

İntegral Köprülerde Hareketli Yük Dağılımına Yapı-Zemin Etkileşimi ve Uç-Ayak Tabliye Sürekliliğinin Etkileri

Semih ERHAN*
Murat DİCLELİ**

ÖZ

Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin ve uç ayak tabliye sürekliliğinin köprülerdeki hareketli yük dağılımına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, çeşitli yapısal, geoteknik ve geometrik özelliklere sahip çok sayıda integral ve basit mesnetli köprülerin iki ve üç boyutlu yapısal modelleri kurularak, AASHTO hareketli yükleri altında analizleri yapılmıştır. İki ve üç boyutlu analiz sonuçlarından, temel zemini ve dolgunun ve ayrıca uç-ayak tabliye sürekliliğinin köprülerin elemanları için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarına etkileri saptanmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda, yapı-zemin etkileşiminin integral köprülerin uç ayağı için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarını büyük ölçüde etkilediği ve uç-ayak tabliye sürekliliğinin özellikle kısa açıklıklı köprülerdeki hareketli yük dağılım katsayıları üzerinde oldukça etkili olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İntegral köprü, hareketli yük, köprü-zemin etkileşimi

ABSTRACT

Effects of Soil Bridge Interaction and Abutment Deck Continuity on the Live Load Distribution Factors in Integral Bridge Components

In this study, the effects of soil bridge interaction and abutment deck continuity on the live load distribution in integral bridge components are studied. For this purpose, 2-D and 3-D structural models of typical integral and conventional bridges having various structural, geometric and geotechnical properties are built. The analyses of the models are then conducted under AASHTO live load. The analyses results revealed that soil-bridge interaction has significant effects on the live load distribution in abutments and abutment deck continuity has considerable effects on the live load distribution in girders in short-span bridges.

Key words: Integral bridge, live load, soil-bridge interaction

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 19.11.2007 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2009 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, Ankara - esemih@metu.edu.tr

** Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, Ankara - mdicleli@metu.edu.tr

1. GİRİŞ

Köprülerin hareketli yük analizlerinde, tasarım mühendisleri genellikle zaman alıcı karmaşık üç boyutlu yapısal modeller kullanmak yerine, basitleştirilmiş iki boyutlu modeller kullanmayı tercih ederler. Bu iki boyutlu yapısal modellerde, hareketli yüklerin köprü kirişlerine dağılımını ise köprü tasarım standartlarında mevcut olan hareketli yük dağılım katsayılarını kullanarak belirlerler. Bu hareketli yük dağılım katsayıları, ülkemizde de köprülerin tasarımı için kullanılan Amerikan Karayolları ve Ulaştırma İdaresi'nin (AASHTO) ilgili standartlarında belirtilmiş olup, 1930'lu yıllardan beri kullanılmaktadır. Bu katsayılar, geleneksel genişme derzli köprülerin kirişleri için geliştirilmiş olmasına rağmen integral köprülerin hareketli yük analizlerinde bu köprülerin kirişleri için de kullanılmaktadır. İntegral köprülerin uç ayağı ve tabliyesi monolitik olarak inşa edildiğinden dolayı, köprü üst yapısı uç ayakla ve kazıklarla, dolayısıyla da temel zemini ve dolgu ile etkileşimindedir [1]. Bu monolitik yapıdan ve köprünün temel zemini ve dolgu ile olan etkileşimlerinden dolayı, genişme derzli köprüler için geliştirilmiş olan bu hareketli yük dağılım katsayılarının integral köprülerde kullanılması uygun olmayabilir.

Son yıllarda, yapı zemin etkileşimi ve uç ayak tabliye sürekliliğinin, integral köprülerin ısıll yükler altındaki performansına etkisiyle ilgili oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır [2-9]. Buna rağmen, yapı zemin etkileşimi ve uç ayak tabliye sürekliliğinin bu köprülerdeki hareketli yük dağılımına etkisi ile ilgili bir çalışma göze çarpmamaktadır. Bu sebepten dolayı, bu çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin ve uç ayak tabliye sürekliliğinin integral köprü elemanlarında ki hareketli yük dağılımına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, çeşitli yapısal, geoteknik ve geometrik özelliklere sahip çok sayıda integral ve basit mesnetli köprülerin iki ve üç boyutlu yapısal modelleri kurularak, AASHTO hareketli yükleri altında analizleri yapılmıştır. Daha sonra, iki ve üç boyutlu yapısal modellerin analiz sonuçlarından elde edilen hareketli yük dağılım katsayıları karşılaştırılarak, yapı-zemin etkileşimi ve uç ayak-tabliye sürekliliğinin hareketli yük dağılım katsayılarına etkileri saptanmıştır.

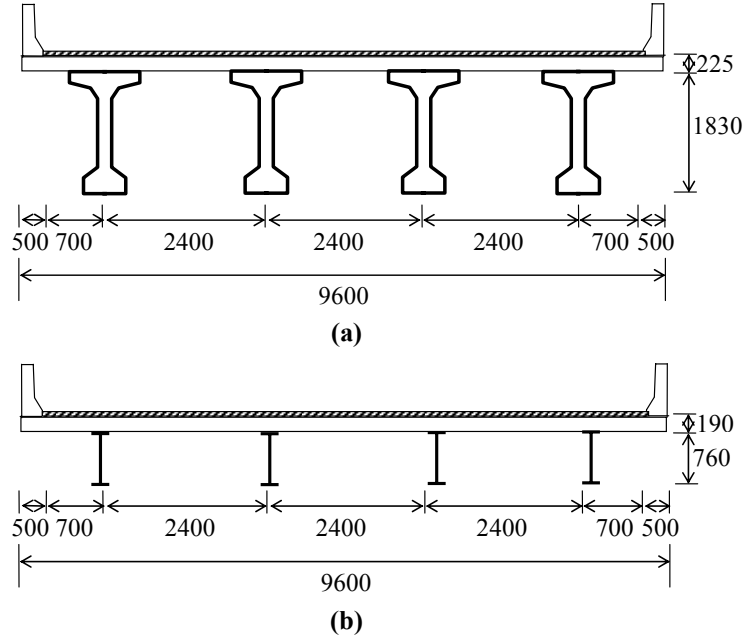
Bu çalışmanın temel amacı, Amerika birleşik devletleri ve Avrupa'nın pek çok ülkesinde son yıllarda yaygın şekilde inşa edilen ve önümüzdeki yıllarda ülkemizde de inşa edilme potansiyeli olan integral köprülerde hareketli yük dağılımı ile ilgili henüz aydınlatılmamış olan noktaları açığa çıkarmaktır. Bunun yanı sıra, bu çalışmada elde edilen sonuçların, ileride integral köprülerin elemanları için geliştirilecek olan hareketli yük dağılım formüllerine de temel oluşturacağı düşünülmektedir.

2. KAPSAM

Bu çalışmada, uç ayağı HP tipi çelik kazıklarla desteklenen simetrik ve verevsiz, çelik ve öngermeli betonarme kirişlerle inşa edilmiş olan integral ve genişme derzli köprüler ele alınmıştır. Çelik kirişli köprülerde diyafram ve çapraz etkileri ihmal edilmiştir. Temel zemini olarak, yalnızca kohezyonlu (kil) zeminler ele alınmış ve yumuşak, orta, orta-sert ve sert olmak üzere dört farklı kil sınıfı için analizler yapılmıştır. Bu çalışmada pratikte oldukça yaygın olarak kullanılan HP250x85 ve HP310x125 tipi kazıklar kullanılmıştır. Hareketli yüklerin etkisi altında köprünün yanıl deplasmanı küçük olduğundan, temel zemini ve dolgunun davranışları doğrusal olarak modellenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kısa ve orta açıklıklı integral köprüler için geçerlidir.

3. ÇALIŞMADA ELE ALINAN KÖPRÜLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Yapı zemin etkileşiminin integral köprülerdeki hareketli yük dağılımına etkilerini araştırmak için kısa ve uzun olarak adlandırılan iki farklı uzunlukta integral köprü ele alınmıştır. Kısa köprü, 19.6 m uzunluğunda ve 9.6 m genişliğinde olup 2.4m kiriş aralığına sahiptir. Bu köprünün 190 mm kalınlığındaki tabliyesi, W760x173 tipi çelik kirişlerle desteklenmektedir. Uzun köprü ise 39.6m uzunluğunda ve 9.6m genişliğinde olup 2.4m kiriş aralığına sahiptir. Bu köprünün 225 mm kalınlığındaki tabliyesi AASHTO VI tipi öngermeli betonarme kirişlerle desteklenmiştir. Tabliye ve kirişlerde kullanılan betonunun 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla 30 Mpa ve 50 Mpa dir. Bu köprülerin kesitleri Şekil 1. de görüldüğü gibidir. Köprülerle ilgili diğer yapısal özellikler ile ilgili detaylar Çizelge 1.'de verilmiştir.



Şekil 1. (a) uzun köprü (b) kısa köprü

Uç ayak tabliye sürekliliğinin, köprülerdeki hareketli yük dağılımına etkilerini araştırmak için AASHTO' da bulunan ve genişleme derzli köprüler için hareketli yük dağılım katsayılarının hesaplanması için kullanılan formüllerde bulunan üst yapıya ait bazı yapısal özellikler esas alınmıştır. Bu özellikler, açıklık, kiriş aralığı, tabliye kalınlığı, kiriş tipi ve şerit sayısıdır. Üst yapıya ait bu özelliklere sahip, basit mesnetli ve integral köprülerin yapısal modelleri kurulmuştur. Bu modellerde, yukarıda bahsedilen parametrelerden sadece birisi pratikte kullanılan çeşitli değerler verilerek değiştirilirken, diğer parametreler sabit tutulmak suretiyle, bu parametrenin integral ve genişleme derzli köprülerdeki hareketli yük dağılımına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada ele alınan köprülerle ilgili parametreler Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Yapı zemin etkileşimi için ele alınan köprülerin yapısal özellikleri

Özellikler	Kısa Köprü	Uzun Köprü
Açıklık (m)	19.6	39.6
Genişlik (m)	9.6	9.6
Kiriş aralığı (mm)	2400	2400
Kiriş türü	Çelik	Öng. Betonarme
Kiriş tipi	W760x173	AASHTO VI
Tabliye kalınlığı (mm)	190	225
Kompozit kiriş, A (mm ²)	0.661x10 ⁶	1.174x10 ⁶
Kompozit kiriş, I (mm ⁴)	54300x10 ⁶	646000x10 ⁶
Uç ayak kalınlığı (mm)	1000	1500
Uç ayak, A (kiriş ara. başına), (mm ²)	2.400x10 ⁶	3.600x10 ⁶
Uç ayak, I (kiriş ara. başına), (mm ⁴)	200000x10 ⁶	675000x10 ⁶
Beton dayanımı (kiriş) (MPa)	N/A	50
Beton dayanımı (tabliye) (MPa)	30	30

Çizelge 2. Uç ayak tabliye sürekliliği için ele alınan köprülerin yapısal özellikleri

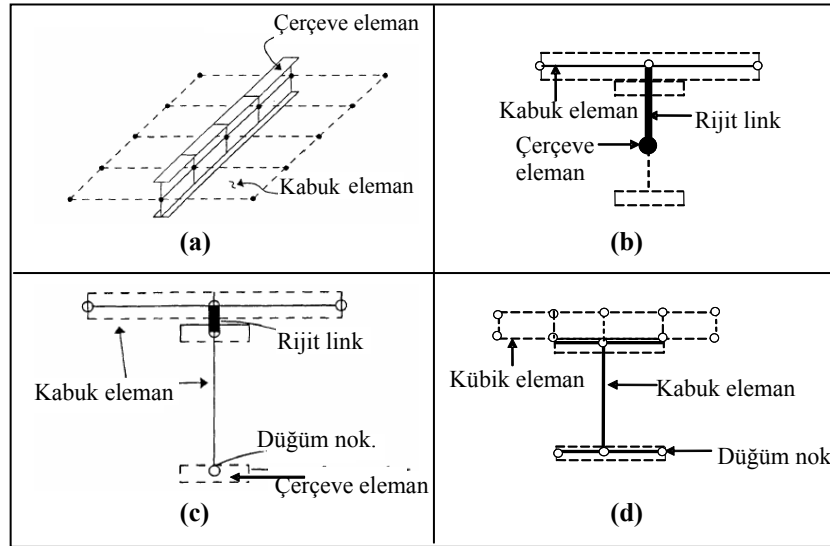
PARAMETRE	Köprü Açıklığı (m)	Kiriş Tipi	Tabliye Kalınlığı (m)	Şerit Sayısı	Kiriş Aralığı (m)
Köprü Açıklığı (m)	10,15,20,25 30,35,40,45	4	0.20	2	2.4
Kiriş Tipi	30	1, 2, 3, 4, 5, 6	0.20	2	2.4
Tabliye Kalınlığı (m)	30	4	0.15, 0.20, 0.25, 0.30	2	2.4
Şerit Sayısı	40	6	0.20	1, 2, 3, 4	2.4
Kiriş Aralığı (m)	40	6	0.20	4	1.2, 2.4, 3.6, 4.8

4. KÖPRÜLERİN ÜÇ BOYUTLU YAPISAL MODELLERİ

Yukarıda yapısal özellikleri verilen köprülerin üç boyutlu yapısal modelleri kurularak, sonlu elemanlar tabanlı SAP2000 [10] yapısal analiz programı ile analiz edilmiştir. Köprülerin üst yapılarının modellenmesi ve ayrıca integral köprülerde alt yapı ve yapı-zemin etkileşimi modeli ile ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

4.1 Üst Yapının Modellenmesi

Mabsout ve diğerleri [11] ve Hindi ve Yousif [12] köprülerin üç boyutlu analizlerinde kullanılacak olan en uygun modeli belirlemek amacıyla literatürde mevcut olan dört farklı sonlu elemanlar modelleme tekniğini karşılaştırmışlardır.



Şekil 2. Köprü üst yapısı modelleri

Bu modellerden ilki, genişleme derzli kompozit (çelik kirişli ve betonarme tabliyeli) köprülerde hareketli yük dağılım katsayılarını araştırmak için Hays ve diğerleri [13] tarafından geliştirilmiş olan modeldir. Bu modelde, köprü tabliyesi, her düğüm noktasında beş serbestlik derecesine sahip olan dörtgen kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Çelik kirişler ise, her düğüm noktasında altı serbestlik derecesine sahip olan üç boyutlu çerçeve elemanları kullanılarak modellenmiştir. Önerilen modelde, üst yapı, tabliyenin geometrik merkezi ile kirişin geometrik merkezinin aynı boyuna eksenden geçtiği kabul edilerek (Şekil 2.a) ve kirişin elastik özellikleri, alan dönüştürme yöntemiyle tabliyenin özelliklerine dönüştürülerek modellenmiştir. İkinci model ise, Imbsen ve Nutt [14] tarafından kompozit bir köprü üzerine yapılan bir çalışmada kullanılmış olan modeldir (Şekil 2.b). Bu modelleme tekniğinde, betonarme tabliye dörtgen kabuk elemanlar, kirişler

ise üç boyutlu çerçeve elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Modelde kirişler, kabuk elemanlara, rijit elemanlar vasıtasıyla eksantrik olarak bağlanmıştır. Üçüncü modelleme tekniği Brockenbrough [15] tarafından önerilmiştir. Bu modelleme tekniğinde, betonarme tabliye ve çelik kirişlerin gövdeleri dörtgen kabuk elemanlarla modellenirken, kiriş flanşları ise çerçeve elemanlarla modellenmiştir. Köprü tabliyesi ile kiriş arasındaki bağlantı ise rijit elemanlar kullanılarak modellenmiştir (Şekil 2.c). Dördüncü modelleme tekniği, Tarhini ve Frederick [16] tarafından önerilmiştir. Bu modelleme tekniğinde, betonarme tabliye, her düğüm noktasında üç serbestlik derecesi olan sekiz düğüm noktalı kübik elemanlarla modellenmiştir. Çelik kirişler ise dörtgen kabuk elemanlarla modellenmiştir (Şekil 2.d).

Hem Mabsout ve diğerleri [11] hem de Hindi ve Yousif [12] tarafından yapılan çalışmalarda, köprülerin SEY kullanılarak modellenmesi için Hays ve diğerleri tarafından önerilen birinci modelleme tekniği, basit olmasına rağmen daha karmaşık olan diğer üç modelle benzer sonuçlar vermesinden dolayı tavsiye edilmektedir. Bu çalışmada da integral köprülerin üst yapısı bu modelleme tekniği kullanılarak modellenecektir.

4.2 Alt Yapının Modellenmesi

İntegral köprülerin uç ayakları, literatürde bulunan bazı çalışmalarda üç boyutlu kübik elemanlar kullanılarak [16], bazı çalışmalarda ise kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir [3]. Kalınlığı, tabliyeye oranla büyük olan uç ayakta, kayma şekil değiştirmeleri önem taşır. Bu yüzden ilk bakışta, uç ayakların kübik elemanlar kullanılarak modellenmesinin daha doğru bir yaklaşım olduğu düşünülebilir. Ancak, uç ayağın kübik elemanlarla modellenmesi durumunda, moment ve kesme kuvvetlerinin analizlerden elde edilen gerilmeler kullanılarak hesaplanması gerekmektedir. Bu yüzden bu zaman alıcı teknik yerine, uç ayak kayma şekil değiştirmelerinin de dikkate alındığı, Mindlin kabuk elemanlarıyla modellenmiştir. Ayrıca, kazıkların modellenmesi için üç boyutlu kiriş elemanlar kullanılmıştır.

4.3 Köprü-Zemin Etkileşimi Modeli

Hareketli yük etkisi altında köprünün yatay deplasmanı küçük olduğundan dolayı, gerçekte doğrusal olmayan temel zemini-kazık ve dolgu-uç ayak etkileşimleri, doğrusal olarak modellenmiştir.

Temel Zemini-Kazık Etkileşimi için zemin elastisite modülü aşağıdaki gibi alınmıştır [5].

$$E_s = \frac{Q_u / 2}{\Delta_{50}} = \frac{Q_u}{5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot d_p} \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikteki Q_u ve Δ_{50} aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Q_u = 9 \cdot C_u \cdot d_p \quad (2)$$

$$\Delta_{50} = 2.5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot d_p \quad (3)$$

Bu ifadelerde d_p kazık çapını, C_u drenajsız kayma mukavemeti, ϵ_{50} ise %50 mukavemete karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi göstermektedir. C_u , yumuşak, orta, orta-katı, katı kil çeşitleri için sırasıyla; 20, 40, 80 ve 120 kPa değerlerini alırken bu değerlere karşılık gelen ϵ_{50} değerleri ise sırasıyla, 0.02, 0.01, 0.0065, 0.005 olmaktadır [17]. Kazık-zemin etkileşimi, kazık boyunca belirli aralıklarla yerleştirilen düğüm noktalarına doğrusal yatay yaylar bağlanarak modellenmiştir. Bu modelde elastik yay sabiti, zemin elastisite modülü ile düğüm noktaları arasındaki uzaklığın ve kazık çapının çarpımından elde edilir.

Uç ayak- dolgu etkileşimi için, yay katsayısı 4. eşitliğe göre hesaplanır [18].

$$k_{sh} = \frac{14500}{H} \cdot z \quad (4)$$

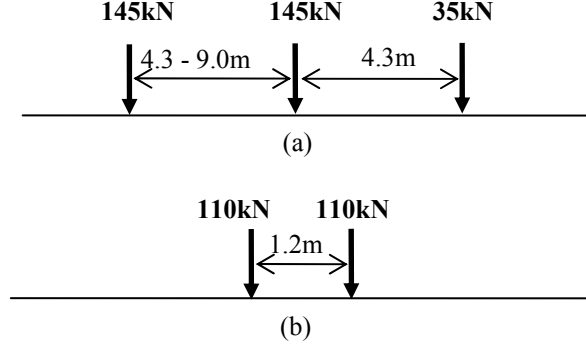
Dolgu zemini-uç ayak etkileşimini modellemek için, uç ayağın yüksekliği boyunca belirli aralıklarda düğüm noktaları yerleştirilmiş ve bu noktalara yatay doğrusal yaylar bağlanmıştır. Bu yayların rijitliği, uç ayağın yüksekliği boyunca yerleştirilmiş olan düğüm noktalarında hesaplanan k_{sh} ile düğüm noktaları arasındaki alanın çarpımıyla bulunmuştur.

5. İKİ BOYUTLU YAPISAL MODELLER

Hareketli yük dağılım katsayılarının hesaplanması için üç boyutlu olarak modellenmiş olan her bir köprü iki boyutlu olarak da modellenmiştir. İki boyutlu olarak modellenen köprülerde, üst yapı ve uç ayak genişlikleri, kiriş aralığı esas alınarak belirlenmiştir. İntegral köprülerde, tabliye ile kiriş bağlantısının rijit olduğu ve birlikte çalışmaları farz edilmiştir. Ayrıca üst yapının kompozit kesit alanı ve atalet momenti, alan dönüştürme yöntemi kullanılarak tabliyenin özellikleri cinsinden ifade edilmiştir. Üst yapı, uç ayaklar ve çelik kazıklar iki boyutlu çerçeve elemanları kullanılarak modellenmiştir. Uç ayak-üst yapı bağlantı bölgesi ise rijit elastik çerçeve elemanlar kullanılarak modellenmiştir. İntegral köprülerdeki, dolgu-uç ayak ve temel zemini-kazık arasındaki etkileşimin modellenmesi üç boyutlu modellerdekine benzer şekilde aynı yatak katsayıları kullanılarak yapılmıştır.

6. HAREKETLİ YÜK MODELİ

Bu çalışmada yapılan analizlerde AASHTO HL-93 hareketli yükü kullanılmıştır. HL-93 yükü standart kamyonlardan oluşmaktadır. AASHTO'da belirtilen standart kamyon yükleri iki çeşit olup, birincisi 35 kN ağırlığında ön dingilden, bu dingile 4.3 m uzaklıkta olan 145 kN luk orta dingilden ve orta dingile, 4.3 m ile 9.0 m arasında değişen mesafelerde bulunan, 145 kN luk arka dingilden oluşur (Şekil 3a). İkinci tip standart kamyon ise, aralarında 1.2 m mesafe olan ve ağırlıkları 110 kN olan eşit iki dingilden oluşur (Şekil 3b). AASHTO Köprü Tasarım Standardında (2007), birinci ve ikinci tip standart kamyonlardan her birinin ayrı ayrı şerit yükü ile birlikte etki ettirilmesi sonucunda elde edilen moment ve kesme kuvveti değerlerinden en büyüklerinin tasarımda kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu çalışmada ele alınan yapısal modeller her iki kamyon yükü ile yüklenmiş, 1. kamyon tipinde maksimum etkiler meydana geldiği için hareketli yüklerin hesabında bu kamyon yükü kullanılmıştır.



Şekil 3. (a) Birinci tip kamyon yükü, (b) İkinci tip kamyon yükü

Ülkemizde köprülerin tasarımında kullanılan H30-S24 kamyon yükleri HL-93 yükleriyle eşdeğer değildir. Bu çalışmada hesaplanan katsayıların AASHTO formüllerine uygun olması açısından HL-93 yükleri kullanılmıştır.

7. HAREKETLİ YÜK DAĞILIM KATSAYILARI

Yapı-zemin etkileşiminin integral köprü elamanlarındaki hareketli yük dağılımına etkilerini araştırmak için 3. bölümde yapısal özellikleri anlatılan iki farklı uzunluktaki integral köprü ele alınmıştır. Bu köprüler, farklı kil türleri (yumuşak, orta, orta-katı, katı), kazık çeşitleri (HP250X85, HP310X125), uç ayak kalınlıkları (1m, 1.5m), kazıkların dönme eksenine göre yerleştirme şekilleri (zayıf ve kuvvetli eksen) ve dolgunun yapısal modelde göz önünde bulundurulup bulundurulmadığı durumlar için iki boyutlu ve üç boyutlu yapısal modelleri kurulup AASHTO hareketli yükleri altında analiz edilmiştir. Benzer şekilde, uç ayak tabliye sürekliliğinin, köprülerdeki hareketli yük dağılımına etkilerini araştırmak için 3. bölümde verilmiş olan köprü üst yapısı özelliklerine sahip integral ve basit mesnetli köprülerin iki boyutlu ve üç boyutlu yapısal modelleri kurularak AASHTO hareketli yükleri altında analiz edilmiştir.

Hareketli yük dağılım katsayıları integral köprülerde kompozit kirişler, uç ayaklar ve kazıklar için basit mesnetli köprülerde ise sadece kirişler için hesaplanmıştır. Üç boyutlu hareketli yük analizleri sonucunda, kompozit kirişlerde oluşan maksimum moment ve kesme kuvvetleri, kiriş ve tabliyede oluşan maximum moment ve kesme kuvvetlerinin toplamından elde edilmiştir. Uç ayakta ise, maksimum moment ve kesme kuvveti, maksimum etkilerin meydana geldiği iki kiriş aralığının orta noktaları arasındaki düğüm noktalarında oluşan moment ve kesme kuvvetlerinin toplamından elde edilmiştir. Kazıklar üç boyutlu çerçeve elemanları olarak modellendiğinden, maksimum moment ve kesme kuvvetleri doğrudan doğruya elde edilmiştir.

Hareketli yük dağılım katsayıları, üç boyutlu analizlerden elde edilen maksimum moment ve kesme kuvvetlerinin, iki boyutlu analizlerden elde edilen maksimum moment ve kesme kuvvetlerine oranından hesaplanmıştır. Hesaplanan bu katsayılar AASHTO hareketli yük dağılım formüllerinden elde edilen katsayılarla karşılaştırılmıştır.

8. AASHTO HAREKETLİ YÜK DAĞILIM FORMÜLLERİ

Köprülerde iki ya da daha fazla tasarım şeridinin yüklü olması durumunda iç kiriş momenti ve kesme kuvveti hareketli yük dağılım katsayıları, AASHTO'da iç kiriş momenti hareketli yük dağılım formüllerinden hesaplanır.

$$MLLDF_{2-L} = 0.075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \cdot \left(\frac{K_g}{L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (5)$$

$$VLLDF_{2-L} = 0.2 + \left(\frac{S}{3600}\right) - \left(\frac{S}{10700}\right)^{2.0} \quad (6)$$

Tek tasarım şeridinin yüklü olması durumunda ise, iç kirişler için hareketli yük dağılım katsayıları aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$MLLDF_{1-L} = 0.06 + \left(\frac{S}{4300}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (7)$$

$$VLLDF_{1-L} = 0.36 + \frac{S}{7600} \quad (8)$$

Yukarıdaki ifadelerde sırasıyla; S ; kiriş aralığı (mm), L ; köprü açıklığı (mm), t_s ; tabliye kalınlığı (mm), K_g ise, kiriş atalet momenti, tabliye ve kiriş elastisite modülü ve tabliye kalınlığına bağlı olarak hesaplanan boyutsuz bir parametredir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$K_g = n(I + A e_g^2) \quad (9)$$

Yukarıdaki ifadede n ; kiriş elastisite modülünün tabliye elastisite modülüne oranı, I ; kiriş atalet momenti, A ; kiriş kesit alanı, e_g kiriş ağırlık merkezi ile tabliye ağırlık merkezi arası uzunluktur.

9. BULGULAR

9.1 Yapı-Zemin Etkileşiminin Hareketli Yük Dağılım Katsayıları Üzerinde Etkisi

9.1.1 Temel Zemininin Hareketli Yük Dağılımı Üzerindeki Etkisi

Üçüncü bölümde yapısal özellikleri verilmiş olan integral köprüler, dört farklı kil türü ve dolgunun etkisinin yapısal modelde göz önünde bulundurulduğu ve bulundurulmadığı durumlar için analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen ve temel zeminin hareketli

İntegral Köprülerde Hareketli Yük Dağılımına Yapı-Zemin Etkileşimi ve ...

yük dağılım katsayılarına etkilerini gösteren grafikler Şekil 4-9'da verilmiştir. Grafiklerden anlaşıldığı gibi, temel zemininin, kirişler için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarına etkisi yok denecek kadar azdır (Şekil 4-9). Örneğin, 1m kalınlığındaki uç ayağı HP 250x85 kazıklarla desteklenen ve dolgu zemini etkisinin yapısal modelde dikkate alındığı bir integral köprüde, kiriş momenti için hareketli yük dağılım katsayıları, yumuşak, orta, orta-katı ve katı, kil zemin türleri için sırasıyla 0.577, 0.576, 0.576 ve 0.576 olmaktadır. Aynı köprüde, kesme kuvveti için hareketli yük dağılım katsayıları, yumuşak, orta, orta- katı, ve katı kil zemin türleri için sırasıyla 0.891, 0.891, 0.891 ve 0.892 olarak hesaplanmıştır.

Üst yapıda bu durum gözlenirken, temel zemini rijitliğinin, uç ayak moment ve kesme kuvvetleri için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayılarına etkisi nispeten daha büyüktür (Şekil 3-8). Örneğin, bir önceki paragrafta bahsedilmiş olan integral köprüde, yumuşak, orta, orta-katı, ve katı kil zemin türlerinde, uç ayak momenti için hareketli yük dağılım katsayıları sırasıyla 0.881, 0.799, 0.723 ve 0.685 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, uç mesnet kesme kuvveti için hareketli yük dağılım katsayıları, yumuşak, orta, orta-katı, ve katı kil zemin türleri için sırasıyla 0.698, 0.654, 0.614 ve 0.612 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4-9'da görüldüğü gibi temel zemininin, kazıklar için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarına etkisi ihmal edilecek düzeydedir.

Özet olarak, temel zeminin, integral köprülerin kiriş ve kazık moment ve kesme kuvvetleri için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayılarına etkisi yok denecek kadar azdır. Kiriş ve kazıklar için bu durum gözlenirken, temel zemini rijitliği uç ayak moment ve kesme kuvvetleri için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayılarını önemli oranda etkilemektedir.

9.1.2 Dolgunun Hareketli Yük Dağılımı Üzerindeki Etkisi

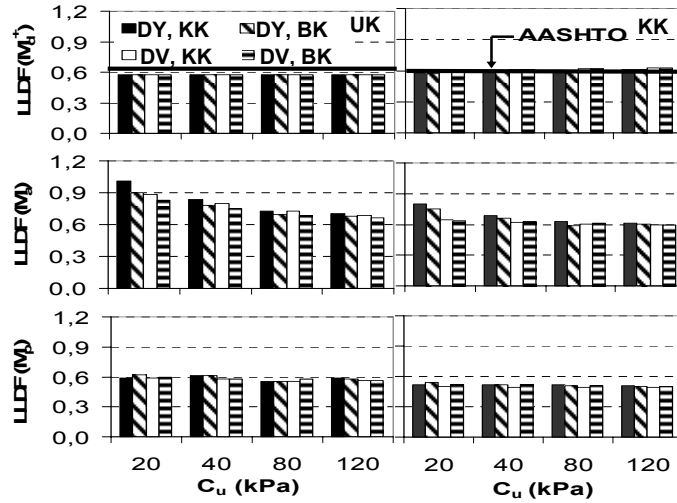
Dolgu zemininin, integral köprü elemanları için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayılarına etkileri, dolgu zemininin etkisinin yapısal modelde dikkate alınıp (D.V.) alınmadığı (D.Y.) durumlar için, Şekil 4-9'da farklı kazık ebat ve eğilme eksenleri ayrıca çeşitli uç ayak kalınlıkları için gösterilmiştir

Kirişlerde moment ve kesme kuvvetleri için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayıları, temel zemin rijitliğinin bir fonksiyonu olarak ve dolgu zemininin etkisinin yapısal modelde dikkate alınıp (D.V.) alınmadığı (D.Y.) durumlar göz önünde bulundurularak Şekil 4-9'da sırasıyla farklı kazık ebatları, eğilme eksenleri ve uç ayak kalınlıkları için verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, dolgu zemininin, kirişler için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarına etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Örneğin, 1 m kalınlığındaki uç ayağı HP 250x85 kazıklarla desteklenen ve yumuşak kil zemine oturan bir integral köprü için, dolgu zemini etkisinin yapısal modelde var olup olmadığı her iki durum için de kiriş momentine ait hareketli yük dağılım katsayıları, 0.577'dir. Benzer şekilde, kiriş kesme kuvveti için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayıları dolgu zemini etkisinin yapısal modelde var olup olmadığı durumlar için sırasıyla 0.891 ve 0.890'dır.

Üst yapıda bu durum gözlenirken, dolgu zemininin uç ayakta oluşan moment ve kesme kuvvetleri için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayılarını büyük oranda etkilediği görülmüştür. Örneğin, bir önceki paragrafta bahsedilmiş olan integral köprüde, dolgu

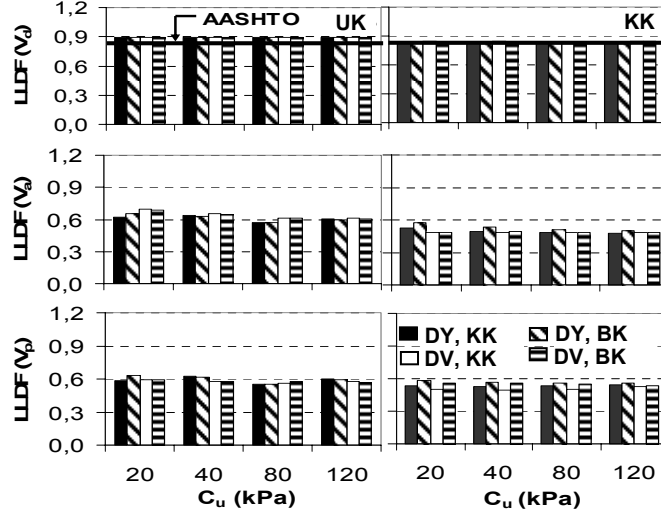
etkisinin yapısal modelde dikkate alınıp alınmadığı durumlar için, uç ayak momentine ait hareketli yük dağılım katsayıları, sırasıyla 0.881 ve 1.011'dir. Benzer şekilde, dolgu etkisinin yapısal modelde var olup olmadığı durumlar için, uç ayak kesme kuvvetine ait hareketli yük dağılım katsayıları sırasıyla 0.698 ve 0.622'dir.

Kazıklarda ise dolgu zemininin moment ve kesme kuvvetleri için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayılarına etkisi yok denecek kadar azdır (Şekil 4-9). Örneğin, yukarıda bahsedilen integral köprüde, dolgu zemini etkisinin yapısal modelde dikkate alınıp alınmadığı durumlarda kazık momenti için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayıları, sırasıyla 0.588 ve 0,585 dir. Benzer şekilde, dolgu zemini etkisinin yapısal modelde var olup olmadığı durumlarda, kazık kesme kuvveti için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayıları sırasıyla 0.595 ve 0.584 dır.

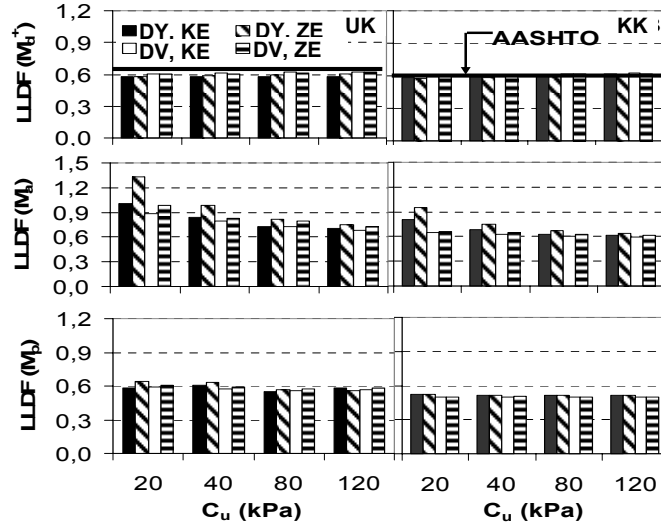


Şekil 4. Kiriş, uç ayak ve kazık momentleri (M_a , M_a , M_p) için hareketli yük dağılım katsayıları (LLDF) – C_u ; 3m yüksekliğinde uç ayağı kuvvetli dönme eksenine göre yerleştirilmiş HP250x85 (KK) and HP310x125 (BK) ebadında kazıklarla desteklenen ve dolgu etkisinin yapısal modelde alındığı (DV) ve alınmadığı (DY) uzun (UK) ve kısa açıklıklı (KK) integral köprüler için.

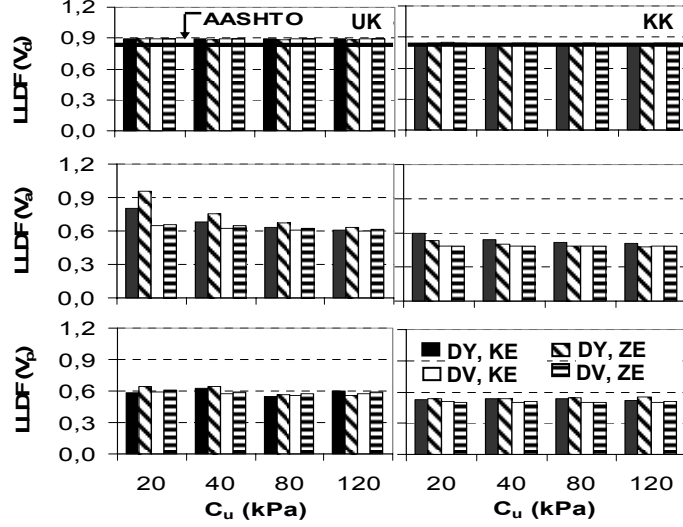
Özet olarak, dolgu zemininin, integral köprülerin kiriş ve kazık moment ve kesme kuvvetleri için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayılarına etkisi yok denecek kadar azdır. Kiriş ve kazıklar için bu durum gözlenirken, dolgu zemininin yapısal modelde bulunup bulunmaması, uç ayak moment ve kesme kuvvetleri için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayılarını önemli oranda etkilemektedir.



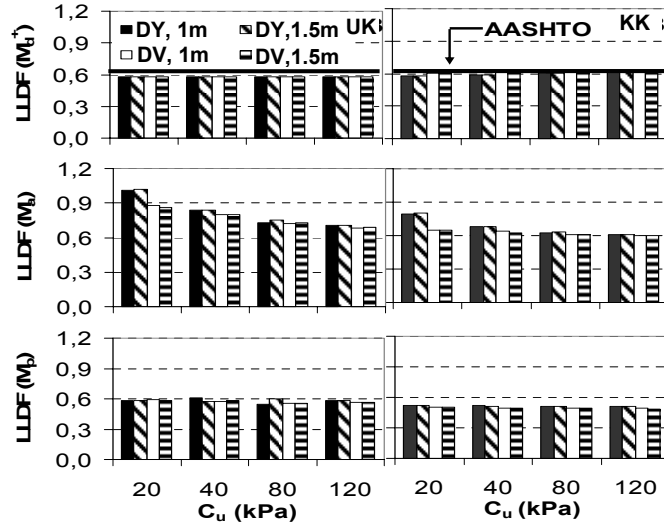
Şekil 5. Kiriş, uç ayak ve kazık kesme kuvvetleri (V_d , V_a , V_p) için hareketli yük dağılım katsayıları (LLDF) – C_u ; 3m yüksekliğinde uç ayağı kuvvetli dönme eksenine göre yerleştirilmiş HP250x85 (KK) and HP310x125 (BK) ebadında kazıklarla desteklenen ve dolgu etkisinin yapısal modelde alındığı (DV) ve alınmadığı (DY) uzun (UK) ve kısa açıklıklı (KK) integral köprüler için.



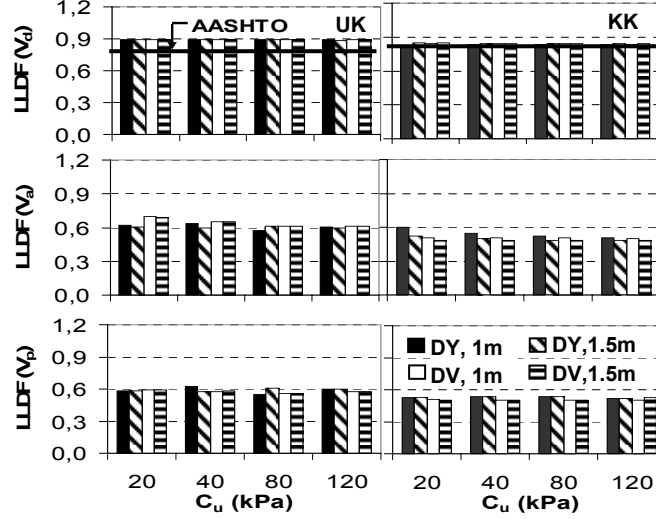
Şekil 6. Kiriş, uç ayak ve kazık momentleri (M_d , M_a , M_p) için hareketli yük dağılım katsayıları (LLDF) – C_u ; 3m yüksekliğinde uç ayağı kuvvetli (KE) ve zayıf (ZE) dönme eksenine göre yerleştirilmiş HP250x85 ebadında kazıklarla desteklenen ve dolgu etkisinin yapısal modelde alındığı (DV) ve alınmadığı (DY) uzun (UK) ve kısa açıklıklı (KK) integral köprüler için.



Şekil 7. Kiriş, uç ayak ve kazık kesme kuvvetleri (V_d , V_w , V_p) için hareketli yük dağılım katsayıları (LLDF) – C_u ; 3m yüksekliğinde uç ayağı kuvvetli (KE) ve zayıf (ZE) dönme eksenine göre yerleştirilmiş HP250x85 ebadında kazıklarla desteklenen ve dolgu etkisinin yapısal modelde alındığı (DV) ve alınmadığı (DY) uzun (UK) ve kısa açıklıklı (KK) integral köprüler için.



Şekil 8. Kiriş, uç ayak ve kazık momentleri (M_d , M_w , M_p) için hareketli yük dağılım katsayıları (LLDF) – C_u ; 1m ve 1.5m kalınlığında 3m yüksekliğinde uç ayağı kuvvetli HP250x85 ebadında kazıklarla desteklenen ve dolgu etkisinin yapısal modelde alındığı (DV) ve alınmadığı (DY) uzun (UK) ve kısa açıklıklı (KK) integral köprüler için.



Şekil 9. Kiriş, uç ayak ve kazık momentleri (V_d , V_a , V_p) için hareketli yük dağılım katsayıları (LLDF) – C_u ; 1m ve 1.5m kalınlığında 3m yüksekliğinde uç ayağı kuvvetli HP250x85 ebadında kazıklarla desteklenen ve dolgu etkisinin yapısal modelde alındığı (DV) ve alınmadığı (DY) uzun (UK) ve kısa açıklıklı (KK) integral köprüler için.

Ayrıca, AASHTO hareketli yük dağılım katsayıları ile integral köprülerin kirişleri için elde edilen katsayılar karşılaştırılmıştır (Şekil 4-9). Bu karşılaştırma sonucunda kiriş momenti için elde edilmiş olan hareketli yük dağılım katsayıları ile AASHTO formüllerinden hesaplanan katsayılar %0.3 ila %10.4 arasında farklılık göstermekle birlikte AASHTO katsayıları her bir durum için emniyetli olmaktadır. Kesme kuvveti için bu farklılık %1.2 ila %9.1 arasında değişmekle birlikte, AASHTO katsayıları bazı durumlar için emniyetli bazı durumlar için emniyetsiz sonuçlar vermektedir. Ayrıca yapılan bu çalışma sonucunda AASHTO formüllerinin integral köprülerin kazık ve uç ayak hareketli yük dağılım katsayılarını hesaplamak için kullanılamayacağı anlaşılmıştır.

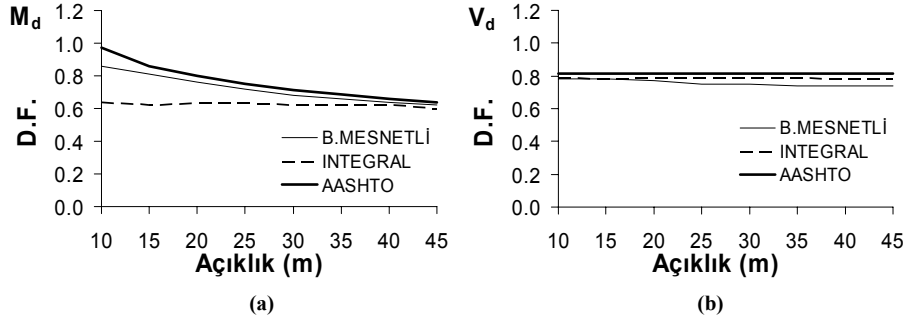
9.2 Uç Ayak-Tabliye Sürekliliğinin Hareketli Yük Dağılım Katsayılarına Etkisi

Çizelge 2’de verilmiş olan parametrelere göre, integral ve basit mesnetli olarak yapısal modelleri kurulan köprüler AASHTO hareketli yükleri altında analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen ve AASHTO hareketli yük dağılım formüllerinden elde edilen katsayıların, sırasıyla açıklığa, kiriş tipine, tabliye kalınlığına, şerit sayısına ve kiriş aralığına göre değişimlerini gösteren grafikler Şekil 10-14.’de verilmiştir.

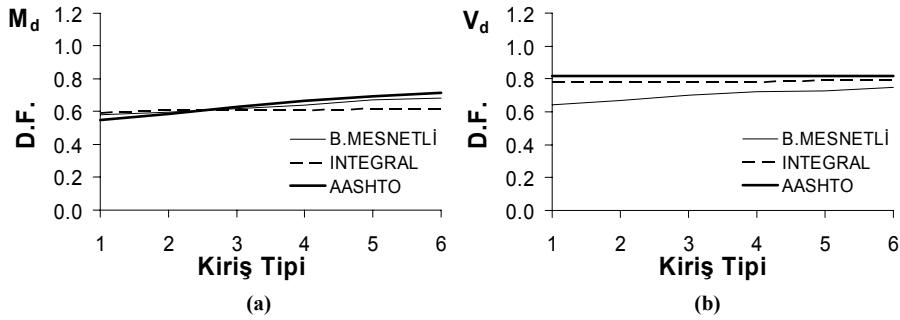
Şekil 10-14(a) kiriş momenti (M_d) için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarını sırasıyla, açıklığın, kiriş tipinin, tabliye kalınlığının, şerit sayısının ve kiriş aralığının bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekil 10(a)’da görüldüğü gibi, özellikle kısa açıklıklı köprülerde, uç ayak-tabliye sürekliliği kiriş momentini hareketli yük dağılım katsayılarını oldukça etkilemektedir. AASHTO’da genleşme derzli köprüler için geliştirilmiş olan

formüllerden kiriş momenti için elde edilen katsayılar integral köprüler için elde edilmiş olan katsayılardan kısa açıklıklı köprülerde %50 oranında büyük olmaktadır. AASHTO moment hareketli yük dağılım katsayılarının kısa açıklıklı integral köprülerde kullanılmasının aşırı maliyetli sonuçlar vereceği açıktır. Farklı kiriş aralıklarına göre yapılmış olan analiz sonuçları da uç-ayak tabliye sürekliliğinin moment hareketli yük dağılımını etkilediği ve AASHTO formüllerinden hesaplanan formüllerin integral köprüler için kullanılması durumunda aşırı maliyetli sonuçlar elde edileceğini göstermektedir (Şekil 14(a)).

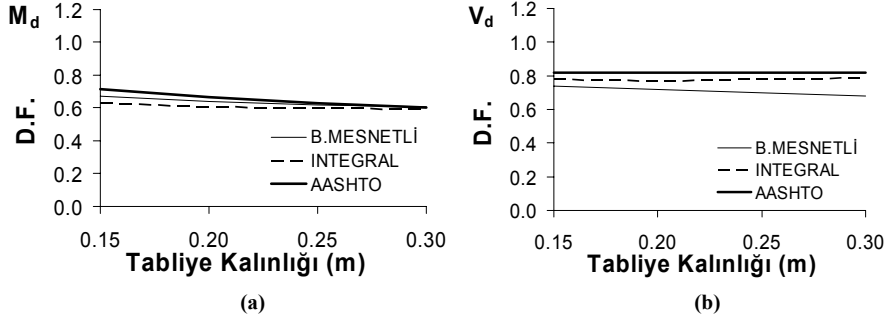
Şekil 10-14(b) kiriş kesme kuvveti (V_d) için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarını sırasıyla, açıklığın, kiriş tipinin, tabliye kalınlığının, şerit sayısının ve kiriş aralığının bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu grafiklerden anlaşıldığı gibi, uç ayak-tabliye sürekliliği kiriş kesme kuvveti için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarını azda olsa etkilemesine rağmen, AASHTO formüllerinden elde edilen hareketli yük dağılım katsayılarının integral köprüler için oldukça uyumlu olduğu saptanmıştır.



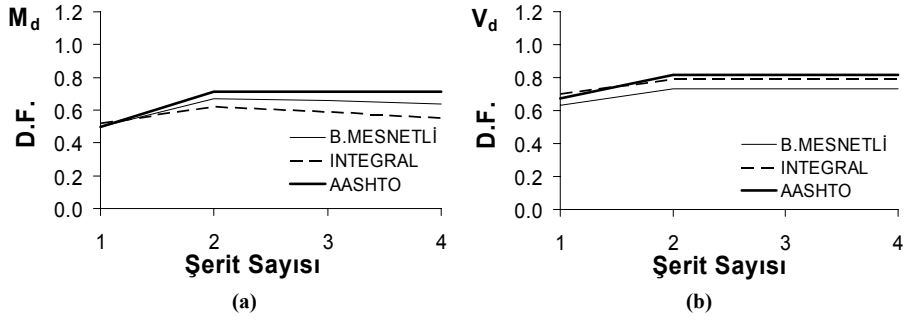
Şekil 10. Dağılım katsayısı- Açıklık.



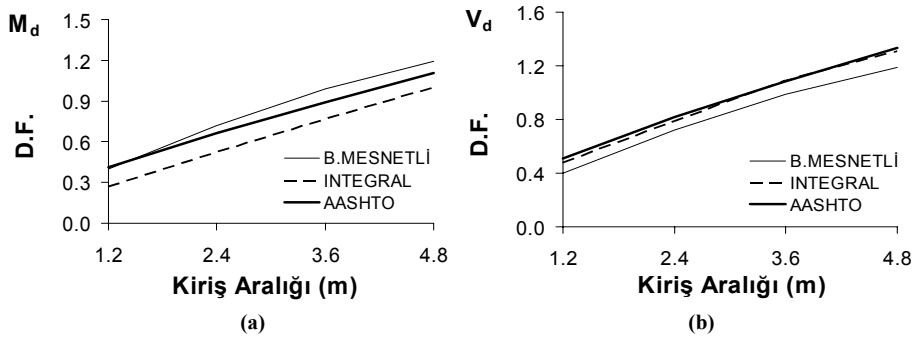
Şekil 11. Dağılım katsayısı- Kiriş tipi.



Şekil 12. Dağılım katsayısı- Tabliye kalınlığı.



Şekil 13. Dağılım katsayısı- Şerit sayısı.



Şekil 14. Dağılım katsayısı- Kiriş aralığı.

Teşekkür

TÜBİTAK'a 106M169 nolu proje kapsamında bu çalışmanın gerçekleşmesi için sağlamış olduğu maddi destekten dolayı teşekkür ederiz. Bu çalışmadan elde edilen sonuç ve öneriler sadece yazarlara aittir.

Kaynaklar

- [1] Dicleli M., A rational Design Approach for Prestressed-Concrete-Girder Integral Bridges. *Engineering Structures*, 22 (3), 230-245, 2000.
- [2] Lehane B.M., Keogh D.L., O'Brien E.J., Simplified elastic model for restraining effects of backfill soil on integral bridges. *Computers and Structures*, 73, 303-313, 1999.
- [3] Faraji S., Ting J.M., Crovo D.S., Ernst H., Nonlinear analysis of integral bridges: finite element model, *Journal of Geotechnical and Geoinvironmental Engineering*, ASCE, 127(5), 454-462, 2001.
- [4] Dicleli M., Albhaisi S.M., Maximum length of integral abutment bridges supported on steel h-piles driven in sand. *Engineering Structures*, 25(12), 1491-1504, 2003.
- [5] Dicleli, M., Albhaisi, S.M., Effect of cyclic thermal loading on the performance of steel h-piles in integral bridges with stub-abutments. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(2), 161-182, 2004.
- [6] Dicleli M., Integral abutment-backfill behavior on sand soil - pushover analysis approach. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 10(3), 354-364, 2005.
- [7] Khodair Y.A., Hassiotis, S., Analysis of soil-pile interaction in integral abutment. *Computers and Geotechnics*, 32(3), 201-209, 2005.
- [8] Brena, S.F., Bonczar, C., Civjan, S.A., DeJong, J., Crovo, D.S., Evaluation of seasonal and yearly behavior of integral abutment bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 12(3), 296-305 2007.
- [9] Civjan, S.A., Bonczar, C., Brena, S.F., DeJong, J., Crovo, D., Integral abutment bridge behavior: parametric analysis of a Massachusetts bridge. *Journal of Bridge Engineering*. ASCE, 12(1), 64-71, 2007.
- [10] SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. *Computers and Structures Inc.* Berkeley, California, 2006.
- [11] Mabsout, M.E., Tarhini, K.M., Frederick, G.R., Tayar, C., Finite Element Analysis of Steel Girder Highway Bridges. *Journal of Bridge Engineering* ASCE, 2(3), 83-87, 1997.
- [12] Hindi, R., Yousif, Z. Live Load Distribution Factor for Highway Bridges Based on AASHTO-LRFD and Finite Element Analysis. *Proc. of the ASCE Structures Congress*, St. Louis, MI, CD-ROM, 2006.

İntegral Köprülerde Hareketli Yük Dağılımına Yapı-Zemin Etkileşimi ve ...

- [13] Hays C.O., Sessions L.M., Berry A.J., Further studies on lateral load distribution using a finite element method. *Transp. Res. Rec.* 1072:6-14, 1986.
- [12] Imbsen, R.A., Nutt, R.V., Load distribution study on highway bridges using STRUDL finite element analysis capabilities. *Proceedings, Conference on Computing in Civil Engineering*, ASCE, New York, NY. 1978.
- [14] Brockenbrough R.L. Distribution factors for curved I-girder bridges. *Journal of Structural Engineering*, 112(10), 2200-2215, 1986.
- [15] Tarhini, K.M., Frederick, R.G. Wheel Load Distribution in I-Girder Highway Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 118(5), 1285-1295, 1992.
- [16] Mourad, S., Tabsh, W. S. Deck Slab Stresses in Integral Abutment Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 4(2), 125-130, 1999.
- [17] Evans L.T., *Simplified Analysis of Laterally Loaded Piles*. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, California, 1982.
- [18] Dicleli M., Mansour, M., Constantinou, M. C., Efficiency of Seismic Isolation for Seismic Retrofitting of Heavy Substructured Bridges. *Journal of Bridge Engineering ASCE*, 10(4), 429-441, 2005.