş ve ölçümlerden ilk beş doğal frekans, modal sönüm oranları ile mod şekilleri elde edilmiştir. Köprü modelinin ilk beş frekans değeri dikkate alınarak gerçekleştirilen hasar değerlendirmesinden oluşturulan hasar durumlarının oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği görülmüştür.

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

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. Yapıların hasar durumlarının değerlendirilmesinde sadece deneysel ya da sadece analitik verilerin kullanılmasının etkin sonuç vermediği, deneysel sonuçların analitik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirmesinin faydalı olduğu görülmüştür. Bu nedenle özellikle de son yıllarda analitik modellerin güncellenmesine dayalı hasar tespit uygulamaları daha fazla tercih edilir hale gelmiştir. Farrar ve Doebling (1997) tarafından Amerika'nın Albuquerque şehrindeki Rio Grande köprüsünde gerçekleştirilen deneysel modal analiz ölçümleri ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak verilmiştir. 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. Sampaio vd. (1999), yapılarda hasar olup olmadığını ve eğer varsa hasarın yerini ve miktarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Yapıda hasar etkisi olarak çatlağın dikkate alınması durumunda, dinamik karakteristiklerden

rijitliğin önemli derecede değiştiği, kütlenin değişmediği kabul edilmiştir. Amerika'nın Albuquerque şehrindeki Rio Grande köprüsü üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerde yöntemin doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Owen ve Haritos (2003), deneysel modal analiz yöntemini kullanarak 1/2.5 ölçekli köprü modellerinde yapısal hasarların belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Köprü modellerinin sonlu eleman analizleri ve deneysel ölçümleri gerçekleştirilerek elde edilen dinamik karakteristik değerleri karşılaştırılmış ve köprü modellerinin mevcut durumlarını yansıtan analitik modelleri oluşturulmuştur. Köprü modelleri üzerinde statik yüklemeler ile kontrollü hasarlar oluşturulmuştur. Hasarlı modeller üzerinde deneysel ölçümler gerçekleştirilerek, yapısal hasarlar frekans değerlerindeki değişimler dikkate alınarak ortaya konulmuştur. Baghiee vd. (2009), betonarme kiriş modeller üzerinde adım adım nihai yükleme durumuna kadar yükleme adımları için dinamik karakteristikleri deneysel ölçüm yöntemiyle belirlemiştir. Çalışmada, kiriş modellerde yükleme adımları sonrasında oluşan değişimler, frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Mod şekillerinin karşılaştırılmasında, Modal Güvence Kriteri (MGK) ve Koordine Modal Güvence Kriteri dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada, ölçekli bir köprü modeli üzerinde kolon üst ucu ve tabliye hasar durumları için deneysel modal analiz ölçüm sonuçlarına göre analitik model güncelleme yöntemiyle değerlendirme yapılmıştır. Hasar değerlendirme işleminde ölçümlerden elde edilen ilk beş doğal frekans, modal sönüm oranları ile mod şekilleri değerleri kullanılmış ve oluşturulan hasar etkileri etkin bir şekilde belirlenebilmiştir.

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.

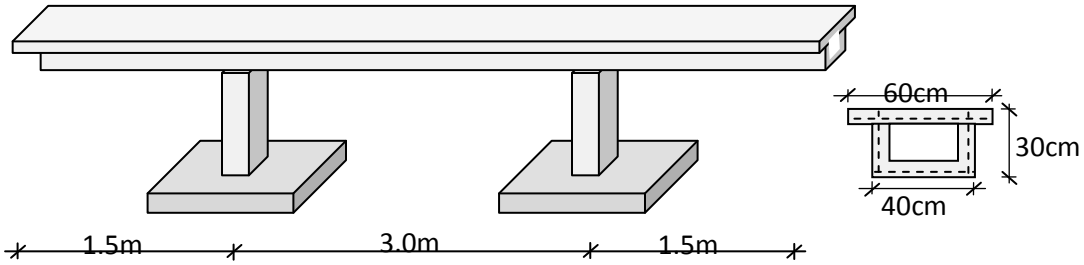
1. Aşama
   1. Başlangıç analitik model oluşturulur.
   2. Hasarsız durum ölçümleri gerçekleştirilir.
   3. Başlangıç analitik model kalibre edilir.
      3.1. Deneysel ölçüm düzeneğinde tanımlanan modelin düğüm noktaları ile analitik olarak oluşturulan modelin düğüm noktaları eşleştirilir.
      3.2. 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. KÖPRÜ MODEL UYGULAMASI

Bu çalışmada, betonarme köprüler üzerinde hasar etkileri içi boş kesitli köprü modeli üzerinde incelenmiştir. Bu köprü modeli laboratuar ortamında oluşturulmuş olup, içi boş kesitli ve 6m uzunluğundadır (Altunışık, 2010). Köprü modeli sağ ve sol uçlardan 1.5m mesafede iki kolon (köprü ayağı) yardımıyla zemine bağlanmıştır. Köprü tabliyesi içi boş kesitli dikdörtgen kesite sahip olup, çeper kalınlığı 8cm'dir. Şekil 1'de betonarme köprü modele ait üç boyutlu görünüm ve kesit özellikleri verilmektedir.



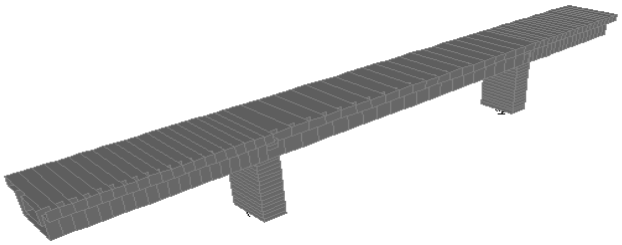
Şekil 1. Köprü modelinin üç boyutlu görünümü ve kesit özellikleri

3.1. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

Köprü modeli sonlu eleman yöntemiyle analitik olarak modellenmiş ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemin modellenmesinde SAP2000 programından yararlanılmıştır. Köprünün modellenmesinde, her noktasında altı serbestliği olan kiriş elemanlar kullanılmıştır. Modelin kolon ayaklarının zemine yarı rijit bağlı olduğu varsayılarak; analitik modellemede mesnetler yay elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Tablo 1'de mesnetler için başlangıç analitik modelde tanımlanan yay sabitleri verilmektedir. Köprü modelini temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik model Şekil 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Köprünün başlangıç analitik modeli için yay sabitleri

	Yay Sabitleri (N/m)			
Sol Mesnet	kx=	2.0*109	rx=	2.0*107
	ky=	2.0*109	ry=	4.0*1011
	kz=	4.0*1011	rz=	2.0*109
Sağ Mesnet	kx=	2.0*109	rx=	2.0*107
	ky=	2.0*109	ry=	4.0*1011
	kz=	4.0*1011	rz=	2.0*109



Şekil 2. Köprüye ait başlangıç analitik model

Analitik modelin köprünün gerçek davranışını temsil edebilmesi amacıyla model farklı sayıda elemanlara bölünmüş ve ağ yakınsaması kontrolü yapılmıştır. Köprüye ait başlangıç analitik modelin oluşturulmasında dikkate alınan malzeme ve kesit özellikleri Tablo 2'de verilmektedir. Köprünün başlangıç analitik modeli üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 2. Köprü modelin malzeme ve kesit özellikleri

		Kolonlar	Tabliye
Elastisite Modülü (N/m^2)		$2.5*10^{10}$	$2.5*10^{10}$
Birim Kütle (kg/m^3)		2550	2550
Kesit Alanı (m^2)		$8.0*10^{-2}$	$10.38*10^{-2}$
Kesit Atalet Momenti (m^4)	Birincil	$2.667*10^{-4}$	$1.023*10^{-3}$
	İkincil	$1.067*10^{-3}$	$2.519*10^{-3}$
Kayma Alanı (m^2)	Birincil	$6.67*10^{-2}$	$5.12*10^{-2}$
	İkincil	$6.67*10^{-2}$	$7.85*10^{-2}$

Tablo 3. Köprünün başlangıç analitik modelinden elde edilen doğal frekanslar

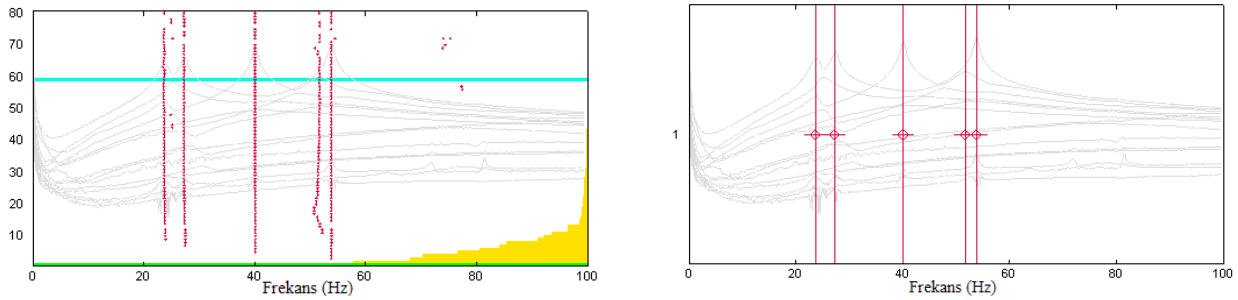
Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)
1	26.035
2	31.037
3	43.050
4	43.197
5	51.399

3.2. Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Köprü modeli üzerindeki ölçümler çevresel titreşim şartları altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde toplam on dört adet tek eksenli sismik ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerler köprü tabliyesi üzerine yatay ve düşey doğrultulardaki titreşimleri ölçecek şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 3'te ivmeölçer bağlantıları ve ölçüm düzeni gösterilmektedir.

Şekil 3. Köprü model üzerinde ivmeölçer yerleşimi ve ölçüm düzeni

Ölçümde köprü modelin ilk beş doğal frekansının ve mod şekillerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, frekans aralığı 0-100Hz olarak seçilerek model üzerinde 10dk'lık ölçüm alınmıştır. Modal parametreler, köprü modeli üzerindeki ölçümde toplanan sinyallerden Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Köprü modelin hasarsız durumu için elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 4'te verilmektedir.



a. Kararlılık diyagramı b. Spektral yoğunluk fonksiyonu

Şekil 4. Köprü modelin hasarsız durum için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu

Spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak doğal frekanslar ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Köprü modelin hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümünden elde edilen ilk beş doğal frekans değerleri ve modal sönüm oranları Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Köprü modelin hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	23.637	2.386
2	27.238	1.954
3	40.086	0.766
4	51.655	3.640
5	53.809	0.582

3.3. Analitik Modelin Kalibre Edilmesi

Köprüye ait başlangıç analitik modelin oluşturulmasında kolon ayaklarının zeminle olan bağlantısı yay elemanlar kullanılarak sağlanmıştı. Ayrıca kullanılan beton malzemenin elastisite değerinin $2.5*10^{10}N/m^2$ olduğu ve malzemenin birim kütlesinin ise inşa aşamasında alınan numunelerden hesaplanan $2550kg/m^3$ değerinde olduğu kabul edilmişti. Bu durum için köprü modelde doğal frekanslarda %4.48'den %16.37'ye varan farklılıklar olduğu görülmektedir. Farklılığın bu şekilde değişim göstermesinin nedeninin mesnet birleşiminde tanımlanan yay sabitlerine bağlı olduğu varsayılarak analitik model kalibre edilmiştir.

Kalibrasyon işleminde daha önceki modellere benzer şekilde doğal frekans, mod şekli ve MGK değerlerinde en fazla %1 farklılık sağlanacak şekilde kriterler ortaya konulmuştur. Bu amaç doğrultusunda mesnetler için tanımlanan yay değerlerinde %10'luk bir değişim olabileceği varsayılarak başlatılan iterasyonlar neticesinde verilen yakınsama kriteri sağlanmıştır. Başlangıç analitik modelde mesnet yaylarındaki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen kalibrasyon neticesinde elde edilen frekans değerleri Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Köprü modelin deneysel ve kalibre edilmiş durum için analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekanslar(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	23.637	23.621	0.07	0.996
2	27.238	27.246	0.03	0.993
3	40.086	40.087	0.00	0.972
4	51.655	---	---	---
5	53.089	53.805	0.01	0.987

Başlangıç analitik modelin mesnetlerindeki yay sabitleri dikkate alınarak yapılan kalibrasyon işlemi sonucunda doğal frekanslar arasındaki farklılık maksimum %0.07'e kadar indirilebilmiştir.

3.4. Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

Köprü model üzerinde yeri ve yaklaşık büyüklüğü belli olan iki hasar durumu oluşturulmuştur. Bu hasar durumları,

- ✓ Kolon üst ucu hasarı
- ✓ Tabliye hasarı

olarak dikkate alınmıştır.

Kolon Üst Ucu Hasarı

Köprü modelde ilk hasar etkisi sol taraftaki kolonun üst ucunda oluşturulmuştur. Hasar etkisi olarak kolon üst ucunda kesit azalması durumu dikkate alınmış ve bu kesit kırıcı matkap yardımıyla zayıflatılmıştır. Şekil 5'te bu hasar durumuna ait görüntüleri ve frekans değerleri verilmektedir.

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	23.809	2.248
2	27.502	1.880
3	38.727	0.705
4	50.304	2.821
5	52.972	0.558

Şekil 5. Köprü modelde kolon üst ucu hasar durumu

Tabliye Hasarı

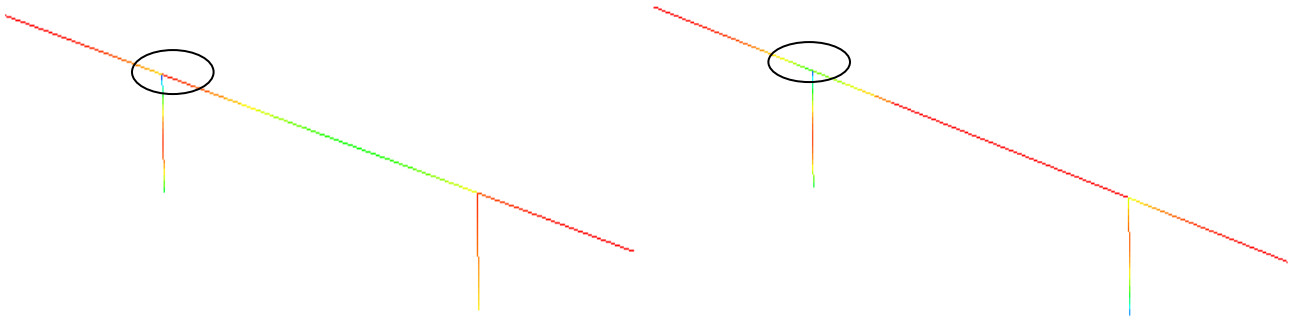
Köprü modelinde ikinci hasar etkisi olarak hasar verilen kolonun tabliye ile birleştiği bölgede tabliyenin enine doğrultuda tamamen çatladığı varsayılmıştır. Bu hasar etkisini oluşturabilmek için tabliye bu kesit boyunca belirli aralıklarla matkap yardımıyla delinmiş ve çelik balyozla konsol kısma vurularak hasar oluşturulmuştur. Şekil 6'da tabliye hasarına ait görüntüler ve frekans değerleri verilmektedir.

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	21.716	2.363
2	25.181	2.232
3	37.127	0.967
4	46.830	4.353
5	51.091	1.071

Şekil 6. Köprü modelde tabliye hasarı durumu

3.5. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Köprü modelde hasar yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, analitik model üzerinde kesit atalet değeri değişken alınarak güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, köprü modelin bütün elemanlarında kesit ataletindeki değişimler için amaç fonksiyonunun sağlanması hedeflenmiştir. Kesit ataleti değişimlerinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi duyarlılık analizi yapılarak belirlenmiştir. Köprü modelde kesit atalet değerindeki değişim dikkate alınarak, hasarsız ve hasarlı frekanslar ve mod şekilleri arasındaki fark en az olacak şekilde adım adım çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Kolon üst ucu ve tabliye hasar durumları için analizler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum için kesit ataletlerindeki değişimler Şekil 7'de verilmektedir.



Kolonun üst ucu hasarı Tabliye hasarı

Şekil 7. Köprü modelde hasar durumları için atalet değerindeki değişimler

Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, her iki hasar durumu için analitik model güncelleme işlemiyle gerçekleştirilen hasar değerlendirmesinin oldukça doğru sonuçlar verdiği görülmektedir. Hasarlı durumu temsil ettiği kabul edilen güncellenmiş analitik model üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen frekans değerleri ile deneysel ölçümden elde edilen frekans değerleri Tablo 6'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 6. Köprü modelde hasar durumları için deneysel ve analitik doğal frekanslar

Mod Numarası	Kolon üst ucu hasarı			Tabliye hasarı		
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)
1	23.809	23.647	0.68	21.716	21.715	0.00
2	27.502	27.263	0.87	25.181	25.180	0.00
3	38.727	38.727	0.00	37.127	37.127	0.00
4	50.304	43.939	12.6	46.835	43.165	8.50
5	52.972	52.696	0.52	51.091	50.914	0.35

4. SONUÇLAR

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

- ✓ Köprü modelin hasarsız durum için ilk beş frekansı 23.637Hz ile 53.809Hz aralığında ölçülmüş; başlangıç analitik modelin modal analizinden ise 26.035Hz ile 51.339Hz aralığında elde edilmiştir. Hasarsız duruma ait frekanslar arasında %4.48 ile %16.37 aralığında farklar belirlenmiştir. Bu farklılıkları ortadan kaldırabilmek amacıyla analitik model güncellenmiş ve frekanslar arasındaki maksimum fark %0.07'ye kadar düşürülebilmiştir.
- ✓ Köprü modeli üzerinde kolon üst ucu ve tabliye hasarı olmak üzere birbirini takiben iki farklı hasar durumu oluşturularak inceleme yapılmıştır. Her iki hasar durumu için ayrı ayrı gerçekleştirilen değerlendirmeden, hasar yerleri oldukça doğru bir şekilde belirlenebilmiştir. Kolon üst ucu hasarı için analitik modelinin güncellenmesi sonucunda elde edilen frekanslar ile hasarlı duruma ait deneysel frekanslar arasındaki fark maksimum %0.87 olarak elde edilmiştir. Köprü modelin bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod vektörlerinin eşleştirilmesi sonucunda MGK değeri en az 0.909 olarak elde edilmiştir. Tabliye hasarı için analitik modelin güncellenmesi sonucunda, analitik ve deneysel frekans değerlerindeki farklılığın maksimum %0.35 olduğu görülmektedir. Köprü modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik mod vektörlerinin eşleştirilmesi sonucunda MGK değeri en az 0.865 olarak elde edilmiştir.

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

KAYNAKLAR

Altunışık, A.C. (2010). Karayolu köprülerinin yapısal davranişlarının analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Baghiee, N., Esfahani, M.R. ve Moslem, K. (2009). Studies on damage and frp strengthening of reinforced concrete beams by vibration monitoring, *Engineering Structures*, **31**, 875-893.

Farrar, C.R. ve Doebling, S.W. (1997). Lessons learned from applications of vibration-based damage ıdentification methods to large bridge structures, Proc. of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, 351-370.

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.

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

Owen, J., S. ve Haritos, N., 2003. Damage Detection in Large-Scale Laboratory Bridge Models, Key Engineering Materials, 245-246, 35-42.

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

Rytter, A. (1993). Vibration based inspection of civil engineering structures, Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.

Sampaio, R.P.C., Maia, N.M.M. ve Silva, J.M.M. (1999). Damage detection using the frequency-response-function curvature method, *Journal of Sound and Vibration*, **226:5**, 1029-1042.

SAP2000 (2008). Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.