



Research Article / Araştırma Makalesi

LMI BASED MIXED H_2/H_∞ STATE-FEEDBACK CONTROL OF CRANE STRUCTURES AGAINST EARTHQUAKE INDUCED VIBRATION

C. Oktay AZELOĞLU*, Ahmet SAĞIRLI

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

Received/Geliş: 17.11.2011 Revised/Düzelme: 02.01.2012 Accepted/Kabul: 09.01.2012

ABSTRACT

This paper deals with the active vibration control of cranes against earthquake induced vibration. For this purpose, firstly a dynamic model is developed and then Linear Matrix Inequalities (LMIs) based mixed H_2/H_∞ state-feedback controller is designed in this study. Performance of the designed controller and active vibration control system is investigated by simulation. The time history of ground motion of the Marmara Kocaeli earthquake in 1999 ($M_w=7,4$), which is a disturbance input, is applied to modeled container crane. Additionally, the performance of the designed controller is also compared with a state-feedback H_∞ controller. Simulation results indicate that superior earthquake induced vibration suppression is achieved by the use of designed controllers and active vibration control system.

Keywords: Mixed H_2/H_∞ state-feedback control, linear matrix inequalities, cranes, earthquake-induced vibration, active vibration control.

DME TABANLI DURUM GERİ-BESLEMELİ KARMA H_2/H_∞ KONTROLÖRLE KRENLERDE YAPISAL TİTREŞİMLERİN KONTROLÜ

ÖZET

Bu çalışmada, krenlerde depremden kaynaklanan yapısal titreşimleri azaltmak için aktif titreşim kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle bir dinamik model geliştirilmiş, ardından Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME) tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolörün ve krenler için önerilen aktif kontrol sisteminin performansı benzetim çalışmaları ile incelenmiştir. Konteyner kreni modeline bozucu giriş olarak 1999 Marmara Kocaeli depremine ($M_w=7,4$) ait yer hareketinin zaman fonksiyonu uygulanmıştır. Ayrıca, tasarlanan kontrolörün performansı durum geri-beslemeli H_∞ kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmasının sonuçları, önerilen aktif kontrol sisteminin ve tasarlanan kontrolörün krenlerde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılmasında başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol, doğrusal matris eşitsizlikleri, krenler, depremden kaynaklanan titreşimler, aktif titreşim kontrolü.

1. GİRİŞ

1995 yılında meydana gelen Kobe depreminde büyük kapasiteli krenlerin kolayca hasar görmesi ve yıkılması krenlerin depreme karşı dayanıklı hale getirilmesini gündeme getirmiştir. Bu önemli

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: azeloglu@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 28 91

deneyimin ardından krenlerin sismik performanslarını arttırmak için çeşitli çalışmalar yürütülmeye başlanmıştır [1, 2]. Bu çalışmalar mevcut probleminin çözümü için farklı yöntemler önermektedir. Bunlar; kren yapısının ilave takviyeler ve donatılar ile güçlendirilmesi [3-5], zemin izolasyonu yoluyla kren yapısına gelen titreşimlerin azaltılması [6] ve kren yapısına gelen titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılmasıdır [7, 8].

Son yıllarda depremden kaynaklanan titreşimleri izole etmek için aktif kontrol uygulamaları öneren çalışmalar hız kazanmıştır. Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının yer değiştirmelerini istenilen düzeyde tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Bu sistemler gelişmiş bilgisayarlar ile donatılmış olup, titreşimlerin etkilerini yapıda bir karşı hareket üreterek sönümlemeye çalışan kontrol sistemleridir [9]. Aktif titreşim kontrolü genel olarak iki kısımdan meydana gelir. Birincisi, sisteme dışarıdan uygulanacak kuvveti yapıya tatbik edecek olan aktif kontrol mekanizması; ikincisi ise, sensörlerden gelen bilgiyi değerlendirip eyleyici tarafından üretilmesi gereken kontrol kuvvetini hesaplayan kontrol algoritmasıdır. Gerekli kontrol kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan algoritmalara, dayanıklı kontrol (H_2 ve H_∞ , Kayan Kipli Kontrol), Bulanık Mantık Kontrol (BMK) ve Adaptif Kontrol yöntemleri örnek olarak verilebilir. Literatürde yapısal sistemlerde depremden kaynaklanan titreşimleri izole etmek için aktif kontrol uygulaması içeren çok sayıda çalışma mevcuttur [10-13]. Yazıcı ve diğerleri [12], dört katlı bir binanın deprem etkisindeki titreşimlerinin aktif kontrolü için DME tabanlı çıkış geri-beslemeli dinamik H_∞ kontrolör tasarlamıştır. Yazıcı ve Güçlü [13], dört katlı bir binanın deprem etkisindeki titreşimlerinin aktif kontrolü için DME tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör tasarımı yapmıştır. Önerilen kontrolörlerin yapısal titreşimlerin azaltılmasında yüksek sönüm performansına sahip olduğu görülmektedir.

Krenlerde depremden kaynaklanan titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması yeni ve gelişmeye açık bir konudur. Bu yolla krenlerin deprem performanslarını arttırmak için yeni bir yöntem önerilmektedir. Literatürde bu konuda yapılan ilk çalışma Sağrılı ve diğerleri tarafından gerçekleştirilmiştir [7]. Bu çalışmada portal krenlerde depremden kaynaklanan titreşimleri ortaya koyacak doğrusal olmayan bir dinamik model geliştirilmiş, ardından tasarlanan kontrolör ile kren yapısının stabilitesi sağlanmıştır. Çalışmada önerilen kontrolcü Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrolör (ÖUBMK) yapısıdır. Sonuçlar portal krenlerde aktif titreşim kontrolünün başarıyla uygulanabileceğini göstermektedir. Azeloğlu ve Sağrılı [8], yapmış oldukları çalışmada bu defa geliştirdikleri ÖUBMK ile konteyner krenlerinde aktif kontrol uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, aktif titreşim kontrolünün konteyner krenlerinde de başarıyla uygulanabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, krenlerde depremden kaynaklanan titreşimlerin aktif kontrolünü DME tabanlı durum geri-beslemeli H_2/H_∞ kontrolör ile gerçekleştirmektir. Bu amaçla çalışmanın ikinci bölümünde krenlerin deprem esnasındaki davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli bir dinamik model geliştirilmiş, üçüncü bölümde DME tabanlı durum geri-beslemeli H_2/H_∞ kontrolörün tasarımı yapılmış ve dördüncü bölümde tasarlanan kontrolörün performansı Marmara Kocaeli depreminin yer hareketinin zaman fonksiyonunun uygulandığı benzetim çalışmalarıyla ortaya konmuştur. Sonuç kısmında kontrol algoritmasının başarısı vurgulanarak, ileride yapılacak çalışmalar vurgulanmıştır.

Notasyon: Bu çalışma boyunca standart bir gösterim kullanılmıştır. \Re reel sayılar kümesini, $\Re^{n \times n}$ ise $n \times n$ boyutlu reel matrislerin kümesini göstermektedir. I , standart iz operatörünü sembolize etmektedir. Birim ve sıfır matrisleri sırasıyla, I ve 0 olarak gösterilmiştir. $X > 0$ ($\geq, < 0$) gösterimi X 'in pozitif tanımlı (pozitif yarı tanımlı, negatif tanımlı) matris olduğunu göstermektedir.

2. DİNAMİK MODEL

Çalışmanın bu bölümünde deprem etkisindeki krenlerde yapısal titreşimlerin incelenbilmesi için, 6 serbestlik dereceli bir dinamik model oluşturulmuştur. Ele alınan kren bir konteyner krenidir.

Depremlerin yıkıcı etkileri yatay titreşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıktığından, serbestlik derecesi sadece bu yönde hesaba katılmıştır. Deprem esnasında konteyner krenleri üzerindeki en büyük yıkıcı etkinin ayaklarda oluşması ve en büyük yer değiştirmelerin kren köprüsü ve üst kısmında meydana gelmesi beklenmektedir. Bu nedenle, aktif kontrol konteyner rıhtımı (zemin) ile yürütme mekanizması arasında uygulanmış ve sistemde aktif izolatör olarak doğrusal motorlar kullanılmıştır. Sistemin fiziksel modeli Şekil 1’de görülmektedir.

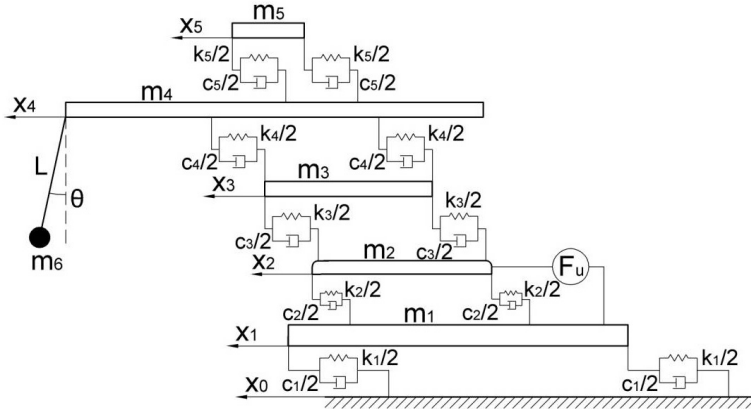
Modelde, $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$ sırasıyla, konteyner rıhtımı (zemin), yürütme mekanizması, rijit kirişler, köprü, üst kirişler ve yükün kütlesi, k_1 ve c_1 toprağın rijitliği ve sönümü, k_2, k_3, k_4 ve k_5 portal ayakların rijitliği, c_2, c_3, c_4 ve c_5 portal ayakların sönümü ve L halatın uzunluğudur. x_0 kren yapısına uygulanan bozucu deprem hareketini, x_1, x_2, x_3, x_4 ve x_5 ilgili kısımların yer değiştirmelerini ve θ yükün salınım açısını ifade etmektedir.

Geliştirilen dinamik model şu kabulleri içermektedir; sistemin serbestlik derecesi yatay doğrultuda alınmıştır, tüm kütle, yay ve sönüm elemanlarının yatay doğrultuda etkili olduğu kabul edilmiştir, modelde yer alan tüm kütleler noktasal kütle olarak kabul edilmiştir, halat rijit ve kütsüz olarak ele alınmıştır, toprağın rijitliği ve sönümü modele dahil edilmiştir ve doğrusal motorlar zemin ile yürütme mekanizması arasına yerleştirilmiştir.

Kren yapısının hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = F_d + F_u \quad (1)$$

Burada $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ \theta]^T$ dir. F_d bozucu kuvvet vektörü, F_u doğrusal motorlar tarafından üretilen kontrol kuvveti; M_s , C_s ve K_s sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri olup Ekte verilmiştir.

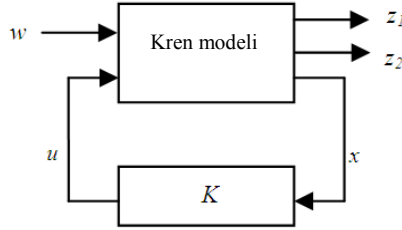


Şekil 1. Deprem etkisi altındaki konteyner kreninin fiziksel modeli

3. DME TABANLI DURUM GERİ-BESLEMELİ KARMA H_2/H_∞ KONTROLÖRÜN TASARIMI

H_∞ optimal kontrol probleminin çözümüne ait ilk çalışmalar, Francis ve Doyle tarafından gerçekleştirilmiştir [14], [15]. Yapılan ilk çalışmalarda H_∞ optimal kontrol problemi, sistemin durum uzay modeli göz önüne alınarak Riccati denklemlerinden yararlanılarak çözülmüştür. Son dönemlerde kontrol alanında sıkça kullanılan ve ilk defa basit olarak Lyapunov'un kararlılık analizinde ortaya çıkan Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME) yaklaşımı, H_∞ kontrolör probleminin çözümüne yeni bir yaklaşım getirmiştir. Scherer, Gahinet ve Chilali yaptıkları çalışmalarla H_∞ ve H_2 kontrol gibi pek çok kontrol probleminin DME haline dönüştürülebileceğini göstermişlerdir [16], [17]. Son dönemlerde, dayanıklı kontrol tekniklerinin çözümünde yaşanan

gelişmelere paralel olarak birçok mühendislik probleminin çözümünde bu kontrol yapıları kullanım alanı bulmuştur. Aktif titreşim kontrolü uygulamaları bunların en önemlilerinden biridir. Özellikle Japonya ve Amerika'da uygulama alanı bulan aktif kontrol tekniklerinde, kontrol algoritması olarak sıklıkla H_2 ve H_∞ gibi dayanıklı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Sistemin bozucu girişlerden etkilenmesinin engellenmesi için, bozuculardan çıkışlara olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu minimum yapma düşüncesiyle ortaya çıkan H_∞ kontrol yapısı, deprem gibi şiddeti ve özellikleri önceden bilinmeyen bozucu girişlerin etkisi altındaki yapısal sistemler için son derece uygun bir kontrol algoritmasıdır. H_∞ kontrol tasarımı daha çok frekans alanıyla ilgilidir. Kapalı çevrim sistemi için iyi bir geçici rejim cevabını garanti edemez. H_2 kontrol ise geçici rejim cevaplarında daha başarılıdır. Bu çalışmada arzu edilen frekans ve geçici rejim cevaplarının elde edilebilmesi için kontrol algoritması olarak, H_2 ve H_∞ kontrol yapılarının DME yaklaşımıyla uygun bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilen karma H_2/H_∞ kontrol yapısı kullanılmıştır. Durum geri-beslemeli kontrolör yapısının blok diyagramı Şekil 2'de görülmektedir. Burada, kren modeli doğrusal zamanla değişmeyen (DZD) sistem olarak ele alınmıştır [18].



Şekil 2. Durum geri-beslemeli kontrolör yapısının blok diyagramı

Kontrol probleminin durum uzay formunda gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \quad (2)$$

$$z_1 = C_1x + D_{11}w + D_{12}u$$

$$z_2 = C_2x + D_{21}w + D_{22}u$$

Burada, $x \in \mathfrak{R}^n$ durum vektörünü, $z_1, z_2 \in \mathfrak{R}^{n_c}$ kontrol çıkış vektörlerini, $w \in \mathfrak{R}^{n_w}$ bozucu giriş vektörünü, $u \in \mathfrak{R}^{m_u}$ kontrol giriş vektörünü göstermektedir. $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$ ve D_{22} matrisleri ise sistemin bilinen uygun boyutlu durum-uzay matrisleridir. Kontrol girişinin $u = Kx$, ($K \in \mathfrak{R}^{m_u \times n}$) gibi durumların doğrusal bir fonksiyonu olduğu kabulünden yola çıkarak (2) ifadesinde verilen kapalı çevrim sistemi elde edilir. Burada K durum geri-beslemeli kontrol kazancını göstermektedir.

$$\dot{x} = (A + B_2K)x + B_1w \quad (3)$$

$$z_1 = (C_1 + D_{12}K)x + D_{11}w$$

$$z_2 = (C_2 + D_{22}K)x + D_{21}w$$

H_∞ performans problemi, kapalı çevrim sistemini (3) kararlı kılacak ve sistemin girişlerinden çıkışlarına olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu, γ gibi bulunabilecek en küçük skaler pozitif bir değerden küçük kılacak bir kontrolör bulmaktır. Bilindiği gibi, H_∞ normu ile DME arasındaki bağlantı sınırlı gerçek yardımcı teoremi kullanılarak yapılır. $V(x) = x^T Px$, $P = P^T > 0$ şartıyla karesel Lyapunov fonksiyonudur. $\gamma > 0$ olmak üzere sistemin performans ve kararlılık kısıtları için tanımlanan aşağıdaki (4) ifadesi, tüm x ve w 'lar için negatif tanımlı olmalıdır.

$$\dot{V}(x) + z_1^T z_1 - \gamma^2 w^T w < 0 \tag{4}$$

(4) ifadesinin (3) ifadesiyle birleştirilmesiyle aşağıdaki eşitsizlik elde edilir.

$$[(A + B_2 K)x + B_1 w]^T P x + x^T P [(A + B_2 K)x + B_1 w] + [(C_1 + D_{12} K)x + D_{11} w]^T \tag{5}$$

$$[(C_1 + D_{12} K)x + D_{11} w] - \gamma^2 w^T w < 0$$

(5) ifadesinin düzenlenmesiyle,

$$\begin{bmatrix} ((A + B_2 K)^T P + P(A + B_2 K) + (C_1 + D_{12} K)^T (C_1 + D_{12} K)) & P B_1 + (C_1 + D_{12} K)^T D_{11} \\ B_1^T P + D_{11}^T (C_1 + D_{12} K) & -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11} \end{bmatrix} < 0 \tag{6}$$

matris eşitsizliği elde edilir. Schur tümleyeni ve (6) ifadesinin sağından ve solundan P^{-1} ile çarpılması sonucunda

$$P^{-1}(A + B_2 K)^T + (A + B_2 K)P^{-1} + P^{-1}(C_1 + D_{12} K)^T (C_1 + D_{12} K)P^{-1} - (B_1 + P^{-1}(C_1 + D_{12} K)^T D_{11}) \tag{7}$$

$$(-\gamma^2 I + D_{11} D_{11}^T)^{-1} (B_1^T + D_{11}^T (C_1 + D_{12} K)P^{-1}) < 0$$

eşitsizliği elde edilir [19]. $X_\infty = P^{-1}$ değişken dönüşümüyle,

$$\begin{bmatrix} ((A + B_2 K)X_\infty + X_\infty(A + B_2 K)^T X_\infty(C_1 + D_{12} K)^T (C_1 + D_{12} K)X_\infty) & B_1 + X_\infty(C_1 + D_{12} K)^T D_{11} \\ B_1^T + D_{11}^T (C_1 + D_{12} K)X_\infty & -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11} \end{bmatrix} < 0 \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} (A + B_2 K)X_\infty + X_\infty(A + B_2 K)^T & B_1 \\ B_1^T & -\gamma I \end{bmatrix} + \frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} X_\infty(C_1 + D_{12} K)^T \\ D_{11}^T \end{bmatrix} [(C_1 + D_{12} K)X_\infty \quad D_{11}] < 0 \tag{9}$$

DME'leri elde edilebilir. Yine Schur tümleyeni kullanılarak $X_\infty > 0$ için, (2) ifadesinde tanımlanan kapalı çevrim sistemin H_∞ performans kısıtları aşağıdaki DME elde edilir.

$$\begin{bmatrix} (A + B_2 K)X_\infty + X_\infty(A + B_2 K)^T & B_1 & X_\infty(C_1 + D_{12} K)^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ (C_1 + D_{12} K)X_\infty & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \tag{10}$$

Bilindiği gibi sistemin bozucu girişlerden çıkışlara transfer fonksiyonunun H_2 normunun $\|Tz_2 w\|_2^2$ sonlu olması, $D_{21} = 0$ şartıyla sağlanır. Durum geri-beslemeli H_2 performans probleminin çözümü, $X_2 = X_2^T$ ve $Q = Q^T$ şartıyla,

$$(A + B_2 K)X_2 + X_2(A + B_2 K)^T + B_1 B_1^T < 0 \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} Q & (C_2 + D_{22} K)X_2 \\ X_2(C_2 + D_{22} K)^T & X_2 \end{bmatrix} > 0 \tag{12}$$

$$iz(Q) < \eta \tag{13}$$

DME'lerinin çözümünden elde edilir. Yukarıda durum geri-beslemeli kontrolör için H_2 ve H_∞ kontrol amaçları DME yaklaşımıyla ayrı ayrı türetilmiştir. Bu iki kontrol kısıtı tek bir yapıda birleştirilerek karma H_2/H_∞ kontrolör yapısı elde edilebilir [20]. Karma H_2/H_∞ kontrol problemi, sistemin bozuculardan çıkışlara transfer fonksiyonları matrisinin H_2 normunu en küçük yapacak ve H_∞ kısıtlarını sağlayacak durum geri-beslemeli K kontrol kazancını bulmaktır. H_2 ve H_∞ kontrol yapılarını birleştirmek için,

$$X = X_2 = X_\infty \tag{14}$$

kabulü ile tanımlanan genel X Lyapunov matrisi kullanılır. Yukarıda elde edilen (10), (11) ve (12) eşitsizlikleri, KX_2 ve KX_∞ terimlerinden dolayı dışbükey değildir. Dışbükeyliği sağlamak için $W = KX$ değişken dönüşümü yapılarak, $X = X^T$ ve $Q = Q^T$ şartları altında H_2/H_∞ kontrol problemini çözen,

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + B_2W + W^T B_2^T & B_1 & XC_1^T + W^T D_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1X + D_{12}W & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} Q & C_2X + D_{22}W \\ XC_2^T + W^T D_{22}^T & X \end{bmatrix} > 0 \quad (16)$$

$$iz(Q) < \eta \quad (17)$$

DME'leri elde edilir. (15), (16) ve (17) DME'lerini çözen uygun X, Q ve W matrisleri bulunursa, en iyi durum geri beslemeli H_2/H_∞ kontrol kazancı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$K = WX^{-1} \quad (18)$$

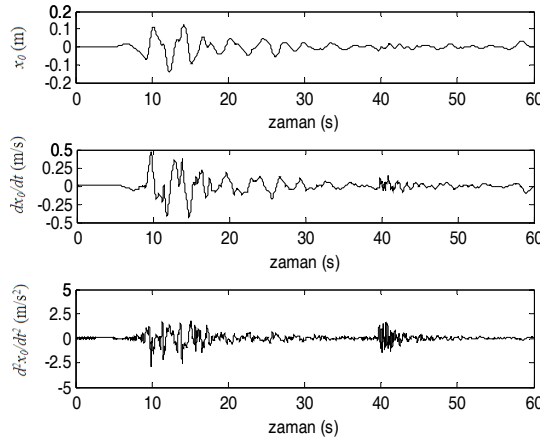
Kontrolör tasarımında Matlab-Simulink paket programı ve DME'lerin çözümünde YALMIP ayrıştırıcı ile LMILAB çözücüsü kullanılmıştır [21]. Benzetim çalışmalarında kullanılan kapalı çevrim sistemin durum uzay matrisleri Ekte verilmiştir. Kontrol kazancı aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$K = 10^7 \times \begin{bmatrix} -1.1412 & -0.2258 & 1.3443 & 0.2353 & -0.4796 & -0.3312 \\ -0.0025 & -0.0757 & -0.1026 & 0.1379 & -0.0946 & 0.0152 \end{bmatrix}$$

Çalışmada, durum geri-beslemeli H_2/H_∞ kontrol kazancı, sistemin frekans alanı cevaplarına göre γ ve η 'nin ağırlıklandırılması ile elde edilmiştir.

4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetim çalışmalarında konteyner krenine ait doğrusal olmayan dinamik modele bozucu giriş olarak 1999 Marmara Kocaeli depremine ait yer hareketinin zaman fonksiyonu uygulanmıştır. Marmara Kocaeli depreminin yer hareketi Şekil 3'de görülmektedir. Benzetim çalışmalarında gerçek bir jumbo konteyner krenin parametreler kullanılmış ve bu parametreler Ekte verilmiştir [6].

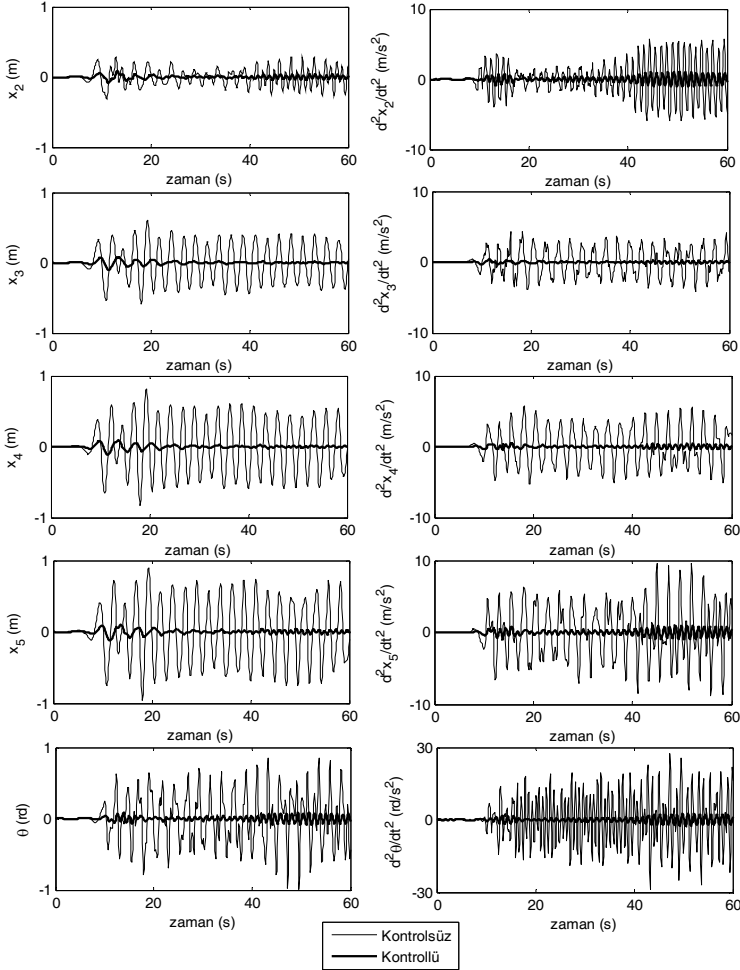


Şekil 3. 1999 Marmara Kocaeli depreminin yer hareketi

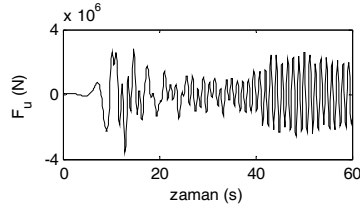
Benzetim çalışmalarının sonuçları Şekil 4 – 6'da verilmiştir. x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nin yer değiştirme ve ivme zaman cevapları kontrolsüz ve kontrollü olarak, Şekil 4'te gösterilmiştir.

Krenlerin depreme yönelik tasarımında güvenlik en önemli performans ölçütü olmaktadır. Genel olarak yapıların deprem güvenliği yer değiştirme cevaplarına bağlı olarak değerlendirilir. Sonuçlar kontrolörün depremden kaynaklanan titreşimleri etkili bir şekilde azalttığını ve krenin depreme yönelik güvenliğini sağladığını göstermektedir. Şekil 5’de ise kontrol kuvvetinin zaman cevabı yer almaktadır.

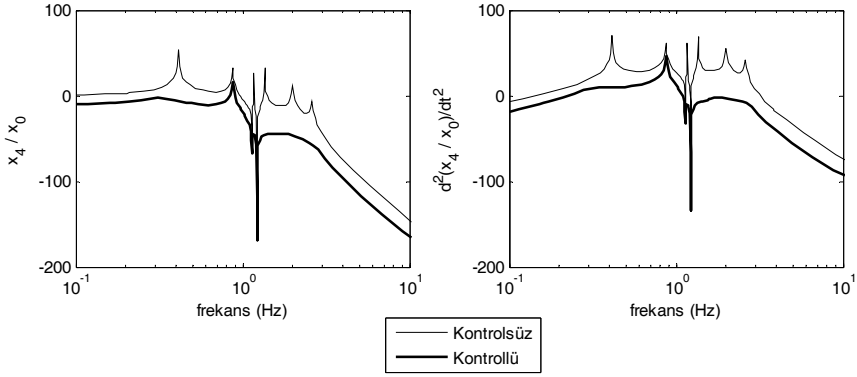
Şekil 6’da x_i ’ün yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları kontrolsüz ve kontrollü olarak görülmektedir. Sistem altı serbestlik derecesine sahip olduğundan; 0.20, 0.45, 0.87, 1.21, 1.97, 2.61 Hz. olmak üzere altı adet doğal frekansı vardır. Bu değerler, kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak hesaplanmıştır. Depremlerde özellikle 1. mod en tehlikeli mod olarak kabul edilmektedir. Amaçlandığı gibi rezonans değerleri özellikle 1. mod olmak üzere etkili şekilde bastırılmıştır.



Şekil 4. x_2, x_3, x_4, x_5 ve θ 'nin yer değiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 5. Kontrol kuvvetinin zaman cevabı

Şekil 6. x_4 'ün yer değiştirme ve ivme frekans cevapları

Daha önce de belirtildiği gibi, H_∞ kontrol tasarımı daha çok frekans alanıyla ilgilidir ve kapalı çevrim sistemi için iyi bir geçici rejim cevabını garanti edemez. H_2 kontrol ise geçici rejim cevaplarında daha başarılıdır. Bu nedenle bu çalışmada kontrol algoritması olarak, H_2 ve H_∞ kontrol yapılarının birleştirilmesiyle elde edilen karma H_2/H_∞ kontrol yapısı kullanılmıştır. Bunu vurgulamak için Çizelge 1'de x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nin yer değiştirme ve ivme zaman cevapları kontrolsüz durum, H_∞ kontrollü durum ve karma H_2/H_∞ kontrollü durum için verilmiştir. Çizelge 1'deki sonuçlar incelenerek, H_∞ kontrollü durum ile karma H_2/H_∞ kontrollü durum karşılaştırıldığında önerilen karma H_2/H_∞ kontrolörün daha iyi bir sönüm performansı göstererek daha başarılı olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nin yer değiştirme ve ivme zaman cevapları

| | Kontrolsüz | H_∞ Kontrollü | Karma H_2/H_∞ Kontrollü |
|---------------------------------------|------------|----------------------|--------------------------------|
| x_2 (m) | 0.6118 | 0.1811 | 0.1716 |
| x_3 (m) | 1.1962 | 0.2008 | 0.1865 |
| x_4 (m) | 1.6471 | 0.2377 | 0.2059 |
| x_5 (m) | 1.8525 | 0.2480 | 0.2238 |
| θ (rd) | 1.8394 | 0.1706 | 0.1685 |
| d^2x_2/dt^2 (m/s ²) | 11.6788 | 2.2210 | 2.2033 |
| d^2x_3/dt^2 (m/s ²) | 8.4604 | 0.7637 | 0.7211 |
| d^2x_4/dt^2 (m/s ²) | 11.0614 | 1.0550 | 0.9714 |
| d^2x_5/dt^2 (m/s ²) | 18.5110 | 1.9720 | 1.9577 |
| $d^2\theta/dt^2$ (rd/s ²) | 55.8224 | 4.9312 | 4.8988 |

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada konteyner krenlerinde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması sağlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle konteyner krenlerinin deprem esnasındaki davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli bir dinamik model geliştirilmiş, ardından Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME) tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolörün tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kontrolörün ve krenler için önerilen aktif kontrol sisteminin performansı bozucu giriş olarak 1999 Marmara Kocaeli depreminin yer hareketinin zaman fonksiyonunun uygulandığı benzetim çalışmaları ile ortaya konmuştur. Ayrıca, tasarlanan kontrolörün performansı durum geri-beslemeli H_∞ kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarının sonuçları deprem gibi şiddeti ve özellikleri önceden bilinmeyen bozucu etkilere karşı kren yapılarının aktif kontrolünde önerilen kontrol yapısının önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Tasarlanan sistem kontrol kuvvetleri yönünden de pratikte uygulanabilir durumdadır. Ancak, kontrol kuvvetlerinin yüksek oluşu, sistemin bir dezavantajı olarak görülmektedir. Bu durum yazarları sonraki çalışmalarında kontrol kuvvetinin azaltılması için kontrol algoritmasını doyumlu hale getirmek konusunda motive etmektedir. Bu nedenle, yazarlar sonraki çalışmalarında, kontrol kuvvetinin sınırlandırılması ile titreşim genliklerinin en aza indirilmesi arasında bir ödünleşmeye karar vererek, doyumlu eyleyiciye sahip karma H_2/H_∞ kontrolör tasarımı üzerinde çalışacaktır. Ayrıca gerçek sistemlerde var olan belirsizliklerin kontrolörün başarısı üzerindeki etkisini de inceleyeceklerdir.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Kanayama, T., Kashiwazaki, A., “A Study on the Dynamic Behavior of Container Cranes Under Strong Earthquakes”, *Seismic Engineering* 364, 276-284, 1998.
- [2] Kanayama, T., Kashiwazaki, A., Shimizu, N., Nakamura I., Kobayashi, N., “Large Shaking Table Test of a Container Crane by Strong Ground Excitation”, *Seismic Engineering*, 364, 243-248, 1998.
- [3] Soderberg, E., Jordan, M., “Seismic Response of Jumbo Container Cranes and Design Recommendations to Limit Damage and Prevent Collapse”, ASCE Ports 2007 Conference, San Diego, CA., 2007.
- [4] Koshab B., Jacobs L., “Seismic Performance of Container Cranes”, Seismic Risk Management for Port Systems, NEESR Grand Challenge Third Annual Meeting, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, January 10, 2008.
- [5] Jacobs, L., DesRoches R., Leon, R.T., “Shake Table Testing of Container Cranes”, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 14th WCEE, Beijing, China, October 12–17, 2008.
- [6] Sugano, T., Takenobu, M., Suzuki, T., Shiozaki, Y., “Design Procedures of Seismic-Isolated Container Crane at Port”, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 14th WCEE, Beijing, China, October 12–17, 2008.
- [7] Sağırlı, A., Azeloğlu, C.O., Guclu, R., Yazici, H., “Self-tuning Fuzzy Logic Control of Crane Structures against Earthquake Induced Vibration”, *Nonlinear Dynamics*, 64, 375–384, 2011.
- [8] Azeloğlu, C.O., Sağırlı, A., “Konteyner Krenlerinde Depremden Kaynaklanan Titreşimlerin Aktif Kontrolü”, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 29, 383–394, 2011.
- [9] Soong, T.T., Constantinou, M.C., “Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering”, CISM Courses and Lectures No:345, Springer-Verlag, Wien, New York 1994.

- [10] Guclu, R., Yazici, H., "Fuzzy Logic Control of a Non-linear Structural System against Earthquake Induced Vibration", Journal of Vibration and Control, Vol.13, No.11, 1535–1551, 2007.
- [11] Guclu, R., Yazici, H., "Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers.", Journal of Sound and Vibration, 318, 36–49, 2008.
- [12] Yazıcı, H., Küçükdemiral, İ.B., Güçlü, R., "LMI Tabanlı Çıkış Geri-beslemeli H_∞ Kontrolör ile Yapısal Bir Sistemin Aktif Titreşim Kontrolü", 14. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, ODTÜ 2–4 Temmuz, Güzelyurt, 7–13, 2009.
- [13] Yazıcı, H. ve Guclu, R., "Active Vibration Control of Seismic Excited Structural System using LMI-Based Mixed H_2/H_∞ State Feedback Controller", Turkish Journal of Electrical of Engineering & Computer Sciences, doi:10.3906/elk-1007-592, 2010.
- [14] Francis, B.A., "A Course in H_∞ Control Theory" Lecture Notes in Control and Information Sciences 88, edited by M.Thoma and A. Wyner, Springer-Verlag, 1987.
- [15] Doyle, J.C., Glover, K., Khargonekar, P.P., Francis, B.A., "State-space solutions to standart H_2 and H_∞ control problems", IEEE Transactions on Automatic Control, 34(8), 831–847, 1996.
- [16] Chilali, M., Gahinet, P., Scherer, C., "Multi-objective output-feedback control via LMI optimization", IFAC 13th Triennial World Congress, San Francisco, USA, 1996.
- [17] Gahinet, P., Apkarian, P., "A linear matrix inequalities aproach to H_∞ control proplems", International Journal of Robust and Nonlinear Control, 4, 421–448, 1994.
- [18] Nonami, K., Sivrioglu, S., "Active Vibration Control Using LMI-Based Mixed H_2/H_∞ State and Output Feedback Control with Nonlinearity", Proc. of the 35th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 161–166, Kobe, 1996.
- [19] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V., "Linear .Matrix Inequalities in System and Control Theory", SIAM Studies in Applied Mathematics, Philadelphia, 1994.
- [20] Khargonekar, P.P., Rotea, M.A., "Mixed H_2/H_∞ Control Problem: A Convex Optimisation Approach, IEEETrans. Automatic Control, 3(7), 1991, 824–837, 1991.
- [21] Löfberg, J., "Yalmip: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB" Proceedings of the CACSD Conference, Taipei, Taiwan, 2004.

EK

Kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri

Kütle matrisi;

$$M_s = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 + m_6 & 0 & m_6 L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_6 L & 0 & m_6 L^2 \end{bmatrix}$$

Sönüm matrisi;

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_5 & -c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Rijitlik matrisi;

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 g L \end{bmatrix}$$

F_d bozucu kuvvet vektörü ve F_u kontrol kuvveti

$$F_d = [-c_1 \dot{x}_0 + k_1 x_0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$F_u = [-F_u \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Konteyner krenine ait parametreler

| | | |
|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| $m_1 = 600000\text{kg}$ | $k_1 = 18050000\text{N/m}$ | $c_2 = 10680\text{Ns/m}$ |
| $m_2 = 63000\text{kg}$ | $k_2 = 12448000\text{N/m}$ | $c_3 = 1900\text{Ns/m}$ |
| $m_3 = 38200\text{kg}$ | $k_3 = 2210000\text{N/m}$ | $c_4 = 2890\text{Ns/m}$ |
| $m_4 = 105000\text{kg}$ | $k_4 = 3360000\text{N/m}$ | $c_5 = 650\text{Ns/m}$ |
| $m_5 = 15000\text{kg}$ | $k_5 = 765000\text{N/m}$ | $L = 6\text{m}$ |
| $m_6 = 20000\text{kg}$ | $c_1 = 26170\text{Ns/m}$ | |

Kapalı çevrim sistemin durum – uzay matrisleri

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_1/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_1/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$B_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1/m_1 \ 1/m_2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C_1 = C_2 = I_{12 \times 12}$$

$$D_{11} = D_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$D_{12} = D_{22} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Durum vektörü, Bozucu giriş vektörü, Kontrol giriş – çıkış vektörleri

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ \theta \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_3 \ \dot{x}_4 \ \dot{x}_5 \ \dot{\theta}]^T,$$

$$w = [x_0 \ \dot{x}_0]^T,$$

$$u = [u_1 \ u_2]^T,$$

$$z_1 = z_2 = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ \theta \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_3 \ \dot{x}_4 \ \dot{x}_5 \ \dot{\theta}]^T$$