

DENGELİ KONSOL BETONARME KÖPRÜLER İÇİN DENEYSEL YÖNTEMLERE DAYALI DOĞAL FREKANS FORMÜLÜ

Soner SÜMERKAN, Alemdar BAYRAKTAR, Temel TÜRKER

Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon/ Türkiye

Özet

Bu çalışmada, ardgermeli dengeli konsol betonarme köprüler için Operasyonel Modal Analiz ve Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı basitleştirilmiş doğal frekans formülü geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen beş adet köprü üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda çevresel titreşimlere dayalı Operasyonel Modal Analiz Yöntemi, üç boyutlu analitik çalışmalarda ise Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra deneysel ve analitik analizleri en yakın sonuç veren köprünün dinamik davranışı için en etkili parametreler belirlenip, bu köprü esas alınarak farklı açıklık ve yükseklikli bir çok köprü modelinin analitik modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden hesaplanan frekans değerleri kullanılarak En Küçük Kareler Yöntemi ile ardgermeli dengeli konsol betonarme köprüler için basitleştirilmiş bir doğal frekans formülü geliştirilmiştir. Geliştirilen formül mevcut köprülerin deneysel sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Giriş

Geçmişten günümüze köprüler, nehirler ve vadiler gibi geçilmesi güç coğrafik oluşumların iki kenarını birbirine bağlayan önemli yapılardır. Köprü yapımı zaman içinde fazlaca ilerlemiş olup, köprünün yapılacağı yerin coğrafik durumuna göre uygulanabilecek yeni köprü tipleri ve yapım metotları geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden ardgermeli dengeli konsol yöntemi, uzun mesafelerin daha az sayıda kolon yapılarak geçilmesini sağlaması açısından özellikle yüksek ayaklara ihtiyaç duyulan derin vadilerin geçilmesinde hem ekonomi hem de zaman açısından avantaj sağlamaktadır. Dengeli Konsol Yöntemiyle inşa edilen köprüler gün geçtikçe artmaktadır. Bu köprüler konusunda araştırmacılar tarafından yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar mevcuttur. Skrinar ve Strukelj (1996), değişken derinlikli bir dengeli konsol köprüde frekansları belirlemek için ölçümler gerçekleştirmiştir. Casas (1997), beton köprülerin konsol yapımında kısmi güvenilirlik faktörlerini belirlemek için çalışmalar yapmıştır. Manjure (2001), dengeli konsol köprülerin rehabilitasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Strommen vd. (2001), dengeli konsol yöntemi ile yapılan kutu kesitli bir betonarme köprünün yapım aşaması sırasında meydana gelen dinamik yük etkilerini araştırmışlardır. Schimdt ve Solari (2003), dengeli konsol köprünün yapımı sırasında üç boyutlu rüzgar etkilerini incelemişlerdir. McDonald (2003), ardgermeli dengeli konsol Palau Köprüsü' nün çökmesini araştırmışlardır. Kwah ve Son (2004a, 2004b), dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen köprülerde tasarım moment değişimlerini açıklık oranlarına göre hesaplamışlardır.

Pimanmas (2007), dengeli konsol yöntemi ile yerinde dilimli olarak inşa edilen köprünün moment dağılımı üzerinde sünme ve öngerilmenin etkisini incelemiştir. Jung vd. (2007), kendi kendine öğrenme simülasyonu kullanarak dilimli köprülerin zamana bağlı davranışının kalibrasyonunu araştırmışlardır. Hewson (2007), dengeli konsol köprüler hakkında bir çalışma hazırlamıştır. Hedjazi vd. (2007), dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen öngerilmeli kutu kesit beton köprülerin zamana bağlı yerdeğiştirme ve gerilmeleri üzerinde sünme etkilerini değerlendirmişlerdir. Morassi ve Tonon (2008), yapmış oldukları çalışmada yüksek seviyede deprem bölgesi olan kuzey doğu İtalya'da bulunan 3 açıklıklı art germeli Palu köprüsünün dinamik karakteristiklerini belirlemek için zorlanmış titreşim testleri yapmışlardır. Gentile ve Bernardini (2008), yapmış oldukları çalışmada 113,3m uzunluğunda ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilmiş olan Capriate Köprüsünde çevresel titreşim testleri yapmışlardır. Ölçümler sırasında radar sensörlü titreşim ölçerler kullanılmıştır. Radar sensörlü ivmeölçerlerle elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri konvansiyonel ivmeölçerlerle elde edilenlerle karşılaştırıldığında sonuçların birbirleriyle uyum içinde oldukları ifade edilmiştir. Marzouk vd. (2008), dengeli konsol köprüler için özel amaçlı bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Kronenberg (2008), köprünün dengeli konsol yöntemi ile yapımı sırasında sürekli beton yerleştirmesi için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Kamaitis (2008), ardgermeli parçalı olarak inşa edilen beton köprülerde birleşim düğümlerinin yapım ve servis sırasındaki davranışını araştırmıştır. Bayraktar vd. (2009), Elazığ-Malatya karayolu üzerinde bulunan, Fırat nehrinin üzerinden geçen Kömürhan Köprüsünün dinamik karakteristiklerini belirlemek için çevresel titreşim testleri yapmışlardır. Simetrik parçalarda ayrı ayrı yapılan çevresel titreşim testlerinin sonucunda elde edilen doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları birbirleriyle karşılaştırıldığında çok yakın değerler elde edildiği ve teorik sonuçlarla uyum içinde oldukları görülmüştür. Liu vd. (2009), 235 m uzunluğundaki üç açıklıklı öngerilmeli ve kutu kesitli betonarme bir karayolu köprüsünün dinamik karakteristiklerini 12 ay boyunca farklı sıcaklık değişimleri altında çevresel titreşim testleriyle deneysel olarak belirlemişlerdir. Vonganan (2009), ikinci Mekong Köprüsü ile ilgili çalışma gerçekleştirmiştir. Pimanmas vd. (2009), Tayland' da dengeli konsol yöntemi ile öngerilmeli beton olarak inşa edilen yeni Phra-Nangklao Köprüsü üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Starossek (2009), Kore' de ardgermeli dengeli konsol yöntemi ile betonarme kutu kesit olarak yapılan Shin Chon Köprüsünü incelemişlerdir. Altunışık vd. (2010), Kömürhan Köprüsünün zamana bağlı malzeme özelliklerini dikkate alarak yapım aşamalı analizini gerçekleştirmişlerdir. Malm ve Sundquist (2010), dengeli konsol yöntemi ile parçalı inşa edilen köprülerin zamana bağlı analizlerini yapmışlardır. Stathapoulos vd. (2010), Yunanistan'da dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen Metsovo Köprüsünün dinamik davranışını araştırmışlardır. Altunışık vd. (2011) Giresun – Espiye karayolunda bulunan dengeli konsol yöntemiyle inşa edilmiş olan Gülburnu viyadüğünün dinamik davranışını çevresel titreşim testleri kullanılarak belirlenmişlerdir. Ateş (2011), dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen sürekli kutu kesitli beton köprülerin dinamik davranışını malzeme özelliklerini zaman bağlı dikkate alarak incelemiştir. Turan (2012), dengeli konsol betonarme karayolu köprülerinin dinamik karakteristikleri analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Ateş vd. (2013), yapı-zemin etkileşimi ve zamana bağlı malzeme özelliklerini dikkate alarak kutu kesitli beton karayolu köprülerinin davranışını incelemişlerdir. Kudu vd. (2014), ardgermeli dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen Berta Köprüsü'nün Sonlu


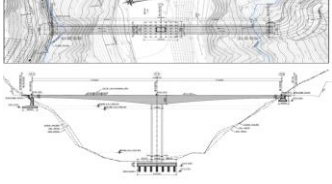

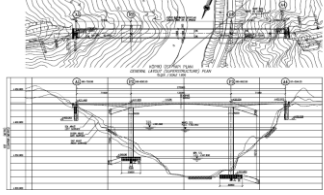

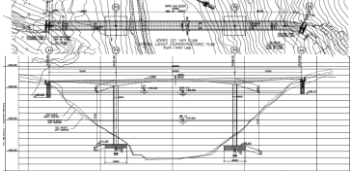

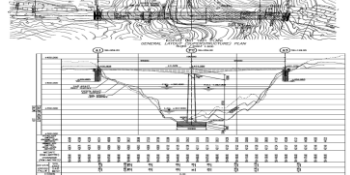

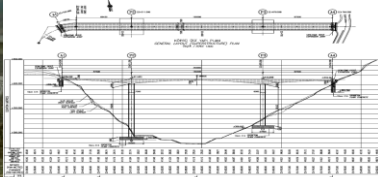
Elemanlar Yöntemi ve Çevresel Titreşim Yöntemini kullanarak dinamik karakteristiklerini elde etmişlerdir. Sumerkan (2014) ve Sumerkan vd. (2014), ardgermeli dengeli konsol betonarme köprülerin doğal frekanslarını belirlemek için analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada, ardgermeli dengeli konsol köprülerin doğal frekanslarının analitik olarak belirlenebilmesi için Operasyonel Modal Analiz ve Sonlu Eleman Yöntemlerine dayalı basitleştirilmiş bir formül geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Artvin – Erzurum karayolu üzerinde inşa edilen beş adet dengeli konsol köprünün deneysel ve analitik çalışmaları esas alınarak, analizler bir çok köprü modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak En Küçük Kareler Yöntemi ile ardgermeli dengeli konsol köprülerin 1.enine frekansı için basitleştirilmiş bir formül önerilmiştir.

Köprülerin Deneysel ve Sonlu Eleman Analizleri

Seçilen bütün dengeli konsol betonarme köprüler, Artvin ilinde farklı vadi geçişlerini sağlamak için inşa edilmiştir. Köprülerin genel karakteristikleri, görünüşleri ve boyutları Tablo 1-2'de verilmektedir. Aşağıda seçilen köprülerin Çevresel Titreşim Yöntemine dayalı deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı analitik analizleri sunulmaktadır.

Table 1. Köprülerin Görünüş ve Kesitleri

Köprü	Görünüş	Kesitler (Köprü Projeleri, 2007)
Ortaköy		
Akarsın		
Budan		
Sengan		
Berta		

Tablo 2. Köprülerin Genel Karakteristikleri

Köprü	Yer	Yapım Yılı	Maks. Açıklık (m)	Uzunluk (m)	Genişlik (m)	Yükseklik (m)	Açıklık Sayısı
Ortaköy	Artvin	2011	77,2	154,4	12	69	2
Akarsın	Artvin	2011	132	275	12	109,7	3
Budan	Artvin	2011	165	350	12	106,7	3
Sengan	Artvin	2011	95	190	12	106,2	2
Berta	Artvin	2011	165	340	12	124,6	3

Köprülerin Çevresel Titreşim Testleri

Köprülerin dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprülerin her iki yakasından ikişer ölçüm alınmak suretiyle dört adımda referanslı olarak tek çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Ölçümler sırasında doğal titreşim olarak rüzgâr, yaya ve köprü üzerindeki araç geçişlerinden yararlanılmıştır. Ölçümler 0-12.5 Hz aralığında, veri analizleri ise 0-3.125 Hz frekans aralığında yapılmış ve ölçüm süresi 30 dakika seçilmiştir. Ölçümler için referans noktası olarak köprü orta açıklığının orta noktası başka bir deyişle her iki orta ayak konsolunun birbirleriyle birleştiği nokta seçilmiştir. Ölçümlerde tek eksenli sismik ivme ölçerler (B&K8340) ve 17 kanallı datalogger (B&K3560) kullanılmıştır. İvmeölçerler belirlenen noktalara düşey ve enine olmak üzere iki doğrultuda yerleştirilmiştir. Sinyallerin işlenmesi ve değerlendirilmesi için PULSE (2006) ve OMA (2006) yazılımları kullanılmıştır. Dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde EFDD Yöntemi dikkate alınmıştır. İvme ölçer yerleri, spektrumlar ve görünüşler Tablo 3'te verilmektedir.

Köprülerin Sonlu Eleman Analizleri

Köprülerin teorik dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirlemek için üç boyutlu sonlu eleman modelleri, proje boyut ve malzeme özellikleri (Köprü Projeleri, 2007) ve SAP2000 (2010) programı kullanılarak aşağıda belirtilen modelleme kriterlerine göre oluşturulmuştur:

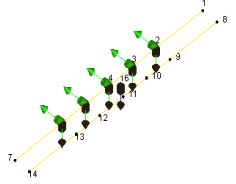
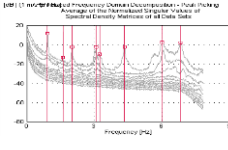

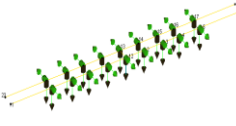
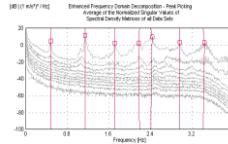

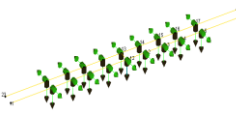
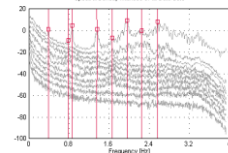

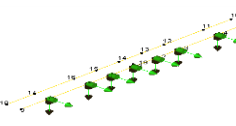
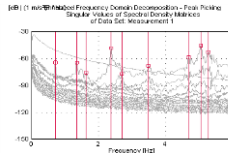

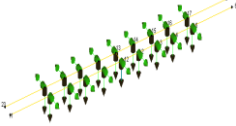
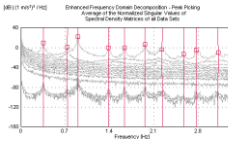

- Köprü SAP2000 programının "Bridge" sekmesi kullanılarak modellenmiştir. Değişken kutu kesitli tabliye boyutları parametrik varyasyonlar tanımlanarak proje verilerine göre çizilmiştir. Orta ayaklarda ve tabliyede segment boyları 5m olarak tanımlanmıştır.
- Orta ayaklarla tabliyenin birleşimleri projede olduğu gibi rijit olarak tanımlanmış olup, tabliye birleşiminden önceki son 1m'leri dolu kesit alınmıştır.
- Kenar ayakların ve orta ayakların köprü tabliyesi ile birleşimlerinde 1m kalınlığında diyaframlar tanımlanmıştır.
- Kutu kesitli tabliyenin üstünde kullanılan öngerme halatları ve altında kullanılan ardgerme halatları proje verilerine uygun boy ve sayıda tanımlanmıştır.

- Kenararak mesnetleri belli rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır.

Köprülerin Analitik ve Deneysel Frekansların Karşılaştırılması

Türkiye-Artvin-Erzurum karayolunda bulunan, dengeli konsol yöntemi ile yapılmış olan 5 adet köprünün Çevresel Titreşim Testleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemi elde edilen doğal frekansları Tablo 4'te karşılaştırılmaktadır. Yapılan çevresel titreşim testlerinde boyuna yönde ivmeölçer kullanılmadığından dolayı, boyuna modlara karşılık gelen doğal frekanslar ölçülememiştir. Bu sebepten deneysel modlara karşılık boyuna doğal frekanslar Tablo 4'te gösterilmemiştir.

Tablo 3. İvme Ölçer Yerleri, Spektrumlar ve Görünüşler

Köprü	Çevresel Titreşim Testi		
	İvme Yerleri	Spektrumlar	Görünüşler
Ortaköy			
Akarsın			
Budan			
Sengan			
Berta			

Tablo 4. Deneysel ve Teorik Analizlerden Elde Edilen Doğal Frekanslar

Mod No	Akarsın		Budan		Berta		Sengan		Ortaköy	
	Deney	Teorik	Deney.	Teorik	Deney.	Teorik	Deney.	Teorik	Deney.	Teorik
1	0,484	0,544	0,389	0,379	0,354	0,394	-	0,780	-	0,815
2	-	0,560	-	0,498	-	0,444	0,716	0,855	0,923	1,166
3	1,147	0,980	0,788	0,697	0,749	0,720	1,353	1,447	1,639	2,111
4	1,714	1,091	0,863	0,737	0,867	0,773	1,639	2,173	2,016	3,384
5	-	1,600	1,354	1,393	1,372	1,465	2,389	2,488	3,084	3,534
6	2,190	1,730	1,664	1,520	1,648	1,501	-	2,727	3,253	3,620
7	2,409	2,140	1,958	1,916	-	1,880	2,711	2,812	-	5,840

Köprü Frekansını Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi

Köprü doğal frekansını etkileyen başlıca faktörler kütle ve rijitliktir. Rijitlik, yükseklik, elastisite modülü ve atalet momentine bağlıdır. Bu faktörlerin doğal frekansını ne kadar etkilediği teorik model üzerinde incelenecektir. Tablo 4'ten görüldüğü gibi çevresel titreşim testleri sonucunda elde edilen doğal frekanslarla teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekansların birbirine en yakın olduğu köprü Budan Köprüsüdür.

Bu nedenle 1. doğal frekansını etkileyen parametrelerin seçilmesinde Budan Köprüsü'nün teorik modeli kullanılacaktır. Budan Köprüsü'nün proje verilerine göre oluşturulan teorik modelinde kullanılan elastisite modülü, ayak yükseklikleri, beton birim hacim ağırlığı ve atalet momentleri Tablo 5' te verilmektedir. Köprü'nün 1. modu enine ve kolon eğilmesine bağlı olduğundan köprü'nün boyuna eksenine etrafındaki kolon atalet momenti dikkate alınmıştır.

Tablo 5. Budan Köprüsü Malzeme ve Kesit Özellikleri

1. Doğal Frekans (Hz)	Elastisite Modülü (kN/m)	Ayak Yükseklikleri (m)		Beton Birim Ağırlık (kN/m ³)	Atalet Momentleri (m ⁴)	
		P2	P3		P2	P3
0,3787	32000000	101,2	107,2	24,5	203,31	203,31

Budan Köprüsü' nün elastisite modülü, ayak yükseklikleri, kütle ve atalet momentleri değerleri ayrı ayrı %10 değiştirildiğinde 1. doğal frekansın aldığı değerler ve değişim oranları Tablo 6' da verilmektedir. Tablo 6' da "%" lerin önündeki (-) azaltmayı, (+) arttırmayı göstermektedir.

Tablo 6. Frekansın Parametrelere Bağlı Değişim Oranları

	Mevcut Değer	Elastisite Modülü (- %10)	Ayak Yükseklikleri (+%10)	Kütle (+ %10)	Atalet Momenti (- %10)
1. Doğal Frekans (Hz)	0,3787	0,3593	0,3580	0,3611	0,3710
% Değişim	-	-%5,1	-%5,5	-%4,6	-%2

Tablo 6' dan görüldüğü gibi köprünün 1.doğal frekansını etkileyen en önemli faktör ayak yükseklikleridir. Elastisite modülü ve kütlede belirgin olarak etkilidir. Atalet momentinin etkisi bu üçüne nazaran daha azdır. İncelenmiş olunan köprülerde aynı sınıf beton kullanıldığından elastisite modülleri aynıdır. 5 adet köprüde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen 1. doğal frekansların değişiminde elastisite modülü bütün köprülerde aynı olduğundan dolayı gözardı edilmiştir. Atalet momentinin 1. doğal frekansa etkisi nispeten daha az olduğu için dikkate alınmamıştır. Köprü yüksekliği ve kütle, 1. doğal frekansını etkileyen parametreler olarak seçilmiştir. İncelenmiş olunan 5 adet köprünün üstyapı kesiti birbirlerine yakındır. Bu nedenle üstyapı kesitleri arasındaki küçük farklılıklar ihmal edilip, köprü kütleleri köprü uzunluklarıyla doğru orantılı olarak kabul edilmiştir. 1. doğal frekansın değişiminde parametre olarak köprü kütlesi yerine köprü uzunluğu dikkate alınmıştır. Frekansını etkileyen başlıca önemli parametreler olarak yükseklik ve uzunluk seçilmiştir.

Köprü Doğal Frekans Formülünün Geliştirilmesi

Dengeli konsol köprülerin doğal frekansını hesaplayabilen formül geliştirmek amacıyla, farklı yükseklik ve uzunluklar için birçok modal analiz gerçekleştirilerek Tablo 7 verilen 1.enine doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Girdi olarak alınan yükseklik ve uzunluğa bağlı olarak elde edilen doğal frekanslar arasındaki ilişkinin ikinci derece polinom olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, polinomun katsayıları En Küçük Kareler Yöntemi ile hesaplanarak, dengeli konsol betonarme köprüler için 1.enine doğal frekansını veren formül elde edilmiştir.

Tablo 7. Farklı Yükseklik ve Uzunluklar İçin Köprü Doğal Frekansları

Yükseklik (m)	Uzunluk (m)	1. Enine Doğal Frekans (Hz)
80	350	0,454
90	350	0,415
100	350	0,385
110	350	0,363
90	340	0,488
100	340	0,446
110	340	0,414
120	340	0,390
85	330	0,456
95	330	0,424
105	330	0,400
115	330	0,383
85	320	0,479
95	320	0,446
105	320	0,422
115	320	0,403
80	300	0,540
90	300	0,501
100	300	0,473
110	300	0,451
75	290	0,565
85	290	0,522
95	290	0,491
105	290	0,468
80	275	0,600
90	275	0,562
100	275	0,535
110	275	0,514
80	190	0,804
90	190	0,774
100	190	0,751
110	190	0,731
70	180	0,922
80	180	0,880
90	180	0,848
100	180	0,822
80	170	0,965
90	170	0,931
100	170	0,903
110	170	0,876
70	160	1,107
80	160	1,062
90	160	1,027
100	160	0,995

Aşağıdaki formülde, H ve L metre cinsinden sırasıyla köprü maksimum yüksekliği ve toplam uzunluğunu göstermektedir.

$$f_{1enine} = 2,806 - 0,010510 * H - 0,009699 * L + 0,00003977 * H^2 + 0,00001353 * L^2$$

Bu formül deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlarla kontrol edilmiş ve Tablo 8' de karşılaştırılmıştır. Tablo 8' den görülebileceği gibi elde edilen basitleştirilmiş formül, ardgermeli dengeli konsol köprüler için birbirine yakın sonuçlar vermektedir.

Tablo 8. Dengeli Konsol Köprüler İçin Elde Edilen Formülün Kontrolü

Frekans (Hz)	Budan		Akarsın		Berta		Sengan		Ortaköy	
	Deneysel	Formül	Deneysel	Formül	Deneysel	Formül	Deneysel	Formül	Deneysel	Formül
f _{tenine}	0,389	0,400	0,484	0,488	0,354	0,380	0,716	0,784	0,923	1,095

Sonuçlar

Bu çalışmada, ardgermeli dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen ve kolon kiriş birleşimleri rijit olan beton köprüler için basitleştirilmiş bir doğal frekans formülü hesaplanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Artvin - Erzurum yolunda 2008-2011 yılları arasında inşa edilen 5 adet dengeli konsol köprü seçilmiştir. Köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde deneysel ve analitik yöntemler kullanılmıştır. Deneysel dinamik karakteristikler Çevresel Titreşim Testleri ile belirlenmiştir. Teorik dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için köprülerin üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. 5 adet köprüden deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda birbirine en yakın verilerin Budan Köprüsü' ne ait olduğu tespit edilmiştir. 1. doğal frekansı etkileyen parametrelerin belirlenmesi için kullanılacak teorik model olarak Budan Köprüsü'nün teorik modeli seçilmiştir. Teorik model üzerinde 1. doğal frekansı etkilediği düşünülen parametreler birbirinden bağımsız olarak değiştirilerek, köprü yükseklik ve uzunluğunun 1. enine doğal frekansı etkileyen en önemli parametreler olduğu görülmüştür. Budan Köprüsü sonlu eleman modeli kullanılarak farklı yükseklik ve uzunluklar için birçok analitik modal analiz yapılmıştır. Bu analiz sonuçları kullanılarak En Küçük Kareler Yöntemi ile basitleştirilmiş 1.enine doğal frekans formülü elde edilmiştir. Basitleştirilmiş bu formül ardgermeli dengeli konsol köprülerin hem tasarım aşaması hem de yapım sonrası güvenliklerinin belirlenmesinde, başlangıç sonlu eleman model kontrolleri için kullanılabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Çalışmaya katkılarından dolayı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, DOLSAR Mühendislik Limited Şirketi, PÖRYR infra limited, Sümerkan İnşaat ve Yrd.Doç.Dr. Hasan Basri BAŞAĞA'ya teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S., Domaniç, A., 2010. Construction stage analysis of Kömürhan highway bridge using time dependent material properties, *Structural Engineering and Mechanics*, 36 (2), pp. 207-223.
2. Altunışık, A. C., Bayraktar, A., Sevim, B., Ateş, Ş. 2011. Ambient Vibration Based Seismic Evaluation of Isolated Gülburnu Highway Bridge, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 11, 1496-1510.
3. Ates, Ş., 2011. Numerical modelling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages, *Applied Mathematical Modelling*, 35 (8), pp. 3809-3820.
4. Ates, S., Atmaca, B., Yildirim, E., Demiroz, N.A., 2013. Effects of soil-structure interaction on construction stage analysis of highway bridges, *Computers and Concrete*, 12 (2), pp. 169-186.
5. Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Domaniç, A., Taş, Y., 2009. Vibration characteristics of Kömürhan highway bridge constructed with balanced cantilever method, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23 (2), pp. 90-99.
6. Köprü Projeleri, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, DOLSAR Mühendislik Limited Şirketi, PÖYRY infra limited, 2007, Ankara.
7. Casas, J.R. 1997. Reliability-based partial safety factors in cantilever construction of concrete bridges, *Journal of Structural Engineering*, 123 (3), pp. 305-312.
8. Gentile, C. ve Bernardini, G., 2008. Output-only modal identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 41, 544-553.
9. Hewson, N., 2007. Balanced cantilever bridges, *Concrete (London)*, 41 (10), pp. 59-60.
10. Hedjazi, S., Rahai, A., Sennah, K., 2007. Evaluation of creep effects on the time-dependent deflections and stresses in prestressed concrete bridges, *Bridge Structures*, 3 (2), pp. 119-132.
11. Jung, S., Ghaboussi, J., Marulanda, C., 2007. Field calibration of time-dependent behavior in segmental bridges using self-learning simulation, *Engineering Structures*, 29 (10), pp. 2692-2700.
12. Kamaitis, Z., 2008. Field investigation of joints in precast post-tensioned segmental concrete bridges, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 3 (4), pp. 198-205.
13. Kronenberg, J., 2008. Continuous concrete placing during balanced cantilever construction of a bridge, *Concrete Engineering International*, 12 (3), pp. 38-39.
14. Kudu, F.N., Bayraktar, A., Bakir, P.G., Türker, T., Altunışık, A.C. 2014. Ambient vibration testing of Berta Highway Bridge with post-tension tendons, *Steel and Composite Structures*, 16 (1), pp. 23-46.
15. Kwak, H.-G., Son, J.-K., 2004a. Span ratios in bridges constructed using a balanced cantilever method, *Construction and Building Materials*, 18 (10), pp. 767-779.

16. Kwak, H.-G., Son, J.-K., 2004b.Design moment variations in bridges constructed using a balanced cantilever method, *Construction and Building Materials*, 18 (10), pp. 753-766.
17. Liu, C., DeWolf, J.T. ve Kim, J., 2009.Development of a baseline for structural health monitoring for a curved post-tensioned concrete box girder bridge, *Engineering Structures*, 31, 3107-3115.
18. Manjure, P.Y., 2001. Rehabilitation of balanced cantilever bridges, *Indian Concrete Journal*, 75 (1), pp. 76-82.
19. Malm, R., Sundquist, H. 2010. Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges, *Engineering Structures*, 32 (4), pp. 1038-1045.
20. Marzouk, M., Said, H., El-Said, M., 2008. Special-purpose simulation model for balanced cantilever bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 13 (2), pp. 122-131.
21. McDonald, B., Saraf, V., Ross, B., 2003.A spectacular collapse: Koror-Babeldaob (Palau) balanced cantilever prestressed, post-tensioned bridge, *Indian Concrete Journal*, 77 (3), pp. 955-962.
22. Morassi, A. ve Tonon, S., 2008. Dynamic Testing for Structural Identification of a Bridge, *Journal of Bridge Engineering*, 13, 573-585.
23. OMA, Operational Modal Analysis, Release 4.0, *Structural Vibration Solution A/S*, Denmark 2006.
24. Pimanmas, A., 2007. The effect of long-term creep and prestressing on moment redistribution of balanced cantilever cast-in-place segmental bridge, *Songklanakarın Journal of Science and Technology*, 29 (1), pp. 205-216.
25. Pimanmas, A., Imsombat, S., Neilsen, K.Hj., 2009. New Phra-Nangklao bridge - A balanced cantilever prestressed concrete bridge in Thailand, *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 19 (1), pp. 38-40.
26. PULSE. Analyzers and Solutions, Release 11.2. *Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S*, Denmark. 2006.
27. SAP2000, *Structural Analyses Program*, Computers and Structures Inc., 2010.

Anahtar Sözcükler: Ardgermeli Dengeli Konsol Köprüler, Basitleştirilmiş Frekans Formülü, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi.