

KARAYOLU KÖPRÜLERİNİN MODAL DAVRANIŞINA KUTU KESİTLİ KİRİŞ ŞEKLİNİN ETKİSİ

Mehmet AKKÖSE

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Müh. Bölümü, 61080, Trabzon
Tel: 0 (462) 377 26 28 E-mail: akkose@ktu.edu.tr

Özet

Dünyanın en aktif deprem kuşaklarından birinde bulunan ülkemizde betonarme karayolu köprülerinin depremlerde hasar görmesi, can ve mal kaybının yanı sıra il, ilçe ve köylere ulaşımın aksamasına sebep olabilmektedir. Bu sebeple planlanmaları, projelendirilmeleri ve inşası önemli mühendislik bilgi ve tecrübesi gerektiren karayolu köprülerinin deprem gibi dinamik etkiler altındaki yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Son yıllarda, uzun açıklıklı köprülerin yapımında büyük burulma rijitliğine sahip betonarme kutu kesitli kirişler sıklıkla tercih edilmektedir. Kutu kesitli kirişlerde üst başlık, hem yol tabliyesi olarak kullanılabilmekte hem de düşey veya eğik gövde elemanlarına yüklerin aktarılmasını sağlayabilmektedir. Ayrıca klasik köprülerle karşılaştırıldıklarında kutu kesitli köprülerin titreşim etkilerine karşı daha dirençli oldukları da bilinmektedir. Uygulamada tek veya çok gözlü kutu kesitli kirişler, dikdörtgen veya trapezoidal en kesite sahip olabilmektedir. Bu çalışmada, karayolu köprülerinin modal davranışına kutu kesitli kirişlerin en kesit şekillerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, tek gözlü dört farklı kiriş en kesiti dikkate alınarak CSIBridge (2015) programında modellenen karayolu köprüsünün modal analizleri gerçekleştirilmiş ve kutu kesitli kiriş en kesit şekillerinin karayolu köprülerinin modal davranışına etkisi incelenmiştir.

Giriş

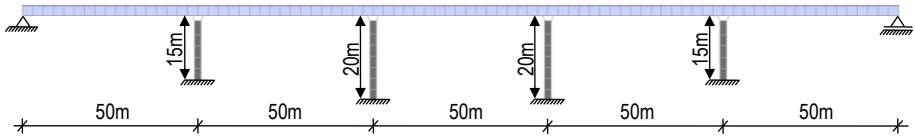
Tabliye yapıyı oluşturan 3-5 metrelik segmentlerin prefabrik veya yerinde dökme tekniği kullanılarak birleştirilmesiyle yapılan köprülerin inşası 1950'li yıllara kadar uzanmaktadır. Bununla birlikte, son zamanlarda geleneksel yerinde beton dökümüyle yapımı gerçekleştirilen köprü inşaatı, yerini prefabrik segmentli köprü inşaatına bırakmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi, prefabrik segmentli köprü inşaatının inşaat kalitesini yükseltmesi ve yapım süresini kısaltmasıdır (Anagnostopoulou, 2009).

Prefabrik segmentli köprü üstyapısının yapımı için yaygın olarak iki yöntem kullanılmaktadır: *Dengeli konsol yöntemi* ve *Açıklık boyunca inşa yöntemi* (FHWA, 2013). Bu yöntemlerde, prefabrik kutu kesitli kirişler köprülerin üst yapı en kesitinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünyanın en aktif deprem kuşaklarından birinde bulunan ülkemizde betonarme karayolu köprülerinin planlanmaları, projelendirilmeleri ve inşası önemli mühendislik bilgi ve tecrübesi gerektirmektedir. Son yıllarda, uzun açıklıklı köprülerin yapımında büyük burulma rijitliğine sahip betonarme kutu kesitli kirişler sıklıkla tercih edilmektedir.

Kutu kesitli kirişlerde üst başlık, hem yol tabliyesi olarak kullanılabilmekte hem de düşey veya eğik gövde elemanlarına yüklerin aktarılmasını sağlayabilmektedir. Ayrıca klasik köprülerle karşılaştırıldıklarında kutu kesitli köprülerin titreşim etkilerine karşı daha dirençli oldukları da bilinmektedir. Uygulamada tek veya çok gözlü kutu kesitli kirişler, dikdörtgen veya trapezoidal en kesite sahip olabilmektedir. Bu çalışmada, karayolu köprülerinin modal davranışına kutu kesitli kirişlerin en kesit şekillerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, tek gözlü dört farklı kiriş en kesiti dikkate alınarak CSIBridge (2015) programında modellenen karayolu köprüsünün modal analizleri gerçekleştirilmiş ve kutu kesitli kiriş en kesit şekillerinin karayolu köprülerinin modal davranışına etkisi incelenmiştir.

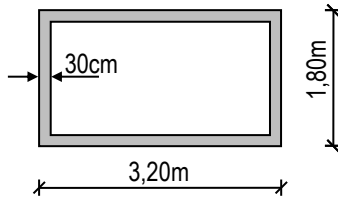
Sayısal Uygulama

Bu çalışmada, karayolu köprülerinin modal davranışına kutu kesitli kiriş şeklinin etkisi incelenmiştir. Bunun amaçla, öncelikle genişliği 9,6m ve toplam uzunluğu 250m olan bir karayolu köprüsü CSIBridge (2015) programı yardımıyla modellenmiştir. Köprü, her bir açıklığı 50m olan toplam 5 açıklık şeklinde tasarlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Karayolu köprüsü

Köprü'nün taşıyıcı sisteminde 2 adet 15m ve 2 adet 20m yüksekliğe sahip toplam 4 adet kolon ayak mevcuttur (Şekil 1). Köprü ayağının en kesiti Şekil 2'de görülmektedir. Köprü'nün sol kenar ayağı sabit mesnet, sağ kenar ayağı ise boyuna uzamaya izin verilen hareketli mesnet tipinde dikkate alınmıştır.

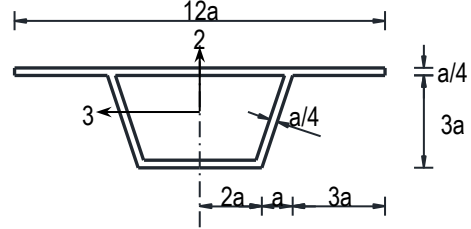
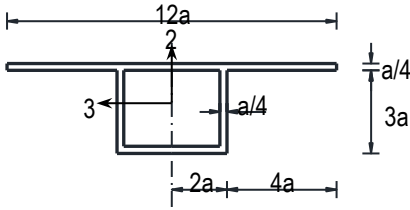


Şekil 2. Köprü ayak en kesiti

Karayolu köprülerinin modal davranışına kutu kesitli kiriş şeklinin etkisini incelemek üzere köprü tabliyesi, tek hücreli dört farklı kutu kesit ile ayrı ayrı tanımlanmıştır. Köprü tabliyesinde kullanılan kutu kesitler (Pindado vd., 2005) ve bazı özellikleri Şekil 3'te verilmiştir. Karayolu köprüsünün tabliyesinde, kolon ayaklarında ve başlık kirişinde kullanılan malzeme özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

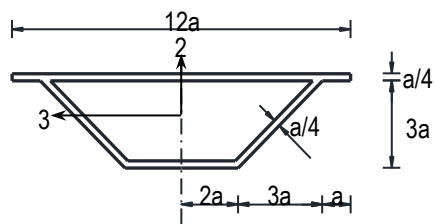
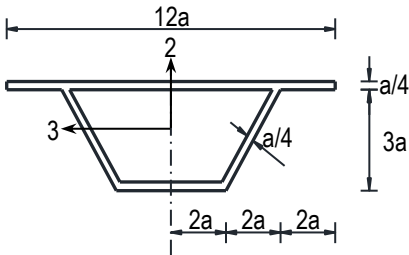
Tablo 1. Karayolu köprüsünde kullanılan malzeme özellikleri

Köprü Tabliyesi	Kolon Ayakları ve Başlık Kirişi
C40	C30
E= 34000MPa	E= 32000MPa
$\nu= 0.20$	$\nu= 0.20$
$\gamma= 25\text{kN/m}^3$	$\gamma= 25\text{kN/m}^3$



Kutu Kesit 1 (KK-1)	
A	= 3,44 m ²
I ₂₂	= 17,2747 m ⁴
I ₃₃	= 3,3640 m ⁴
J	= 4,0195 m ⁴

Kutu Kesit 2 (KK-2)	
A	= 3,45m ²
I ₂₂	= 18,6584 m ⁴
I ₃₃	= 3,3986 m ⁴
J	= 5,4826 m ⁴

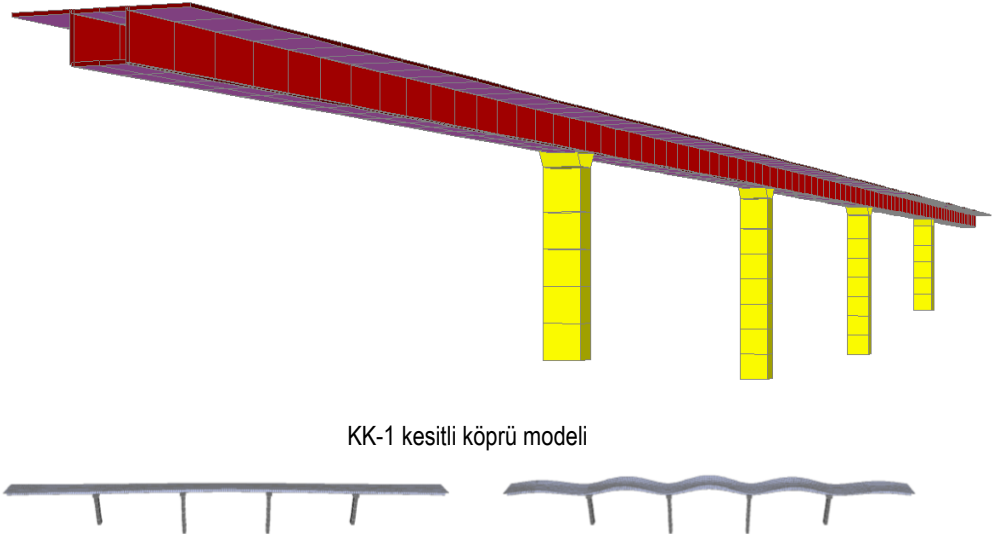


Kutu Kesit 3 (KK-3)	
A	= 3,47 m ²
I ₂₂	= 20,4535 m ⁴
I ₃₃	= 3,4329 m ⁴
J	= 6,5448 m ⁴

Kutu Kesit 4 (KK-4)	
A	= 3,48 m ²
I ₂₂	= 22,6600 m ⁴
I ₃₃	= 3,4670 m ⁴
J	= 7,2405 m ⁴

Şekil 3. Köprü tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekilleri (a=80cm)

Köprü tabliyesinde Kutu Kesit 1 (KK-1), Kutu Kesit 2 (KK-2), Kutu Kesit 3 (KK-3) ve Kutu Kesit 4 (KK-4) dikkate alınarak gerçekleştirilen modal analiz neticesine elde edilen ilk 20 mod, Şekil 4-7'de verilmiştir. Bu mod şekilleri, modal katkı faktörleri yardımıyla Tablo 2-5'te tanımlanmıştır. Modal katkı faktörleri, sistemin mod şekliyle doğrudan ilişkilidir. Onların gerçek büyüklükleri ve işaretleri önemli değildir. Önemli olan şey, bir mod için verilen üç faktörün göreceli değerleridir (SAP2000, 2008; Sayed-Ahmed and Sennah, 2013). Tablo 2-5'ten de görüleceği üzere köprü davranışında burulma ve eğilme modları hâkimdir. Burulma modlarında, enine yer değiştirme ve eğilme davranışının; eğilme modlarında ise boyuna ve düşey yer değiştirme davranışının katkısı görülmektedir.



Mod 1



Mod 11



Mod 2



Mod 12



Mod 3



Mod 13



Mod 4



Mod 14



Mod 5



Mod 15



Mod 6



Mod 16



Mod 7



Mod 17



Mod 8



Mod 18



Mod 9



Mod 19



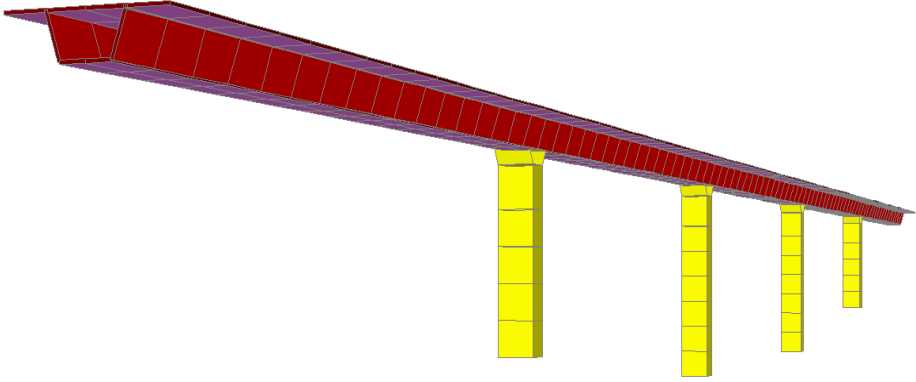
Mod 10



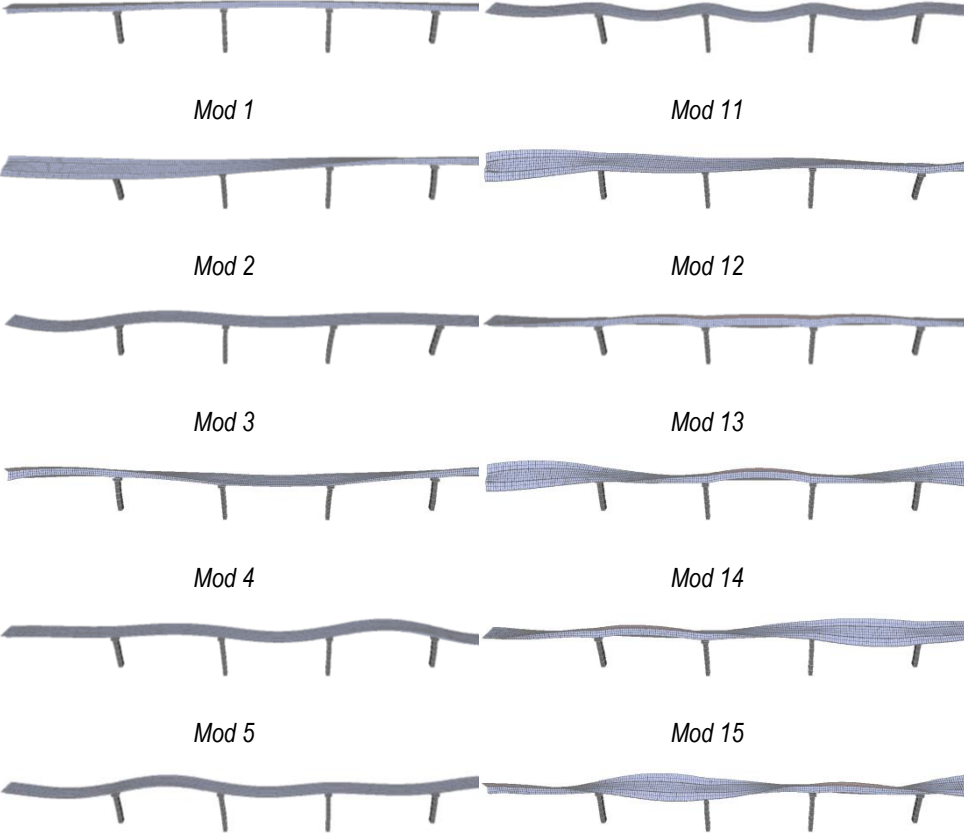
Mod 20

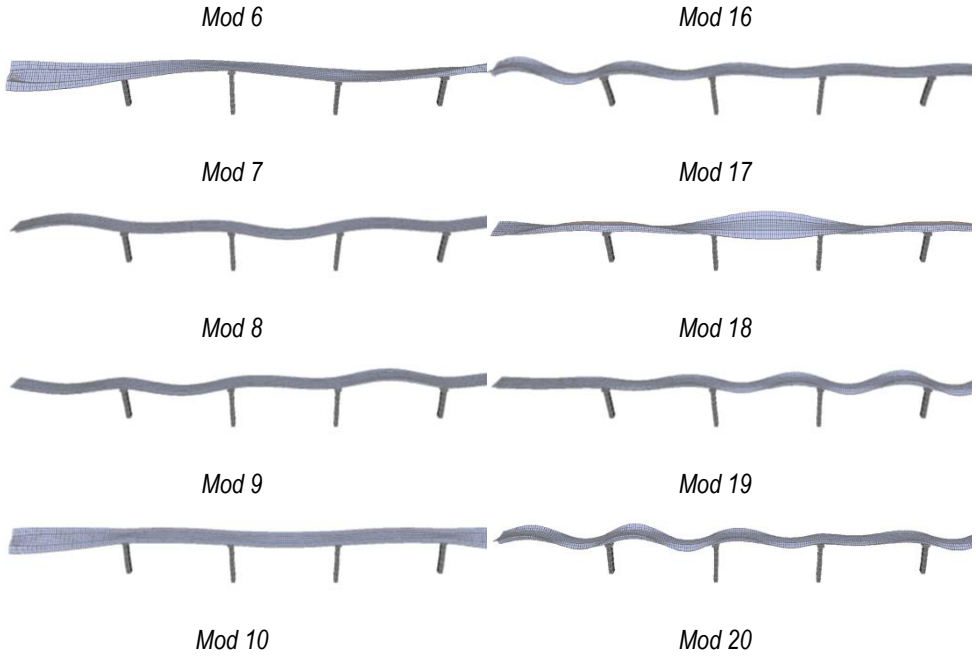


Şekil 4. KK-1 kesitli köprünün ilk 20 mod şekli

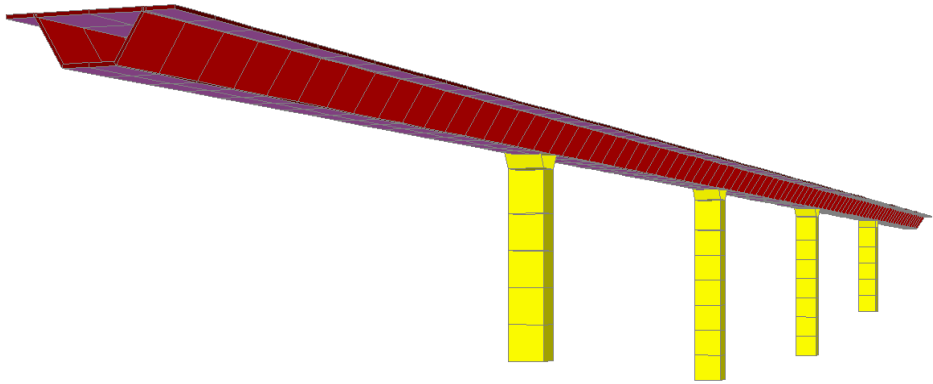


KK-2 kesitli köprü modeli

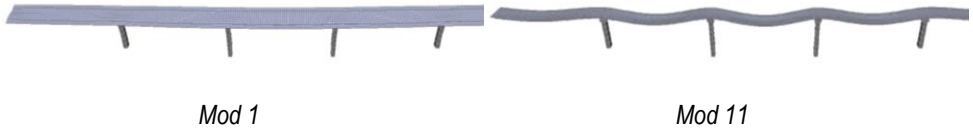


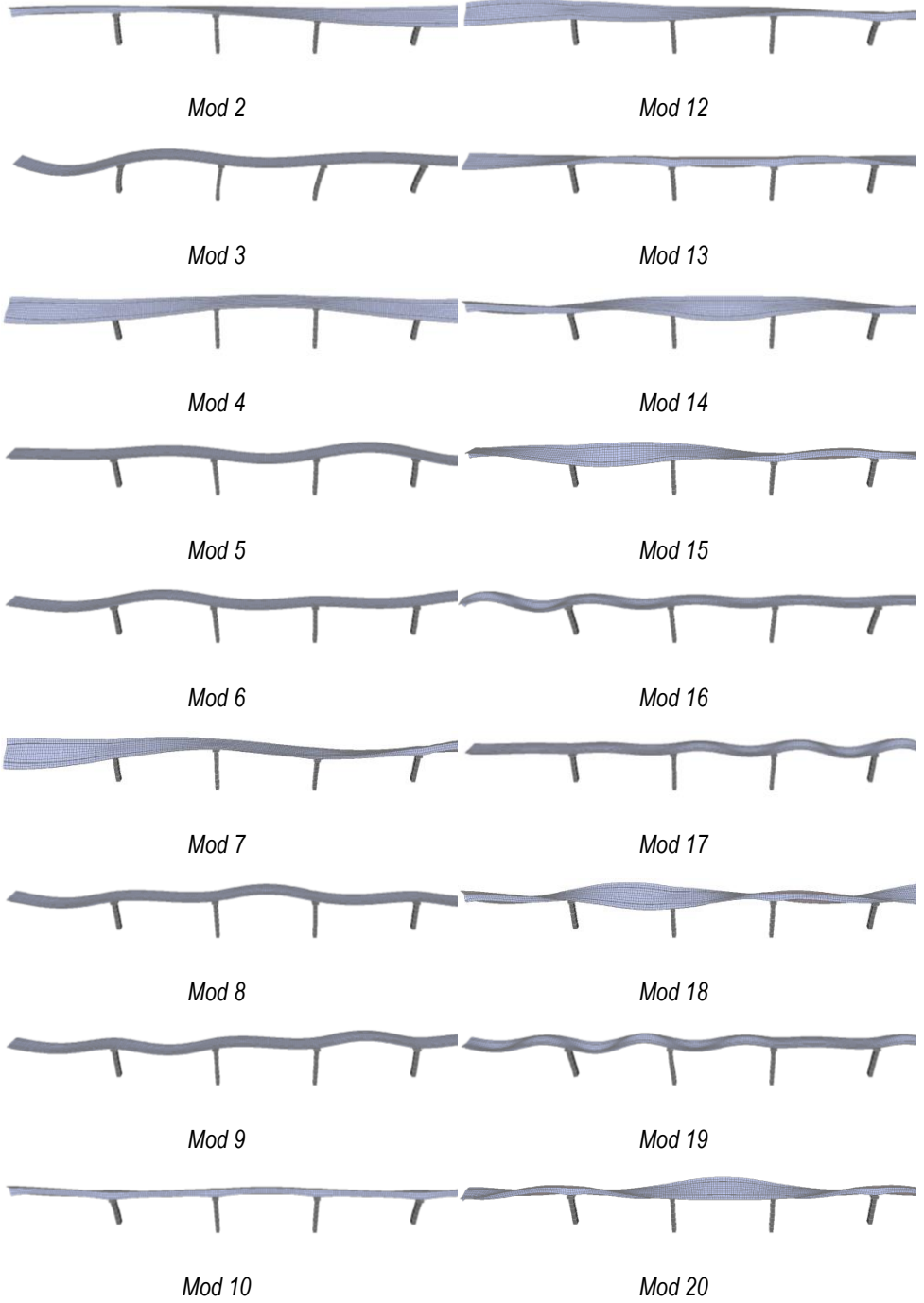


Şekil 5. KK-2 kesitli köprünün ilk 20 mod şekli

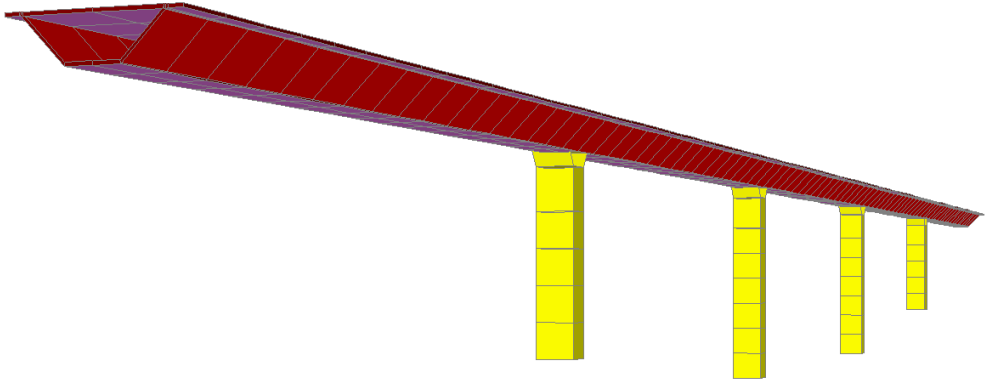


KK-3 kesitli köprü modeli





Şekil 6. KK-3 kesitli köprünün ilk 20 mod şekli



KK-4 kesitli köprü modeli



Mod 1

Mod 11



Mod 2

Mod 12



Mod 3

Mod 13



Mod 4

Mod 14



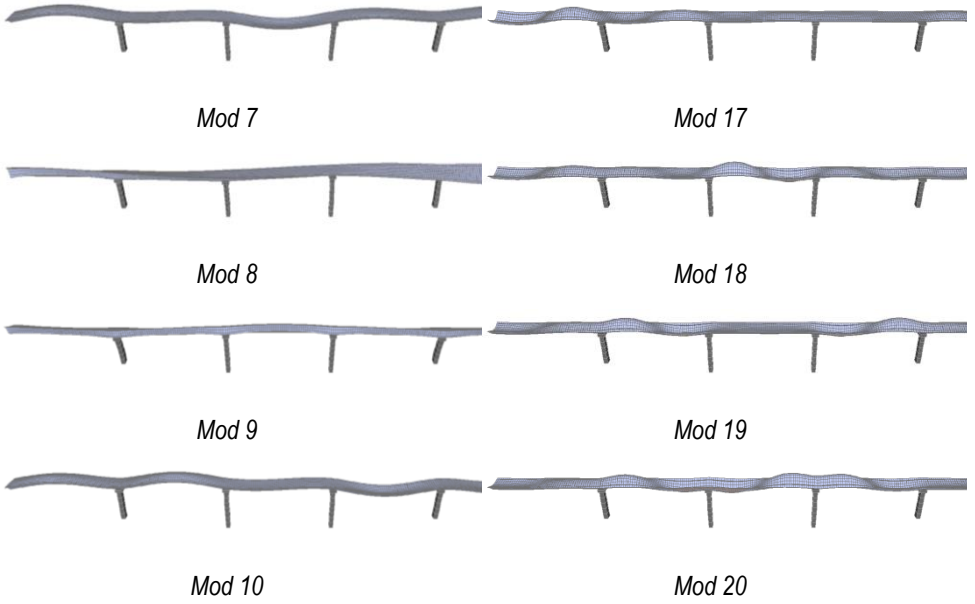
Mod 5

Mod 15



Mod 6

Mod 16



Şekil 7. KK-4 kesitli köprünün ilk 20 mod şekli

Tablo 2. KK-1 kesitli köprünün frekans ve modal katkı faktörleri

Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Tanımı
		U _x (kNs ²)	U _y (kNs ²)	U _z (kNs ²)	R _x (kNms ²)	R _y (kNms ²)	R _z (kNms ²)	
1	1,276	0,00	-43,82	0,00	-42,46	0,00	-5549,14	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
2	1,706	0,00	0,26	0,00	-1,52	0,00	3000,31	Enine eğilmeli Burulma Modu
3	2,060	34,98	0,00	-8,19	0,00	323,21	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
4	2,201	0,00	19,55	0,00	-5,09	0,00	2348,70	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
5	2,305	-16,85	0,00	-4,16	0,00	1620,43	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
6	2,621	24,43	0,00	-4,99	0,00	1406,51	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
7	2,919	0,00	-1,31	0,00	-1,05	0,00	1230,63	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
8	3,050	-17,35	0,00	-11,94	0,00	1652,11	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu

9	3,589	-7,80	0,00	0,53	0,00	-2541,51	0,00	Boyuna yer değiştirmeli Eğilme Modu
10	4,009	0,00	-2,62	0,00	31,22	0,00	-253,96	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
11	4,074	-3,12	0,00	-37,85	0,00	4589,52	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
12	4,953	0,00	0,35	0,00	-0,51	0,00	99,37	Burulma Modu
13	5,336	0,00	12,96	0,00	145,62	0,00	1620,56	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
14	5,768	0,00	0,77	0,00	-2,46	0,00	92,40	Enine eğilmeli Burulma Modu
15	5,952	0,00	-0,04	0,00	0,23	0,00	952,44	Burulma Modu
16	6,686	0,00	0,00	0,00	-0,03	0,00	-401,68	Burulma Modu
17	6,838	0,00	-3,80	0,00	-21,75	0,00	-466,02	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
18	7,020	-0,87	0,00	-0,32	0,00	-426,99	0,00	Eğilme Modu
19	7,114	-0,25	0,00	4,09	0,00	-536,67	0,00	Düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
20	7,342	-0,61	0,00	0,01	0,00	-392,17	0,00	Eğilme Modu

Tablo 3. KK-2 kesitli köprünün frekans ve modal katkı faktörleri

Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Tanımı
		U_x (kNs ²)	U_y (kNs ²)	U_z (kNs ²)	R_x (kNms ²)	R_y (kNms ²)	R_z (kNms ²)	
1	1,241	0,00	-44,59	0,00	-33,39	0,00	-5649,58	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
2	1,683	0,00	0,36	0,00	2,11	0,00	-2954,49	Enine eğilmeli Burulma Modu
3	2,014	-39,46	0,00	7,33	0,00	-222,15	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
4	2,173	0,00	-14,62	0,00	23,91	0,00	-1729,08	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
5	2,299	15,62	0,00	5,09	0,00	-1563,01	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
6	2,590	21,56	0,00	-3,30	0,00	1395,80	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
7	2,934	0,00	0,80	0,00	0,32	0,00	-999,04	Burulma Modu
8	3,048	-13,59	0,00	-12,87	0,00	1697,46	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
9	3,638	6,08	0,00	-0,37	0,00	2537,37	0,00	Boyuna yer değiştirmeli Eğilme Modu
10	3,964	0,00	-4,79	0,00	-77,57	0,00	-640,03	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
11	4,168	2,51	0,00	38,02	0,00	-4636,29	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
12	4,762	0,00	-0,41	0,00	-5,10	0,00	474,75	Enine eğilmeli Burulma Modu
13	4,874	0,00	15,86	0,00	138,36	0,00	1992,04	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
14	5,903	0,00	-1,80	0,00	0,03	0,00	-218,76	Enine yer değiştirmeli Burulma Modu
15	6,132	0,00	0,06	0,00	-0,02	0,00	-1054,96	Burulma Modu
16	7,653	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	-245,92	Burulma Modu
17	7,732	3,90	0,00	2,17	0,00	-408,94	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
18	7,954	0,00	6,20	0,00	28,20	0,00	770,49	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
19	8,013	2,93	0,00	2,68	0,00	138,51	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
20	8,299	-4,25	0,00	3,04	0,00	-692,92	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu

Tablo 4. KK-3 kesitli köprünün frekans ve modal katkı faktörleri

Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Tanımı
		U _x (kNs ²)	U _y (kNs ²)	U _z (kNs ²)	R _x (kNms ²)	R _y (kNms ²)	R _z (kNms ²)	
1	1,179	0,00	44,35	0,00	18,53	0,00	5608,03	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
2	1,674	0,00	-0,61	0,00	-2,24	0,00	2908,13	Enine eğilmeli Burulma Modu
3	1,956	-41,95	0,00	6,79	0,00	-167,11	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
4	2,132	0,00	7,96	0,00	-49,89	0,00	906,38	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
5	2,272	14,07	0,00	5,68	0,00	-1539,70	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
6	2,541	19,24	0,00	-2,62	0,00	1413,01	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
7	2,934	0,00	0,46	0,00	-0,28	0,00	-752,16	Burulma Modu
8	2,992	11,92	0,00	13,22	0,00	-1723,30	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
9	3,566	5,46	0,00	-0,33	0,00	2543,79	0,00	Boyuna yer değiştirmeli Eğilme Modu
10	3,621	0,00	16,27	0,00	132,46	0,00	2050,12	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
11	4,071	2,30	0,00	38,17	0,00	-4661,36	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
12	4,466	0,00	-0,40	0,00	-2,97	0,00	934,73	Enine eğilmeli Burulma Modu
13	4,553	0,00	13,16	0,00	85,13	0,00	1665,05	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
14	5,892	0,00	3,49	0,00	7,18	0,00	432,36	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
15	6,149	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,00	1028,57	Burulma Modu
16	7,607	2,77	0,00	1,93	0,00	-437,67	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
17	7,818	-2,44	0,00	-2,98	0,00	-53,37	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
18	8,054	0,00	0,01	0,00	0,11	0,00	-273,38	Burulma Modu
19	8,079	4,17	0,00	-2,61	0,00	680,55	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
20	8,314	0,00	6,66	0,00	25,41	0,00	830,21	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu

Tablo 5. KK-4 kesitli köprünün frekans ve modal katkı faktörleri

Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Tanımı
		U _x (kNs ²)	U _y (kNs ²)	U _z (kNs ²)	R _x (kNms ²)	R _y (kNms ²)	R _z (kNms ²)	
1	1,074	0,00	-42,53	0,00	5,84	0,00	-5361,55	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
2	1,666	0,00	0,67	0,00	2,17	0,00	-2863,84	Enine eğilmeli Burulma Modu
3	1,871	43,86	0,00	-6,32	0,00	126,19	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
4	2,029	0,00	-2,64	0,00	-84,80	0,00	-409,15	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
5	2,208	12,34	0,00	6,23	0,00	-1537,75	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
6	2,442	17,11	0,00	-2,17	0,00	1437,01	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
7	2,849	10,73	0,00	-13,51	0,00	1749,14	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
8	2,879	0,00	-0,06	0,00	1,44	0,00	403,14	Enine eğilmeli Burulma Modu
9	3,191	0,00	23,44	0,00	136,34	0,00	2928,71	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
10	3,343	-5,09	0,00	0,32	0,00	-2552,40	0,00	Boyuna yer değiştirmeli Eğilme Modu
11	3,751	-2,17	0,00	-38,26	0,00	4672,89	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
12	4,200	0,00	0,01	0,00	0,06	0,00	1360,58	Burulma Modu
13	4,454	0,00	9,34	0,00	49,66	0,00	1158,70	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
14	5,764	0,00	-5,67	0,00	-15,55	0,01	-708,50	Enine yer değiştirme ve eğilmeli Burulma Modu
15	6,085	0,00	-0,05	0,00	-0,03	0,00	908,12	Burulma Modu
16	6,304	-0,81	0,00	-1,76	0,00	-163,80	0,00	Düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
17	6,354	1,55	0,00	-3,23	0,00	639,70	0,00	Boyuna ve düşey yer değiştirmeli Eğilme Modu
18	6,500	0,31	0,00	-0,17	0,00	-419,95	0,00	Eğilme Modu
19	6,613	0,26	0,00	-0,84	0,00	104,45	0,00	Eğilme Modu
20	6,666	0,10	0,00	-0,04	0,00	-100,60	0,00	Eğilme Modu

Sonuçlar

Uzun açıklıklı köprülerin yapımında, büyük burulma rijitliğine sahip betonarme kutu kesitli kirişler son yıllarda sıklıkla tercih edilmektedir. Kutu kesitli kirişlerde üst başlık, hem yol tabliyesi olarak kullanılabilmekte hem de düşey veya eğik gövde elemanlarına yüklerin aktarılmasını sağlayabilmektedir. Ayrıca klasik köprülerle karşılaştırıldıklarında kutu kesitli köprülerin titreşim etkilerine karşı daha dirençli oldukları da bilinmektedir. Uygulamada tek veya çok gözlü kutu kesitli kirişler, dikdörtgen veya trapezoidal en kesite sahip olabilmektedir. Bu çalışmada, karayolu köprülerinin modal davranışına kutu kesitli kirişlerin en kesit şekillerinin etkisi incelenmiştir. Yapılan analizler neticesinde, kutu kesitli kirişlerden oluşan köprü davranışında burulma ve eğilme modlarının hâkim olduğu; burulma modlarında, enine yer değiştirme ve eğilme davranışının; eğilme modlarında ise boyuna ve düşey yer değiştirme davranışının katkısının olduğu görülmüştür.

Teşekkür Bu çalışmaya verdiği katkıdan dolayı *Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK*'a teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

1. Anagnostopoulou, M. (2009) "Seismic Design And Analysis of Precast Segmental Concrete Bridge Superstructure", MSc Thesis, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Italy.
2. CSIBridge (2015), Integrated Software For Structural Analysis And Design, Computers and Structures, Inc. (CSI), Berkeley, USA.
3. FHWA (2013) "Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual," Report No: FHWA-NHI-13-026, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., United States.
4. Pindado S., Meseguer, J. and Franchini S. (2005) "The influence of the section shape of box-girder decks on the steady aerodynamic yawing moment of double cantilever bridges under construction", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Short note, 93, 547–555.
5. SAP2000 (2008), Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Analysis Reference, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA
6. Sayed-Ahmed, M. and Sennah, K. (2013) "Finite Element and Modal Analysis of 3D Jointless Skewed RC Box Girder Bridge", Concrete Research Letters, 4(1), 557-568.

Anahtar Sözcükler: Karayolu köprüleri, Kutu kesit, Modal analiz.