İMO Teknik Dergi, 2009 4865-4889, Yazı 319

Kablolu Bir Köprünün Deprem Davranışının μ-sentezli Aktif Kontrolü

Gürsoy TURAN*
Petros VOULGARIS**
Lawrence A. BERGMAN***

ÖZ

Bu çalışmada çeşitli kontrol algoritmalarının etkinliğini birbiriyle karşılaştırmak amacıyla oluşturulmuş bir kablolu köprü kontrol model örneği [1, 2] baz alınmıştır. Köprünün sonlu elemanlar modeli modal önem sırasına göre küçültülerek 1/6 boyutunda bir kontrol tasarım modeli elde edilmiştir. Köprünün deprem hareketi sırasındaki kritik noktaları dikkatle gözlenmiş, ve yol seviyesinde kule kesme kuvvetlerinin oluştuğu noktaların kontrolü en zor noktalar olduğunu ortaya konmuştur. Kontrol amaçlı olarak hidrolik pistonlar kullanılmıştır. Belirsizliği tolere edebilen bir tasarım önerisiyle, tasarım modeli ile değerlendirme modeli arasındaki fark sınanmıştır. Ayrıca μ-sentezi esas alınarak bir kontrol denklemi kurgulanmıştır ve bununla birlikte davranış benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: μ-sentezi, aktif kontrol, kablolu köprü, model küçültülmesi

ABSTRACT

Earthquake Response Control of a Cable-Stayed Bridge by using μ-synthesis

This study is based on a benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges that is introduced to compare the effectiveness of various control algorithms [1, 2]. The finite element model of the bridge is arranged according to its modal importance and is reduced to 1/6'th of its size. Special attention is given to the control of critical locations of the bridge response. Among these, the tower shear forces at the deck level were the hardest to reduce by using hydraulic actuators. An uncertainty tolerant design is introduced to account for the design model difference from the evaluation model. Finally, a μ-synthesis based controller is designed and used in the closed loop system simulation of the bridge.

Keywords: μ-synthesis, active control, cable-stayed bridge, model reduction

---

Not: Bu yazı
- Yayın Kurulu'na 19.11.2007 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2009 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - gursoyturan@iyte.edu.tr
** University of Illinois, Dept. of Aero. & Astro. Eng., Urbana, ABD - petros@decision.csl.uiuc.edu
*** University of Illinois, Dept. of Aero. & Astro. Eng., Urbana, ABD - lbergman@illinois.edu

1. GİRİŞ

Kablolu köprüler geniş açıklıkların geçilmesinde tercih edilen yapım tekniklerin başında gelmektedir. Söz konusu köprüler eğik gergi kablolarından dolayı büyük iç kuvvetlere sahiptirler. Deprem esnasında bu iç gerilmeler büyük değişkenlikler göstermektedir ve bu etkilerin azaltılması maksadıyla günümüzde pasif enerji sönümleyiciler kullanılmaktadır. Bunlar genellikle amortisörler olup yol tabliyesi ile kule arasındaki hareketi azaltmak için kullanılmaktadırlar. Köprünün deprem sarsıntısı anındaki davranışını ve dolayısıyla iç kuvvetlerini daha da azaltmak için aktif yöntemler kullanmak için çalışmalar yürütülmüştür. Dyke ve diğerleri [1] optimal kontrol yöntemi kullanarak örnek bir çalışma oluşturmuş, başka araştırmacıların da kullanabileceği bir köprü model sağlayarak karşılaştırmalı bir ortam yaratmışlardır. Turan ve diğerlerin [3,10] çalışmasında optimal kontrol ve μ-sentezli kontrol uygulaması baz alınmıştır. Bossens ve Preumont [13] laboratuvar ortamında 1/40 ölçekli kablolu bir köprünün kablolarına bağlı kontrol aygıtları ile köprü davranışını iyileştirmişlerdir. Hansen [12] köprü tabliyesine açısı değiştirilebilen kanatlar yerleştirip rüzgara karşı aktif kontrol denklemleri üretmiştir. Yarı-aktif kontrol alanında ise değişik kontrol yöntemleri denenmiştir [7, 8, 9, 11]. Bunlar arasında büyük bir fark ile en iyi sonuca ulaşan Moon ve diğerlerinin yapmış oldukları kayma modlu kontrol uygulaması olmuştur.

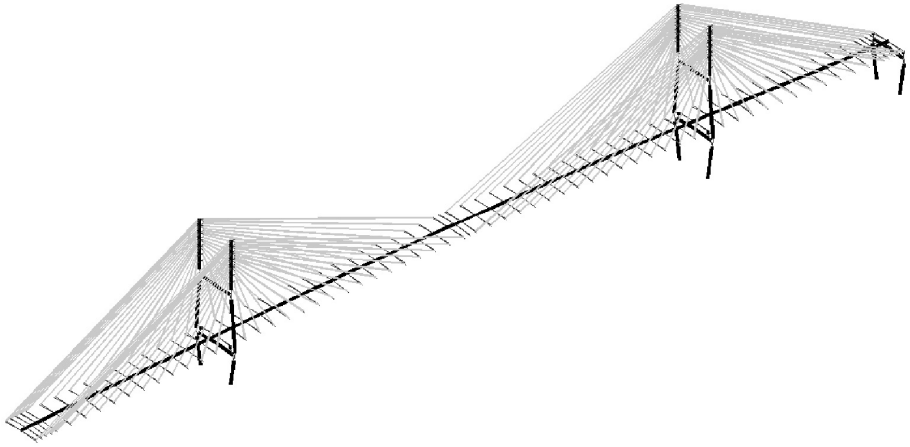
Aktif kontrol yöntemlerin yüksek enerji ihtiyaçlarından ötürü depreme karşı uygulamalarda tercih edilmemektedirler. Bunların yerine hibrit (veya yarı aktif) kontrol uygulamaları ile gerçekçi sonuç alınabileceği bilinmektedir. Buna rağmen aktif kontrol çalışmaların faydaları vardır: i) Davranış iyileştirmesinin üst sınırı hakkında bilgi edinmek mümkündür. ii) Pasif veya yarı-aktif kontrol uygulamaların kontrol denklemleri çoğunlukla aktif kontrol denklemiyle hesaplanmaktadır ve bu kuvveti elde etmek için pasif sistem parametreleri değiştirilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, olumsuz köprü davranışların azaltılmasıdır. Dyke ve ekibinin [1, 2] çalışmasında köprüler konusunda bilgi birikimi olan bilim insanlarına başvurulmuş ve onların yönlendirmeleriyle, özellikle iki konu üzerinde durulmuştur. İlk aşama için tek boyutlu deprem sarsıntısı ile kontrol edilmesi istenen köprünün: 1. Sarsıntının, köprünün uzunlamasına uygulanması gerektiğidir. 2. Kablolu köprülerdeki kritik iç kuvvetlerin, kuledeki kesme kuvvetleri, momentleri ve temelde oluşan momentler oldukları belirlenmiştir. Bu doğrultuda μ-sentezi ile oluşturulan kontrol denklemi sayesinde iç kuvvetler büyük ölçüde azaltılmış. Özellikle de yol seviyesindeki kule kesme kuvveti azaltılabilmiştir.

2. KABLOLU KÖPRÜ MODELİ

Bu çalışmada yapımı 2003'te tamamlanan, Cape Girardeau, MO, A.B.D.'deki kablolu köprünün sonlu elemanlar modeli esas alınmıştır [1, 2]. Köprünün orta açıklığı 350,60 metre, yan açıklıkları ise 142,70'şer metredir. Köprü dört şeritlidir ve bisikletler için iki dar şerit daha bulunmaktadır. H görünümündeki kulelerin yükseklikleri 102,40 ve 108,50 metredir ve yükseklikleri boyunca kuleler 5 farklı kesite sahiptirler (Şekil 2). Kulelerin herbir kolu 64 kablo desteklemektedir (toplam 128). Yol döşeme genişliği 29,26 metre olup, çelik kirişler üzerinde öngerilmeli betondan oluşmaktadır. Köprünün toplam ağırlığı 50.000 ton'dur. Köprünün üst geçidi ile kuleleri arasına, her biri 6,67 MN dayanımda, 16

adet sismik iletim aygıtları bulunmaktadır. Bunlar sıcaklık farkına duyarlı ve anlık yer değişimlerinde sonsuz sertmiş gibi davranabilen amortisörlerdir. Bu cihazlar sayesinde köprü, sıcaklık farklarından kaynaklanan, iç kuvvetlerden büyük ölçüde arındırılmış. Daha iyi bir davranış elde edebilmek amacıyla, bu cihazların yerine, kuvvet aktarıcıları (pistonları) yerleştirilmiştir. İlgili kuvvetler aktif kontrol denklemi ile belirlenmiş, herhangi bir zamanda köprünün durumu (deplasmanlar, hızlar, ve bunlara bağlı olan iç kuvvetler vs.) kontrol edilmiştir.

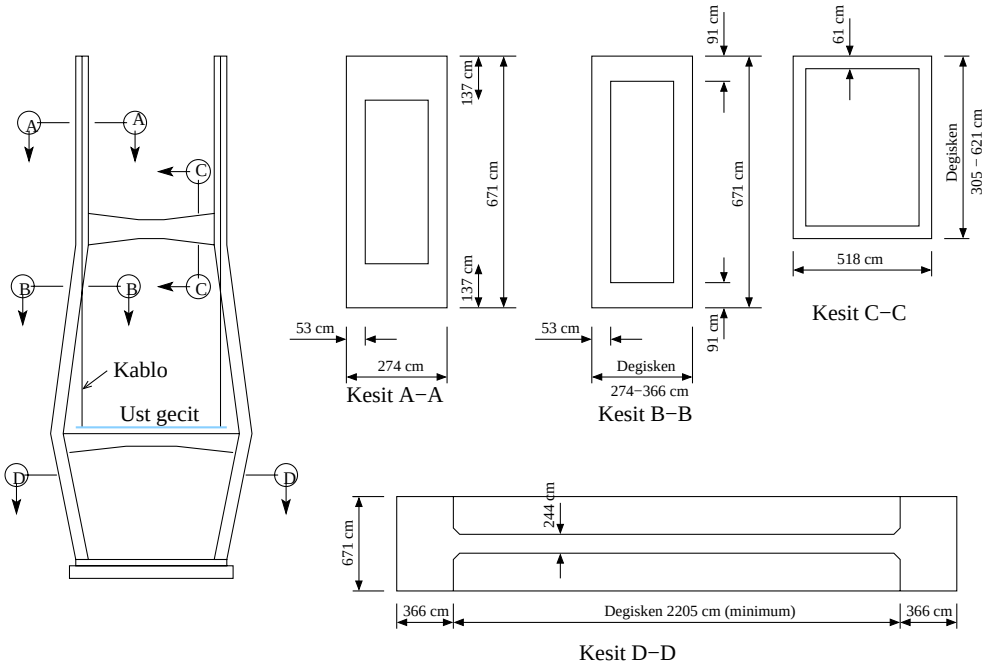


Şekil 1. Köprünün sonlu elemanlar modeli

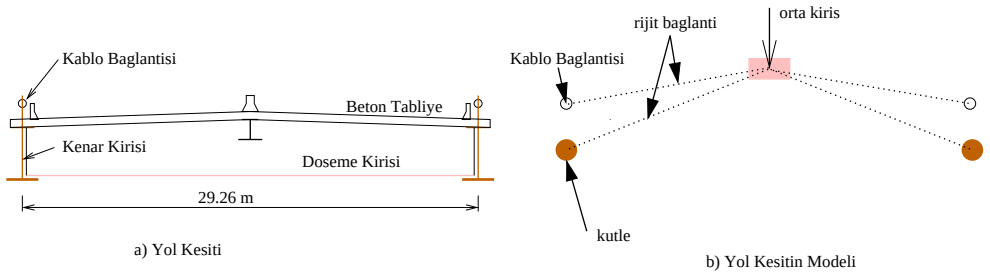
Şekil 1'de gösterilen köprü 579 düğüm noktası, 420 rijit bağlantı, 162 kiriş elemanı, 128 eksenel kuvvet elemanları ve 134 adet noktasal kütleden oluşmaktadır. Kuleler 50 düğüm noktası ile 43 kiriş elemanı ile modellenmiştir. Kabloların kuleye olan bağlantı noktaları rijit bağlantılarla en yakın kule düğüm noktasına sabitlenmiştir. Yol döşemesi de kiriş elemanlardan oluşmaktadır. Kirişlerle birbirine bağlanan düğüm noktaları kesitin kayma ekseni doğrultusunda yerleştirilmiştir. Kablolar, kulelerde olduğu gibi, rijit bağlantı elemanlarıyla düğüm noktalarına monte edilmişlerdir. Yol kesitinin gerçek ataletini elde etmek için şekil 3'te gösterildiği gibi ilave kütleler kullanılmıştır. Bunlar yine rijit bağlantı elemanlarıyla düğüm noktalarına bağlanmışlardır. Sonuçta, bu kütleler ile kirişlerin kütlesi toplamı yolun kütlesine eşit, kütle dönme ataletlerin toplamı da yolun kütle ataletine (kesitin yatay, dikey ve dönme yönleri göz önünde bulundurulmuştur) eşit olmaktadır. Uygulanan bu benzetim ile tek bir fark bulunmaktadır: Oluşturulmuş olan kesit modeli birinci burulma moduna ayarlanmıştır. Dolayısıyle ikinci ve daha yüksek burulma modlarının frekansları gerçek köprününkilerini doğru yansıtamayacaktır [3].

Köprünün kendi ağırlığı altındaki deformasyonu doğrusal olmayan statik analiz programı, ABAQUS® (1998), ile hesaplanmıştır. Yükleme sonrasında orta açıklığın en tepe noktası 27 cm aşağı inmiştir. Bu değer, toplam kavisin yaklaşık %10'una karşılık gelmektedir. ABAQUS'ün hesapladığı eleman rijitlik matrisleri MATLAB® ortamında birleştirilerek yapının üç boyutlu rijitlik matrisi elde edilmiştir (ABAQUS bütün yapıya ait rijitlik matris bilgisini çıktı olarak vermemektedir). Kütle matrisi doğrudan MATLAB® ortamında

oluşturulmuştur. Köprünün %3'lük modal sönümlemesi olduğu düşünülerek [1] yapının sönümleme matrisi hesaplanmıştır. Bu durumda köprünün 3429 serbestlik derecesi vardır.

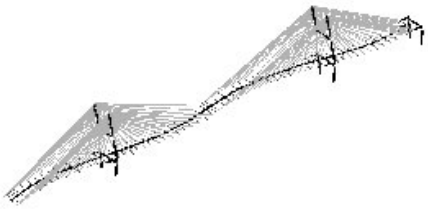


Şekil 2. Kule kesitleri

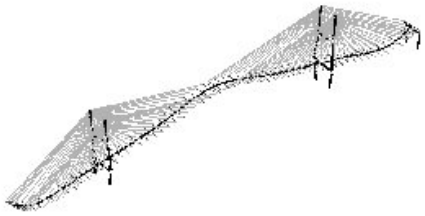


Şekil 3. Yol kesiti

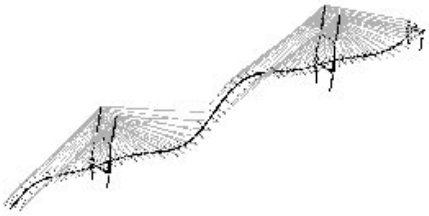
Mesnet ve rijit bağlantı noktalarının indirgenmesiyle bu sayı 909'a inmiştir. Statik sıkıştırma metoduyla belirli serbestlik dereceleri çevresindekilerle ifade edilebilmiş ve bu şekilde serbestlik dereceleri 419'a indirilmiştir. Bu durumda en küçük 100 modun frekansları değişmemektedir (150 Hz'e kadar).



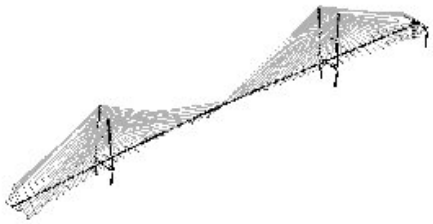
a) Mod 1: uzunlama tabliye



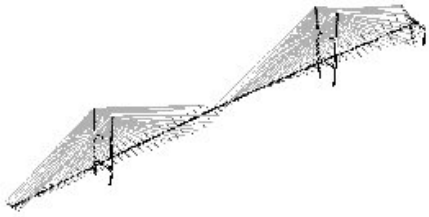
b) Mod 2: (dikey 1)



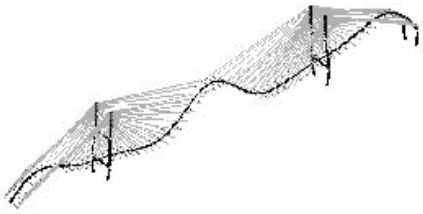
c) Mod 3: (dikey 2)



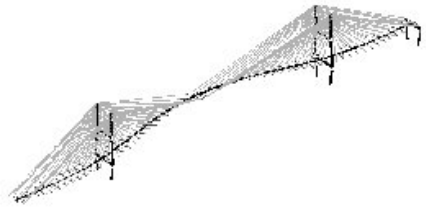
d) Mod 4: (burulma 1)



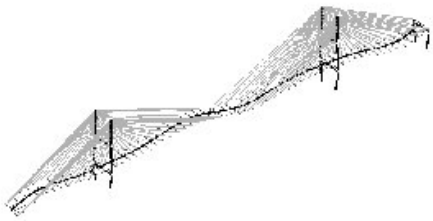
e) Mod 5: (burulma 2)



f) Mod 6: (dikey 3)



g) Mod 7: (yatay 1)



h) Mod 8: (dikey 4)

Şekil 4: Köprü modeline ait ilk 8 modun davranış biçimleri

Tablo 1 Köprü modelin doğal titreşim frekansları

Mod	ω^{ABAQUS} rad/s	ω rad/s	ω_h rad/s
1	0,995	1,017	1,821
2	1,663	1,675	2,323
3	2,323	2,340	2,942
4	2,809	2,857	3,240
5	3,105	3,152	3,651
6	3,518	3,551	4,077
7	3,852	3,889	4,201
8	4,045	4,077	4,379

Tablo 1'de köprünün doğal titreşim frekansları gösterilmektedir. İkinci sütundaki değerler ABAQUS programıyla hesaplanmış, üçüncü sütundakiler MATLAB ortamında oluşturulmuş olan modele aittir ve sonuncusu ise sismik iletim aygıtlarının köprü modelinden çıkarıldıktan sonraki (MATLAB ortamında hesaplanan) frekanslardır. Tablodan anlaşılacağı gibi, ABAQUS modeli ile MATLAB'da birleştirilen model birbirine çok yakındır. İlk sekiz frekanslar arasındaki fark %2'yi aşmamaktadır. Sekiz moda bağlı köprü deformasyon biçimleri şekil 4'de gösterilmektedir.

3. KONTROL MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Köprünün hareket denklemi aşağıda gösterilen ikinci dereceden diferansiyel denklem ile ifade edilebilir.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\Gamma\ddot{x}_g \tag{1}$$

Bu denklemde x yer hareketine göre köprünün rölatif deplasmanı olup 419 serbestlik derecesine sahiptir. $\ddot{x}_g$ köprü uzunlamasına yer hareketinin ivmesi, Γ yer hareketini köprünün uzunlamasına olan serbestlik derecelerine devreden vektördür (1 ve 0'lardan oluşmaktadır). M, C ile K köprünün üç boyutlu kütle, sönümleme (modal %3) ve rijitlik (sismik iletim aygıtları olmadan) matrisleridir. K matrisi doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmıştır [3].

Kontrol hesapları birinci dereceden diferansiyel denklemleri baz aldığı için, $q = \{x^T \quad \dot{x}^T\}^T$ ve deprem vektörüne ilave olarak içinde algılayıcılara etkiyen gürültü

vektörü de dahil edilmiş olan $\mathbf{d}_{gür} = \left\{ \ddot{\mathbf{x}}_g^T \quad \nu_a^T \right\}^T$ değişimini uygulanmış denklem 1'i birinci dereceden diferansiyel bir sisteme dönüştürülmüştür.

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{A}\mathbf{q} + \mathbf{B}_1\mathbf{d}_{gür} + \mathbf{B}_2\mathbf{u} \tag{2}$$

Denklem 2'de belirtilen u değişkeni sonradan eklenen kontrol kuvvet vektörünü temsil etmektedir. B_2 kontrol kuvvetlerini durum vektördeki değişimine devreden matris, A köprü bilgilerini barındıran sistem matrisidir ve B_1 gürültü etkisini durum vektördeki değişimine devreden matristir. Matrisler aşağıdaki gibi ifade edilmişlerdir.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\mathbf{M}^{-1}\Gamma & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\Gamma_u \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3}$$

Γ_u kontrol kuvvetini uygulama noktasına tatbik eden matristir. Denklem 2 ile sistemin davranışı elde edilmiştir. Kontrol edilecek olan değerler köprünün serbestlik dereceleri ile dış etkenleri kullanarak hesaplanmış, ve benzer şekilde, geri besleme için ölçülen değerler aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{z} &= \mathbf{C}_1\mathbf{q} + \mathbf{D}_{11}\mathbf{d}_{gür} + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_2\mathbf{q} + \mathbf{D}_{21}\mathbf{d}_{gür} + \mathbf{D}_{22}\mathbf{u} \end{aligned} \tag{4}$$

Yukarıdaki denklemde z kontrol edilecek olan ve y ölçüm ile algılanan köprü davranışlarıdır. z ve y değerlerinin q, $d_{gür}$ ve u ile hesaplanması için C ve D matrislerine uygun değerler verilmiştir. Ölçüm yapılırken algılayıcıların özelliğine göre gürültü de ölçülmüştür. Ölçümde bulunan gürültü ν_a, bir dış etken olduğu için, deprem etkisi ile aynı tarafta tutulmuş ve toplu olarak $d_{gür}$ vektörü ile gösterilmiştir. ν_a'nın $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 'ye olan kovaryans oranı 1/25 olarak seçilmiştir.

Algılayıcılar aşağıdaki şekilde konumlandırılmıştır:

a) kule tepelerinde köprü istikametinde ivme algılayıcıları (toplam 4 adet)

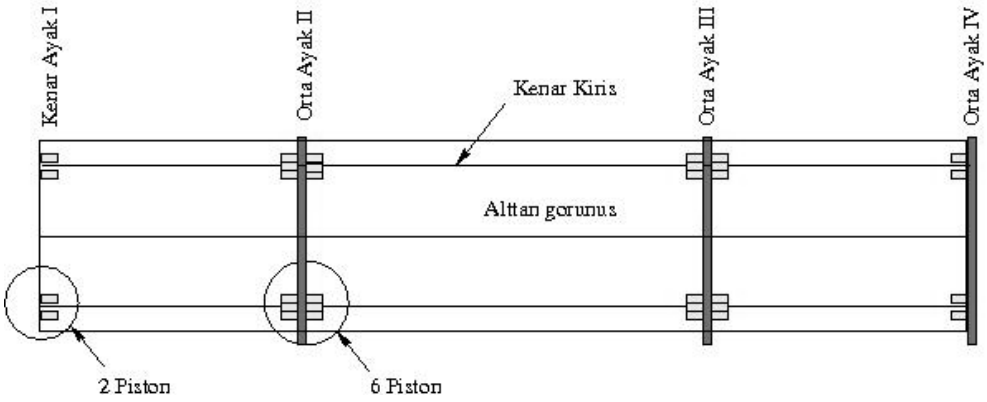
b) yol geçidinin her iki tarafında dikey yönde ivme algılayıcıları (toplam 4 adet)

c) piston hareketin deplasman ve hızını ölçen algılayıcılar (toplam 8 adet)

Kontrol edilmiş olan davranışlar

a) kule tepelerinin köprü yönündeki ivmeleri (4 adet)
b) pistonların deplasmanları (8 adet)
c) pistonların hızları (8 adet)
d) zemine aktarılan kule kesme kuvveti (4 adet)
e) yol seviyesindeki kule kesme kuvveti (4 adet)
f) zemine aktarılan kule momentler (4 adet)
g) yol seviyesindeki kule momentleri (4 adet)

Kontrol için sismik iletim aygıtların yerine her biri 1000 kN kuvvet üretebilen pistonlar yerleştirilmiş olduğu düşünülmüştür. Orta ayak II ve III'te dörderli sismik iletim aygıtları varken, bunların yerine 6'lı piston grupları yerleştirilmiştir. Buna ilave olarak kenar ayak I ve orta ayak IV'e de dörder adet piston konumlandırılmıştır. Şekil 5'te pistonların belirtilmiş olduğu köprü yol seviyesinin alt görünüş şeması gösterilmektedir.



Şekil 5. Kontrol pistonların yerleşimleri (Köprünün alt görünüşü)

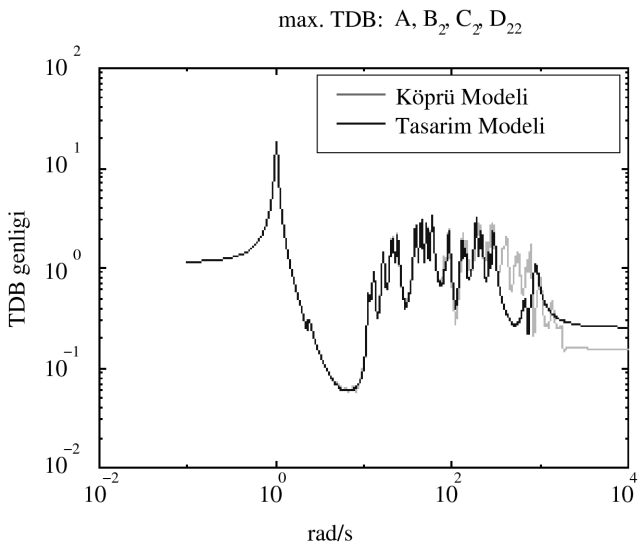
Denklem 2 ve 4 köprü modelini (KM) oluşturmaktadır. 838 serbestlik derecesinden oluşan bu modelin, μ-sentezi ile bir kontrol denkleminin bulunması için (bilgisayarın hızı ve bellek miktarına bağlı olarak) küçültülmesi gerekir. Sistem denklemi dengeli gerçekleşim ("balanced realization") oluşturacak şekilde dönüştürülmüştür. Bu işlem ile, KM'nin serbestlik dereceleri; giriş-çıkış ilişkisine bağlı olarak, tekil değer bozunumlarına (TDB) ("singular value decomposition") ayrıştırılmış ve büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Sistemin kontrol edilebilen ve algılanabilen modlarına karşılık gelen tekil değerleri birbirinin aynısı olacak şekilde dönüştürülmüş ve önem sırasına göre yerleştirilmiştir. Tekil değerlerin en büyük 64'ü seçilmiş ve geriye kalanlar sistemden çıkartılmıştır. Oluşan köprü tasarım modelinin (KTM) sadece 64 serbestlik derecesi bulunmaktadır. TDB dönüşümünden dolayı bu serbestlik derecelerinin fiziksel bir anlamı bulunmamaktadır, fakat modelin giriş ve çıkışlarının anlamı değişmemiştir.

Şekil 6'da KM ve KTM'nin frekansa bağlı olarak kontrol sinyal girişi (u) ile algılayıcı çıkışının (y) TDB davranışları frekansa bağlı olarak gösterilmektedir. Aralarındaki fark dikkate alındığında, 120 rad/s'ye (20 Hz) kadar iki modelin uyum içerisinde oldukları söylenebilir. Daha büyük frekanslarda ise önemli sayılabilecek farkları vardır. Diğer giriş-çıkışlar da benzer özellik göstermektedirler [3]. Bu ve başka gerekçelerden kaynaklanabilecek farklılıklara karşı bir önlem olarak, belirsizlik modelleri tasarlanıp KTM'ye dahil edileceklerdir.

4. BELİRSİZLİK MODEL TASARIMI

Köprü kontrolü için oluşturulan denklem, KTM'yi baz almıştır. 20 Hz'ten büyük frekanslarda bu model KM'den farklı davranış sergilemektedir. Yüksek frekanslarda KTM KM'yi doğru yansıtmadığından kontrol sistemi ile iyi sonuçlar beklenemez. Aksine, davranışı daha da kötüleştiren bir kontrol sistemi ortaya çıkabilir. KTM'nin yüksek frekanslardaki farkını dayanılabilir kılmak için 3 ayrı belirsizlik modeli tasarlanmış ve KTM'ye eklenmiştir:

- yer sarsıntısından ölçüm değerlerine olan belirsizlikler, $W_{\ddot{x}_g \to y}$
- kontrol sinyalinden ölçüm değerlerine olan belirsizlikler, $W_{u \to y}$
- kontrol sinyalinden kontrol sinyaline olan belirsizlikler, $W_{u \to u}$



Şekil 6 . Köprü modeli ile köprü tasarım modelinin frekansa bağlı tekil değer davranışları

Sonuncu belirsizlik modeli, zaman gecikmesi için tasarlanmıştır. Kontrol kuvvetinin hesaplanması belli bir zaman gerektirmektedir ve doğrusal kontrol modelinin hesabında bu zaman gecikmesi tasarıma eklenmemiştir, çünkü zaman gecikmesi, ancak doğrusal olmayan yöntemlerle ifade edilebilmektedir [3]. Bu çalışma ile doğrusal bir kontrol denklemi elde edileceğinden dolayı, zaman gecikmesi sisteme belirsizlik olarak dahil edilmiştir.

Frekansa bağlı belirsizlik ağırlık fonksiyonları, toplamsal belirsizlik denklemi kurarak, elde edilebilir. Bu doğrultuda KTM ve belirsizliğin toplamı, KM'ye eşit olarak ifade edilebilir.

$$\widetilde{\mathrm{G}} := \mathrm{G} + \Delta_{u\to y}\mathrm{W}_{u\to y} \tag{5}$$

Burada $\widetilde{\mathrm{G}}$ KM'yi ve G KTM'yi ifade etmektedir. Δ diyagonal matris olup μ-sentezi ile hesaplanmaktadır. Hesaplanacak olan $\mathrm{W}_{u\to y}$, belirsizlik tanımı için frekansa bağlı bir ağırlık matrisidir.

$$\Delta_{u\to y}\mathrm{W}_{u\to y} = \widetilde{\mathrm{G}} - \mathrm{G} \tag{6}$$

$$\overline{\sigma}\left(\Delta_{u\to y}\mathrm{W}_{u\to y}\right) = \overline{\sigma}\left(\widetilde{\mathrm{G}} - \mathrm{G}\right) \tag{7}$$

Burada $\overline{\sigma}$, üst tekil değer bozunum fonksiyonudur ve $\overline{\sigma}\left(\Delta_{u\to y}\right)\le 1$ eşitsizliğinden yararlanılınca [6], denklem 7'den aşağıdaki sonuca varılmaktadır.

$$\overline{\sigma}\left(\mathrm{W}_{u\to y}\right) \ge \overline{\sigma}\left(\widetilde{\mathrm{G}} - \mathrm{G}\right) \tag{8}$$

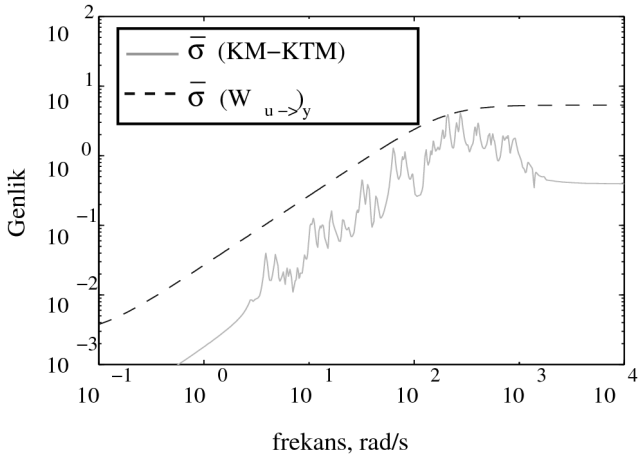
Denklem 8'deki eşitsizliğin her iki tarafı frekansa bağlı skaler fonksiyonlardır. Dolayısıyla, eşitsizliği bozmayacak şekilde $\mathrm{W}_{u\to y}$ için bir fonksiyon oluşturulabilir. $u \to y$'ye olan transfer fonksiyonunun boyutu 9 x 8'dir (9 ölçüm ve 8 kontrol sinyali). Buna göre giriş-çıkış boyutlarını koruyacak şekilde tek serbestlik dereceli bir sistem tasarlanmıştır.

$$\mathrm{W}_{u\to y} = \overline{W}_{u\to y} \cdot 1_{9\mathrm{x}8} \tag{9}$$

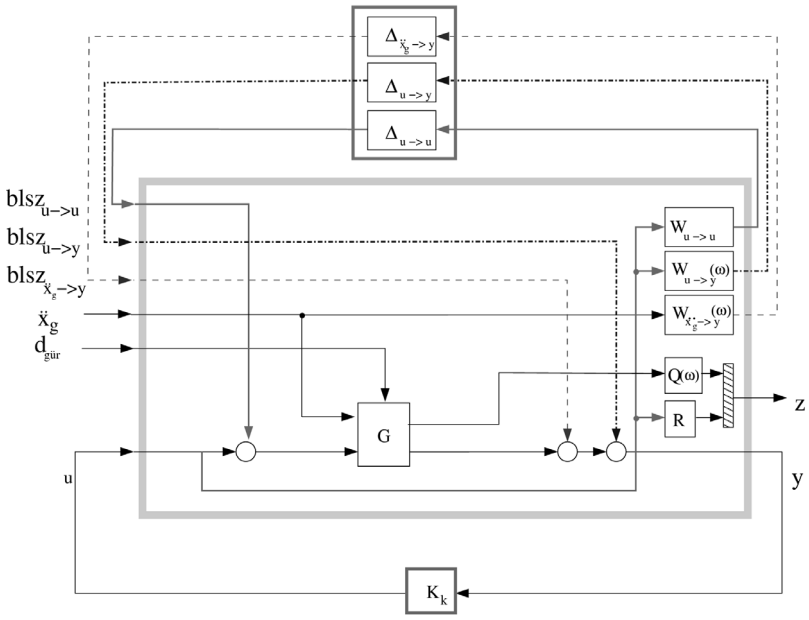
Burada $1_{9\ \mathrm{x}\ 8}$ 9 x 8 boyutunda birlerden oluşan bir matristir (bütün indislerdeki değeri bire eşit). $\overline{W}_{u\to y}$, sıfırı 0,2 ve kökü 300 rad/s'de (0,03 ve 48 Hz) olan bir filtredir.

$$\overline{W}_{u\to y} = 5(s+0{,}2) / (s+300) \tag{10}$$

Sonuç olarak Şekil 7'te gösterildiği gibi, $\bar{\sigma}\left(W_{u\to y}\right) \geq \bar{\sigma}\left(\tilde{\mathrm{G}} - \mathrm{G}\right)$ elde edilmiştir (Birlerden oluşan matris yerine, kontrol giriş – algılayıcı çıkışı ilişkisine göre farklı ağırlıklar verilerek daha optimum bir tasarım elde edilebilir). Benzer şekilde, $\mathrm{W}_{\ddot{x}_g \to y}$ elde edilmiştir. $\mathrm{W}_{u\to u}$ ise, 8 x 8'lik birim matrisi olarak tasarlanmıştır.



Şekil 7. Belirsizlik fonksiyonunun köprü model farkından daha büyük olduğunun gösterilmesi



Şekil 8. Belirsizlik modelinin tasarım şeması

Herbir belirsizlik fonksiyonunu atadıktan sonra tasarım kontrol şemasındaki yerine yerleştirilmiştir. Şekil 8'de gösterilen Q ve R fonksiyonları ise kontrol edilen değişkenlerin önemini vurgulamak için kullanılmıştır. Bunlar sadece kontrol denklemi K_k'nın hesabında kullanılmış, davranış benzetimlerinde yer almamışlardır. Her pistondaki önem katsayısı eşit olması açısından R matrisi için 8 x 8'lik birim matrisi seçilmiştir. Kontrol edilmek istenen davranışlar arasındaki sinyal ağırlığını dengelemek maksadıyla diagonal bir Q matrisi seçilmiştir ve değerleri aşağıda belirtildiği gibidir.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & & & & & & & \\ & q_2 & & & & & & \\ & & q_3 & & & & & \\ & & & q_4 & & & & \\ & & & & q_5 & & & \\ & & & & & q_6 & & \\ & & & & & & q_7 & \end{bmatrix}, \quad \text{ve}$$

$q_1 = 1.0\,10^{3}\ I_4$ kule ivme
$q_2 = 6.0\,10^{6}\ I_8$ piston deplasman
$q_3 = 6.0\,10^{6}\ I_8$ piston hizi
$q_4 = 1.0\,10^{-8}\ I_4$ Kesme kuvveti - zemin
$q_5 = 3.0\,10^{-4}\ I_4$ Kesme kuvveti - yol
$q_6 = 1.0\,10^{-9}\ I_4$ Moment - zemin
$q_7 = 3.0\,10^{-7}\ I_4$ Moment - yol

Yukarıdaki ifadede I_4 ve I_8 sırasıyla 4x4 ve 8x8'lik birim matrislerdir. q_4 zemin seviyesindeki ve q_5 yol seviyesindeki kesme kuvvetlerine verilen kontrol önemini göstermektedirler. Çizelge Ek-2'den bu kuvvetlerin nominal değerlerinin sırasıyla 48.000 ve 4.600 kN mertebelerinde oldukları anlaşılmaktadır. Aralarında yaklaşık 10 kat fark vardır ve kontrol eşitliği sağlansaydı q_4 ve q_5 arasındaki oran 10^2 olmalıydı. Ancak, bu çalışma ile özellikle yol seviyesindeki kule kesme kuvvetine önem verildiğinden bu oran daha da artırılmıştır.

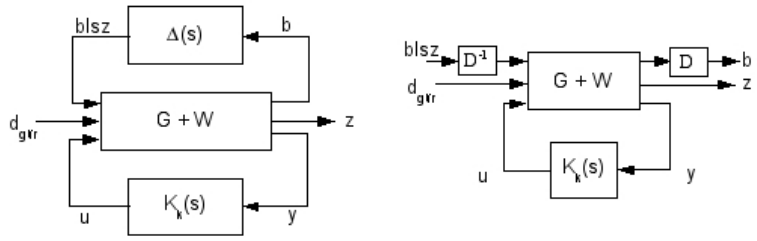
5. μ-SENTEZİ İLE KONTROL DENKLEMININ OLUŞTURULMASI

μ-sentezi, kontrol denklemin oluşturulmasında izlenen yönteme verilen addır. Bu yöntemi diğer kontrol algoritmalardan ayıran en önemli özellik, değişken sistem parametrelerini gürültü olarak gösterirken, genliğini frekansa bağlı olarak optimize edebiliyor olmasındadır. μ değeri aşağıdaki denklik ile tanımlanmış [6]

$$\mu_{\Delta}(M) = \frac{1}{\min_{\Delta}\{\overline{\sigma}(\Delta) : \det(I - M\Delta = 0)\}} \tag{11}$$

ve sağlıklı bir kontrol için $\max_{\omega} \overline{\sigma}(\Delta(j\omega)) \le 1$ olarak belirtilmiştir. Bu denklemdeki M değişkeni (G+W) ile K_k'nın birlikte oluşturdukları sistemi ifade etmektedir.

İlke olarak, $\mu_{\Delta}(.)$'nın en büyük değerini minimize eden Kontrol denkleminin (K_k) bulunmasıyle [4, 5, 6, 14] (bkz. Şekil 9) amaca ulaşılmış sayılır.



a) kapalı sistem şeması b) DK iterasyonu için sistem şeması

Şekil 9. μ-sentezi için oluşturulan sistemin şeması

Doğrudan çözümü henüz belirlenmiş değil, ancak alt ve üst sınır değerleri hesaplanabilmektedir. Aşağıdaki eşitsizlik kullanarak μ değerinin sınırları tayin edilmektedir.

$$\rho(M) \le \mu_{\Delta}(M) \le \overline{\sigma}(M) \tag{12}$$

Burada ρ(M), *M*'nin spektral yarı çapıdır (*M*'nin en büyük öz değeri) ve $\overline{\sigma}(M) = \sqrt{\rho(M^T M)} = \sqrt{\rho(M M^T)}$. ρ(M) ile $\overline{\sigma}(M)$ birbirine yakın olduğunda otomatik olarak μ'nın çözümü de yakın olarak hesaplanabilir, ancak bu durum güvenilir değildir.

$\Delta D = D\Delta$ eşitliğini sağlayan diagonal bir *D* matrisi bulunup denklem 12'deki *M* sistemi DMD^{-1} ile değiştirildiğinde μ değeri etkilenmeyip, sadece alt ve üst sınırları değişir. Öyle ki, alt sınır her zaman bir eşitliktir [6]. Ancak, μ-normun hesabında olası en büyük değer gözetilmelidir, çünkü sistemin stabilitesi buna bağlıdır.

$$\rho(\Delta M) = \mu_{\Delta}(M) \le \inf_{D}\left(\overline{\sigma}(DMD^{-1})\right) \tag{13}$$

Denklem 13'te belirtilen inf(.), infimum fonksiyonu olup setteki en küçük değere yada yakınsamasına eşittir. Buna göre optimal μ-kontrolü için aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$\min_{K_k} \max_{\omega} \min_{D}\left(\overline{\sigma}(DMD^{-1})\right) \tag{14}$$

$U^T U=I$ olacak şekilde *D* matrisi *U* ile çarpıldığında en yüksek TDB etkilenmemektedir. Bundan dolayı, *D*'nin faz açısı önemsizdir ve reel, stabil ve minimum fazlı bir sistem ile değiştirilebilir [6, 14]. Son olarak, frekans aralığındaki en yüksek TDB fonksiyonu yerine H_∞ normu kullanıldığında denklem 14 şu şekli almaktadır:

$$\min_{K_k} \min_{D(s)} \left\| D(s) M D(s)^{-1} \right\|_\infty \tag{15}$$

Bu şekliyle μ-sentezli kontrol probleminin iterasyon ile bulunması mümkün olmaktadır.

DK iterasyon yöntemi [14]:

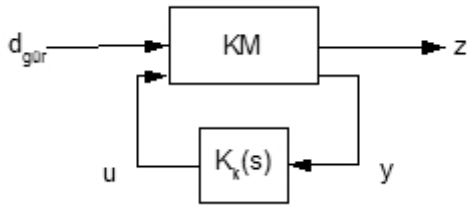
1. K_k'nın hesabı: D(s) sabit tutularak, optimum K_k hesaplanır.
2. $\mu_\Delta(M)$ tahmin edilir: $\mu_\Delta(M) < 1$ olmalıdır. Başarılı olunamazsa devam edilir.
3. *D(s)*'in hesabı: K_k sabit tutularak, herbir frekans değeri için aşağıdaki konveks optimizasyon denklemini minimize eden *D* bulunur.
   $$\inf_D \bar{\sigma}\left[DMD^{-1} \right]$$
   Hesaplanan *D*'nin yerine reel, rasyonel, stabil ve minimum faz açısı bulunan bir *D(s)* fonksiyonu oluşturulur.
4. Yeni oluşturulan *D(s)* sisteme yerleştirildikten sonra iterasyona devam etmek üzere birinci şıkka dönülür. μ-normu küçülten daha iyi bir kontrol denklemi, K_k, bulunamıyorsa (veya belli bir iterasyon sayısına ulaştıktan sonra) iterasyondan çıkılır.

Birinci döngüde *D(s)* birim matrisi olarak kabul edilir ve daha sonra hesaplandığında gerçek değeri ile güncellenir.

Bu çalışmada yukarıdaki D-K iterasyonunu otomatik hale getiren Matlab μ-paleti kullanılmıştır [4]. 64 serbestlik dereceli bir kontrol modeli ile başlanan hesabın sonucunda 262 serbestlik dereceli bir kontrol denklemi (sistemi) elde edilmiştir. Dengeli indirgeme yöntemi ile bu sayı 130'a indirilmiştir.

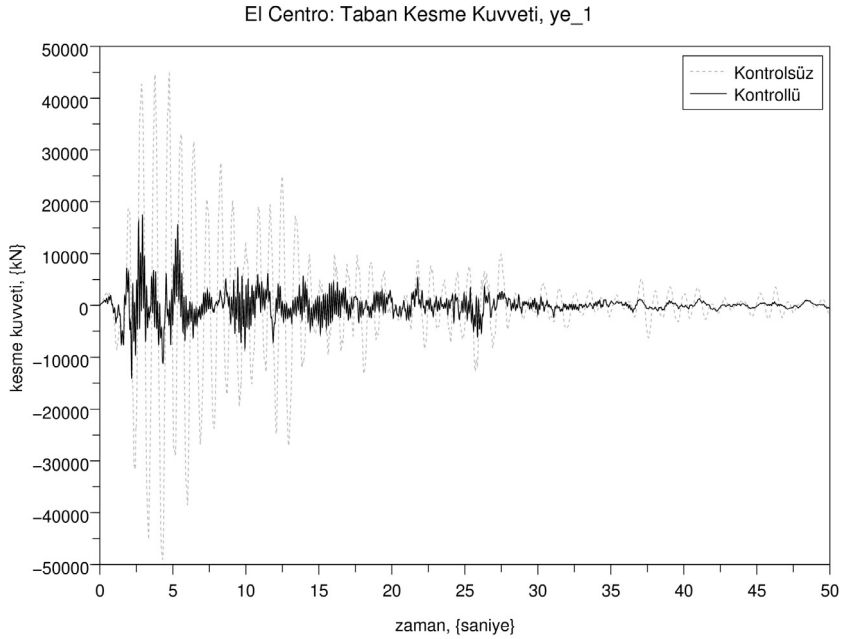
6. DAVRANIŞ BENZETİMİ VE SONUÇLAR

KM'ye geri besleme sağlamak amacıyla algılayıcı çıkışı y ve kontrol girişi u arasına kontrol sistemi K_k monte edilmiştir (Şekil 10). Burada dikkat çekilmesi gereken konu, K_k'nın 419 dereceli ikinci dereceden diferansiyel model için tasarlanmadığıdır. Sadece 64 serbestlik dereceli köprü tasarım modeli ile belirsizliklerden oluşan toplamda 262 serbestlik dereceli bir sistem için tasarlanmıştır ve KM'nin geri beslemesini sağlayacağıdır. Köprüyü dengeden uzaklaştıran deprem hareketi $\ddot{x}_g$ ve alıgılayıcılara etkiyen gürültüyü ν_a dikkate alarak köprünün davranışı benzetilmiştir. Kontrolör etkisinin en iyi görüldüğü değişkenlerden biri olan taban kesme kuvvetinin zamana göre davranışı Şekil 11'de gösterilmektedir. Kontrolsüz davranışta sismik iletim aygıtları yerinde iken, kontrollü davranışta kuvvet aktarıcı pistonlar mevcuttur. Şekilden anlaşılacağı gibi en büyük kesme kuvveti kontrolsüz davranışta 50.000 kN civarındayken, kontrollü davranışta 20.000'nin altına indirilebilmiştir. En zor kontrol altına alınan değişken ise yol seviyesindeki kule kesme kuvvetidir. Bunun da zamana bağlı kontrollü ve kontrolsüz davranış benzetimi Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 10. Davranış benzetim şeması: köprü modeli ile kontrol denklemi K_k

Öncelikle, KM'nin, kontrol denkleminin indirgenmiş ve indirgenmemiş modelleriyle davranış benzetimi irdelenmiştir ve sonuçları Çizelge 1'de sunulmuştur. Bu çizelgede belirtilmiş olan karşılaştırma değişkenleri Çizelge-Ek 1'de açıklanmış ve karşılaştırma değerleri Çizelge-Ek 2'de belirtilmiştir. Hesaplanmış olan μ-sentezi bazlı kontrolörün indirgenmesiyle en büyük davranış değerlerinde çok küçük bir fark ortaya çıkmıştır. Toplamsal davranışlarda ise indirgenmiş modelin yaklaşık yarı yarıya daha az davranışlar doğurduğu söylenebilinir.



Şekil 11. El Centro depremi etkisi altında taban kesme kuvvetinin zamana göre değişimi

Kontrol denkleminin uygun sonuçlar elde edebildiği gösterildikten sonra, karşılaştırma için üç değişik deprem girdisi ile köprünün davranışı benzetilmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2'nin ikinci sütununda belirtilen gösterge, bu köprünün kontrolünde standard olup, başka çalışmalarla karşılaştırma yapabilmek için kullanılmıştır [1, 2]. J_1- J_{11} ve J_{13} göstergeleri, köprünün kontrollü davranışının kontrolsüz davranışına oranını ortaya koymaktadır (Ancak daha önce de belirtildiği gibi, kontrolsüz davranışta, kuvvet aktarıcılarının yerinde sismik iletim aygıtları bulunmaktadır). J_{12} en büyük kontrol kuvvetinin köprü ağırlığına (50.000 ton) olan oranıdır. J_{14} en büyük kontrol gücünün köprü ağırlığının kule üst noktasındaki hızı ile çarpımının oranıdır. Çizelge-Ek 1'de bunların formülleri gösterilmiş ve Ek 2'de baz değerler belirtilmiştir.

Çizelge 1 . Kontrol denkleminin indirgenme etkisi

Deprem	Gösterge[†]	El Centro 262	El Centro 130
max. taban kesme kuvveti	J_1	0,360	0,399
max. üst geçit düzeyinde kule kesme kuvveti	J_2	0,712	0,656
max. taban momenti	J_3	0,280	0,313
max. üst geçit düzeyinde kule momenti	J_4	0,503	0,499
max. kablo kuvvetinde sapma	J_5	0,185	0,181
max. üst geçit yer değiştirmesi	J_6	0,962	1,125
norm taban kesme kuvveti	J_7	0,424	0,235
norm üst geçit düzeyinde kule kesme kuvveti	J_8	1,095	0,500
norm taban momenti	J_9	0,395	0,212
norm üst geçit düzeyinde kule momenti	J_{10}	0,970	0,449
norm kablo kuvvetinde sapma	J_{11}	0,032	0,015
max. kontrol kuvveti	J_{12}	0,001961	0,001961
max. aygıt hareketi	J_{13}	0,632	0,739
max. güç	J_{14}	0,002596	0,003060
toplam güç	J_{15}	0,000206	0,000121
aygıt adeti	J_{16}	32	32
algılayıcı adeti	J_{17}	9	9
kontrol özkaynakları	J_{18}	262	130

[†] J_1 – J_{18}'e kadar olan değişkenlerin tanımı Ek 1'de verilmektedir.

Bu köprü için en zorlu kontrol J_2 dir (üst geçit düzeyinde kule kesme kuvveti). Kablolu köprüler konusunda birikimi olan bilim insanlarının belirttiklerine göre, kule kesme kuvvetleri dikkat edilmesi gereken en önemli unsurların başında yer almaktadırlar. Bu köprünün kuleleri tabandan yol düzeyine kadar dolu, yolun üzerinde ise boşluklu olarak devam etmektedirler. Kesitteki bu dönüşüm ani olarak gerçekleşmektedir. Sonuçları belirtilmiş olan diğer kontrol uygulamalarının hiçbirinde J_2 oranı 1'in altına indirilememiştir [7, 8, 9].

J_5 kablo gerilmesindeki değişim oranını belirtmektedir. Üç farklı deprem simülasyonu sonucunda J_5'in en büyük değeri %18 olarak hesaplanmıştır. Cape Girardeau köprüsündeki 128 gergi kabloların nominal gerilimleri 1500 ile 5000, dayanımları ise 4700 ile 12900 kN arasında değişmektedir. Buna bağlı olarak %18'lik bir değişimin önemsiz olduğu ifade edilebilir – kablolarda gerilim kaybı yada aşırı yükleme oluşmamıştır.

7. KONTROL DENKLEMININ DAYANIKLILIĞI

Çizelge 2'deki sonuçlara göre kontrol kanunu ile köprü modelinin oluşturduğu kapalı devre kontrol sistemi uygun sonuçlar üretmektedir. Bu kontrol denkleminin gerçek köprülerle yapılacak çalışmalarda da benzer sonuçlar sergilemesi istenir. Gerçek köprü dinamiğinin, oluşturulan KM'den daha farklı olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, KM ile iyi sonuçlar oluşturan kontrolör, gerçek köprüde aynı başarıyı elde edemeyebilir. Buna ek olarak kablolu köprünün hareketi sırasında, doğrusal olmayan davranış sergilemesi düşünüldüğünde, kontrolörün dayanıklılığı önem kazanmaktadır, çünkü kontrolör tasarımı köprünün durağan hali için tasarlanmıştır. (Köprü modeli, hareketsiz hal için, kendi ağırlığı altında yapmış olduğu doğrusal olmayan kalıcı yer değiştirmesinden sonra elde edilen doğrusal modelden oluşur [3]). Köprü hareket ettiği sırada bu halden çıkar ve farklı rijitliğe sahip olur.

μ-sentezli kontrol tasarımında eklenen belirsizlik modelleri, kontrol sistemine bir miktar dayanıklılık kazandırmıştır. Dayanıklılık derecesinin belirlenmesi için, köprü rijitliği değiştirilerek, davranış benzetimleri incelenmiştir. Rijitlik matrisi aşağıdaki gibi değişikliğe uğratılmıştır.

$$K_{sars} = K\,(1+\delta) \tag{17}$$

Burada, K rijitlik matrisi, δ sarsma miktarı ve K_{sars} sarsılmış rijitlik matrisidir. Bu sarsılmış rijitlik matrisi ile denklem 2 ve 4 ile ifade edilen köprü modeli yeniden oluşturulmuştur. Ardından, bu model ile kısım 4'te hesaplanan, indirgenmemiş (262 serbestlik dereceli) kontrol denklemi ile kapalı devre sistem oluşturulmuştur. δ = {-%10, -%7, +%7, +%10} değerleri ile El Centro depremi etkisi altında davranış benzetimleri yapılmıştır. Yapılan benzetimlerin sonuçlarına göre tasarlanan kontrol modelinin, rijitlik matrisinin %7'lik değişimine kadar dayanıklı olduğu ve %10'luk değişimlerde davranışlarının çok arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 9'de köprünün kontrolsüz ve kontrollü davranışları üst üste gösterilmektedir. Kontrolsüz davranışı δ = 0'a karşılık gelen rijitlik matrisi ile oluşturulan köprü modelidir. Kontrollü davranış ise bu sisteme göre tasarlanan kontrol denkleminin, δ kadar değiştirilen köprü modeline, geri besleme olarak monte edildiği duruma aittir. δ = -

0,07 durumunda köprüde oluşan 0,3 saniyelik salınım kontrol altına alınamamıştır. Diğer yandan δ = +0,07 'lik durumda da hem 0,3, hem de 3 saniyelik salınımlar kontrolsüz kalmıştır. Ancak, her iki sınır durumunda da sistem davranışı daha kötüye gitmemektedir.

Çizelge 2 . Sonuç Karşılaştırma Tablosu

Deprem	Gösterge	El Centro	Mexico City	Gebze
max. taban kesme kuvveti	J_1	0,399	0,777	0,456
max. üst geçit düzeyinde kule kesme kuvveti	J_2	0,656	0,815	0,710
max. taban momenti	J_3	0,313	0,665	0,330
max. üst geçit düzeyinde kule momenti	J_4	0,499	0,574	1,019
max. kablo kuvvetinde sapma	J_5	0,181	0,058	0,132
max. üst geçit yer değiştirmesi	J_6	1,125	2,318	2,993
norm taban kesme kuvveti	J_7	0,235	0,580	0,317
norm üst geçit düzeyinde kule kesme kuvveti	J_8	0,500	0,665	0,869
norm taban momenti	J_9	0,212	0,426	0,408
norm üst geçit düzeyinde kule momenti	J_{10}	0,449	0,830	1,227
norm kablo kuvvetinde sapma	J_{11}	0,015	0,006	0,015
max. kontrol kuvveti	J_{12}	0,001961	0,001200	0,001961
max. aygıt hareketi	J_{13}	0,739	1,168	1,641
max. güç	J_{14}	0,003060	0,001912	0,005340
toplam güç	J_{15}	0,000121	0,000064	0,000126
aygıt adeti	J_{16}	32	32	32
algılayıcı adeti	J_{17}	16	16	16
kontrol özkaynakları	J_{18}	130	130	130

8. SONUÇ

Bu çalışmada kablolu bir köprünün aktif kontrolü yapılmış, deprem hareketi ve iç kuvvetleri azaltılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında köprünün sonlu elemanlar modeli kontrol uygulamasına uygun hale getirilmiştir. Bu amaçla 419 serbestlik derecesine sahip ikinci dereceden bir diferansiyel denklem, 64 serbestlik dereceli birinci dereceden diferansiyel bir denkleme dönüştürülmüştür. Oluşturulan bu küçük model ile başlangıç modeli arasındaki farkın kapatılması için belirsizlik modelleri oluşturulmuştur. μ-sentezi ile

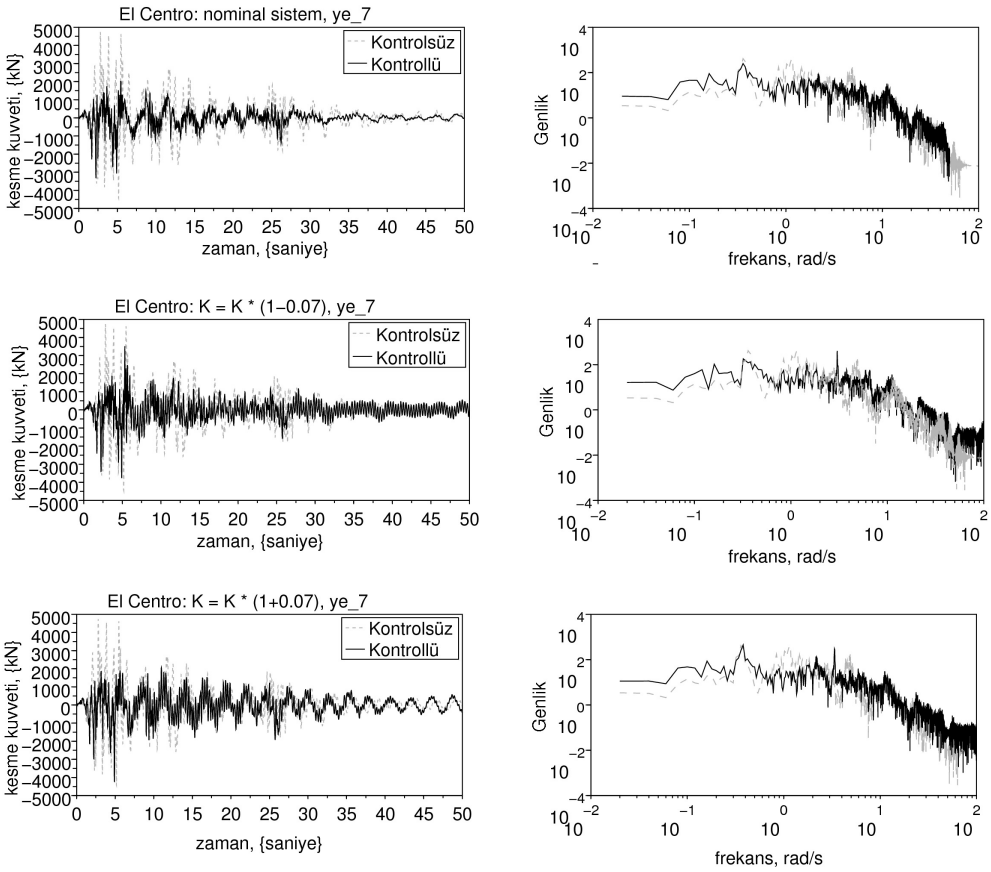
bir kontrol denklemi elde edilmiştir. Bu kontrol denklemi kullanılarak köprünün üç değişik deprem hareketine karşı davranışı benzetilmiş; iç kuvvetlerde %50'den fazla bir azalma elde edilmiştir.

Kontrol denkleminin köprü modelindeki olası küçük hatalara karşı dayanıklı olduğunu göstermek amacıyla davranış benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Köprü rijitlik matrisinde yapılan ±%7 'lik değişimler, kontrolörün dayanıklığını olumsuz yönde etkilememiştir.

Yapılan dayanıklık analizin sonuçları Çizelge 3'de sunulmuştur. Burdaki sonuçlara göre J_2 dışındaki en büyük davranış değerlerinde önemli bir değişiklik oluşmamış olduğu görülmektedir. Toplam davranış değerlerinde ise genel, fakat önemsiz miktarda, bir artış söz konusudur. Gösterilen sonuçlardan en çarpıcı olanı, toplam güç harcamasının yarı yarıya azalmasıdır.

Çizelge 3 . Dayanıklılık benzetim sonuçları

El Centro Deprem	Gösterge	$\delta = 0$	$\delta = 0.07$	$\delta = -0.07$
max. taban kesme kuvveti	J_1	0,360	0,376	0,493
max. üst geçit düzeyinde kule kesme kuvveti	J_2	0,712	0,909	1,082
max. taban momenti	J_3	0,280	0,273	0,343
max. üst geçit düzeyinde kule momenti	J_4	0,503	0,518	0,659
max. kablo kuvvetinde sapma	J_5	0,185	0,184	0,168
max. üst geçit yer değiştirmesi	J_6	0,962	0,979	1,145
norm taban kesme kuvveti	J_7	0,424	0,470	0,625
norm üst geçit düzeyinde kule kesme kuvveti	J_8	1,095	1,482	1,333
norm taban momenti	J_9	0,395	0,422	0,509
norm üst geçit düzeyinde kule momenti	J_{10}	0,970	1,221	1,151
norm kablo kuvvetinde sapma	J_{11}	0,032	0,042	0,037
max. kontrol kuvveti	J_{12}	0,001961	0,001961	0,001961
max. aygıt hareketi	J_{13}	0,632	0,643	0,752
max. güç	J_{14}	0,002596	0,002376	0,002943
toplam güç	J_{15}	0,000206	0,000094	0,000117
aygıt adeti	J_{16}	32	32	32
algılayıcı adeti	J_{17}	16	16	16
kontrol özkaynakları	J_{18}	262	262	262



Şekil 12: Nominal rijitlik matrisi K'da yapılan değişikliklerle köprü davranışının benzetimi: Yol seviyesindeki kule kesme kuvveti

Semboller

A	Köprü modelinin sistem matrisi
B_1	Gürültü etkisini durum vektördeki değişime devreden matristir.
B_2	Kontrol kuvvetlerini durum vektördeki değişime devreden matristir.
C	Köprü modelin üç boyutlu sönümleme matrisi
C_i	z veya y değerlerinin q ile hesaplanması için gerekli matrislerdir.
D	μ-yöntemin iterasyonu ile hesaplanan bir matris
D(s)	*D* ile aynı şiddete sahip olup reel, stabil ve minimum fazlı bir sitemdir.
D_{ij}	z veya y değerlerinin $d_{gür}$ ve u ile hesaplanması için gerekli matrislerdir.
$d_{gür}$	Gürültü vektörü

G	bkz. KTM
$\tilde{G}$	Hataları göz önünde bulundurarak daha iyi bir köprü tasarım modelidir.
GAMMA_u	Uygulanan kontrol kuvvetlerini serbestlik derecelerine tatbik eden matristir.
I_4	Diagonalleri 1 ve geri kalanı sıfır olan 4x4'lük birim matrisidir.
I_8	Diagonalleri 1 ve geri kalanı sıfır olan 8x8'lik birim matrisidir.
J_i, i=1..18	bkz. Çizelge-Ek 1 ve Çizelge-Ek 2
K	Köprü modelin üç boyutlu rijitlik matrisi
K_k	Kontrol denklem matrisidir.
KM	419 serbestlik dereceli köprü modelin ikinci dereceden diferansiyel modelidir. Davranış benzetiminde kullanılmıştır.
K_{sars}	Sarsılmış (değiştirilmiş) rijitlik matrisidir.
KTM	64 serbestlik dereceli köprü modelin birinci dereceden diferansiyel modelidir. Kontrol tasarımında kullanılmıştır.
M	Köprü modelin üç boyutlu kütle matrisi
M	Köprü tasarım modeli ve belirsizlik modelleri ikilisine geri besleme sağlayan kontrol denklemiyle oluşan sistemdir.
Q	Kontrol edilecek olan köprü davranışlarının önem katsayılarını barındıran matris
q	Köprü modelin durum vektörü (serbestlik derecelerin deplasman ve hızı)
q_i	Q'ya ait i'nci alt matrisidir.
R	Kontrol sinyal büyüklüğünün önem katsayılarını barındıran matris
U	$\bar{\sigma}(D) = \bar{\sigma}(UD)$ ve $U^T U = I$ olacak şekilde seçilmiş bir *U* matrisidir.
$W_{\ddot{x}_g \to y}$	Yer sarsıntısından ölçüm değerlerine olan belirsizliklerdir.
$W_{u \to y}$	Kontrol kuvvetinden ölçüm değerlerine olan belirsizliklerdir.
$W_{u \to u}$	Kontrol kuvvetinden kontrol kuvvetinden olan belirsizliklerdir.
$\overline{W}_{u \to y}$	Skaler bir filtredir.
$x, \dot{x}, \ddot{x}$	Köprü modelin sırasıyla deplasman, hız ve ivme vektörü
$\ddot{x}_g$	Köprünün uzunlamasına olan yer hareketin ivmesi
y	Ölçüm ile algılanan köprü davranış vektörüdür.
z	Kontrol edilecek olan köprü davranış vektörüdür.
$\Delta_{u \to y}$	u'dan y'ye belirsizliğin çarpanıdır. μ ile hesaplanmaktadır.
δ	Rijitlik matrisinin nominal değerinden sarsılma miktarıdır.

Γ	Yer hareketini köprünün uzunlamasına olan serbestlik derecelerine devreden vektör
Γ_u	Kontrol kuvvetini uygulama serbestlik derecesine tatbik eden matristir.
ν_a	Algılayıcılara etkiyen gürültü vektörüdür.
$\mu(.)$	Bir matrisin norm (büyüklük) ifadesidir.
$\rho(.)$	Bir matrisin en büyük öz değeridir.
$\overline{\sigma}(.)$	Üst tekil değer (bir matrisin kendi transpozu ile çarpımına ait en büyük öz değerin karekökü)
ω	MATLAB ortamında hesaplanmış köprü frekansları
ω^{ABAQUS}	ABAQUS sonlu elemanlar programıyla hesaplanmış köprü frekansları
ω_h	MATLAB ortamında hesaplanmış köprü frekansları (sismik iletim aygıtları olmadan)

Kaynaklar

[1] [Dyke, S.J., Caicedo, J.M., Turan, G., Bergman, L.A., and Hague, S., Phase I benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges. Journal of Structural Engineering, ASCE, 129:7, 857-872, 2003.

[2] Dyke, S.J., Caicedo, J.M., Bergman, L.A., Turan, G., Introducing a benchmark control problem for a cable stayed bridge subjected to seismic excitation, China-US Millennium Symposium on Earthquake Engineering, Beyjing, Çin, 2000, (Kaynak: EARTHQUAKE ENGINEERING FRONTIERS IN THE NEW MILLENNIUM, 287-292, 2001)

[3] Turan, G., Active Control of a Cable-Stayed Bridge against Earthquake Excitations, Ph.D. thesis, Dept. of Civil & Env. Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.

[4] Balas, G.J., Doyle, J.C., Glover, K., Packard, A., Smith, R., μ-Analysis and Synthesis TOOL-BOX for use with MATLAB, The Mathworks, Inc. ,1995.

[5] Dailey, R.L., Lecture notes for the workshop on H_∞ and μ methods for robust control, American Control Conference, San Diego, California, 1990.

[6] Zhou, K., Doyle, J.C., Glover, K., Robust and Optimal Control, Prentice Hall, NJ, 1996.

[7] Jung, H.J., Spencer, B.F., Lee, I.W., Benchmark Control Problem of a Seismically Excited Cable-Stayed Bridge Using MR Dampers, Third World Conference on Structural Control, Como, İtalya, 2002

[8] Agrawal, A. K., Yang, J.N., He W.L., Performance Evaluation of Some Semi-active Control Systems For Benchmark Cable-Stayed Bridge, Third World Conference on Structural Control, Como, İtalya, 2002.

[9] Moon, S.J., Bergman, L.A., Voulgaris, P.G., Sliding Mode Control of A Semi-Actively Controlled Cable-Stayed Bridge, Third World Conference on Structural Control, Como, İtalya, 2002.

[10] Turan, G., Voulgaris, P.G., Bergman, L.A., μ-Synthesis Control of a Cable-Stayed Bridge against Earthquake Excitation, Third World Conference on Structural Control, Como, İtalya, 2002.

[11] Ruangrassamee, A., Kawashima, K., Seismic Response Control of a Benchmark Cable-Stayed Bridge by Variable Dampers, Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, AK, 2002.

[12] Hansen, H. I., Active vibration Control of Long Suspension Bridges, Ph.D. Thesis, Dept. Of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1998.

[13] Bossens, F., Preumont, A., Active Tendon Control of cable-stayed bridges: a large scale demonstration. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 961-979, 2001.

[14] Markovski A., Petkov P., Gu D.W. ve Konstantinov M., Fortran 77 Routines for m-synthesis and H design. NICONET Report, SLWN2003-1, Working Group on Software (WGS), Belçika, 2003. (http://www.icm.tu-bs.de/NICONET/REPORTS/SLWN2003-1.ps.gz)

Ek-1 Değerlendirme Ölçütleri

Kontrol denkleminin değerlendirilmesi amacıyla 18 farklı ölçüt ortaya konmuştur [1]. Bunlardan ilk altısı en büyük davranış değerinin azaltılmasına dair ölçütlerdir. Bunu takip eden beş ölçüt ise davranışın normunu (karelerinin toplamı) değerlendirmektedir. Son yedi ölçüt ise kontrol düzeneğinin gereksinimlerini ortaya koymaktadır. Bu değerlendirme ölçütlerinin formülü çizelge-Ek 1'de gösterilmektedir.

Çizelge-Ek 1: Değerlendirme Ölçütleri

En Büyük Davranış	Davranışın Normu	Kontrol Düzeneği
Taban Kesme Kuvveti $J_1 = \frac{\max_{i,t}\lvert F_{Ti}(t)\rvert}{F_{0\mathrm{T}}^{max}}$	Taban Kesme Kuvveti $J_7 = \frac{\max_{i,t}\lVert F_{Ti}(t)\rVert}{\lVert F_{0T}\rVert}$	En Yüksek Kuvvet $J_{12} = \frac{\max_{i,t}\lvert f_i(t)\rvert}{W}$
Yol Seviyesindeki Kule Kesme Kuvveti $J_2 = \frac{\max_{i,t}\lvert F_{Ki}(t)\rvert}{F_{0\mathrm{K}}^{max}}$	Yol Seviyesindeki Kule Kesme Kuvveti $J_8 = \frac{\max_{i,t}\lVert F_{Ki}(t)\rVert}{\lVert F_{0K}\rVert}$	Aygıt Deplasmanı $J_{13} = \frac{\max_{i,t}\lvert y_i^a(t)\rvert}{x_0^{\max}}$
Taban Momenti $J_3 = \frac{\max_{i,t}\lvert M_{Ti}(t)\rvert}{M_{0\mathrm{T}}^{max}}$	Taban Momenti $J_9 = \frac{\max_{i,t}\lVert M_{Ti}(t)\rVert}{\lVert M_{0T}\rVert}$	En Yüksek Güç $J_{14} = \frac{\max_{i,t}\left\lvert \sum_i P_i(t)\right\rvert}{\dot{x}_0^{\max} W}$
Kule Momenti $J_4 = \frac{\max_{i,t}\lvert M_{Ki}(t)\rvert}{M_{0\mathrm{K}}^{max}}$	Kule Momenti $J_{10} = \frac{\max_{i,t}\lVert M_{Ki}(t)\rVert}{\lVert M_{0K}\rVert}$	Toplam Enerji $J_{15} = \frac{\max_{i,t}\sum_i \int P_i(t)\,dt}{x_0^{\max} W}$
Kablo Çekme Kuvveti $J_5 = \frac{\max_{i,t}\lvert T_{ai}(t) - T_{0i}^{\max}\rvert}{T_{0\mathrm{i}}^{max}}$	Kablo Çekme Kuvveti $J_{11} = \frac{\max_{i,t}\lVert T_{ai}(t) - T_{0i}^{\max}\rVert}{\lVert T_{0\mathrm{i}}^{max}\rVert}$	J_{16}=kontrol aygıt sayısı J_{17}=algılayıcı sayısı J_{18}=kontrolörün serbestlik derecesi
Köprü Ayakların Yer Değiştirmesi $J_6 = \frac{\max_{i,t}\lvert x_{ai}(t)\rvert}{x_{0\mathrm{a}}^{max}}$		

Çizelge Ek-1'deki kontrolsüz davranış değerleri köprünün sismik iletici aygıtlarının çıkartılmadan yapılan davranış benzetimi sonucunda elde edilmiştir. Bunlar Çizelge-Ek 2'de gösterilmektedir.

Çizelge-Ek 2: Kontrolsüz köprü davranışından elde edilen ve ölçüt değerlendirmesinde kullanılan sabitler

Davranış	Açıklama	El Centro	MexicoCity	Gebze
$F_{0\mathrm{T}}^{max}$, {kN}	Taban kesme kuvveti	4,878 e+4	1,118 e+4	3,085 e+4
$F_{0\mathrm{K}}^{max}$, {kN}	Yol Seviyesinde Kule Kesme Kuvveti	4,671 e+3	1,525 e+3	3,150 e+3
$M_{0\mathrm{T}}^{max}$, {kN - m}	Taban Momenti	1,027 e+6	1,982 e+5	6,978 e+5
$M_{0\mathrm{K}}^{max}$, {kN - m}	Yol Seviyesinde Kule Momenti	2,205 e+5	8,670 e+4	1,093 e+5
$x_{0\mathrm{a}}$, {m}	Köprü Ayakların Yer Değiştirmesi	9,758 e-2	2,432 e-2	7,192 e-2
$\left\|F_{0\mathrm{T}}^{max}\right\|$, {kN}	Taban kesme kuvveti	5,264 e+3	1,474 e+3	2,609 e+3
$\left\|F_{0\mathrm{K}}^{max}\right\|$, {kN}	Yol Seviyesinde Kule Kesme Kuvveti	4,561 e+2	1,889 e+2	2,312 e+2
$\left\|M_{0\mathrm{T}}^{max}\right\|$, {kN - m}	Taban Momenti	1,163 e+5	3,147 e+4	5,779 e+4
$\left\|M_{0\mathrm{K}}^{max}\right\|$, {kN - m}	Yol Seviyesinde Kule Momenti	2,013 e+4	6,931 e+3	9,507 e+3
x_0^{max}, {m}	Kule Üst Noktalarının Yer Değiştirmesi	0,149	0,048	0,131
$\dot{x}_0^{max}$, {m/s}	Kule Üst Noktalarının Hızı	1,180	0,322	0,618
W, {ton}	Köprü Ağırlığı	50 000	50 000	50 000
T_0^{max}, {kN}	Eksenel kablo kuvveti	1457 – 5052		