



SEISMIC CONTROL OF CRANES WITH ACTUATOR SATURATED MIXED H_2/H_∞ CONTROLLER

C. Oktay AZELOĞLU*, Ahmet SAĞIRLI

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

Received/Geliş: 04.05.2012 Accepted/Kabul: 12.12.2012

ABSTRACT

This study is concerned with the active vibration control of cranes against earthquake induced vibration. For this purpose, Linear Matrix Inequalities (LMIs) based actuator saturated mixed H_2/H_∞ state-feedback controller is designed in this paper. 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, which is a disturbance input, is applied to modeled container crane. Additionally, the performance of the designed controller is also compared with actuator saturated H_∞ controller and the robustness of controller is tested for changing stiffness parameters. Simulation results indicate that superior earthquake induced vibration suppression is achieved by the use of designed controllers and active vibration control system.

Keywords: Actuator saturated mixed H_2/H_∞ control, linear matrix inequalities, cranes, earthquake-induced vibration, active vibration control.

EYLEYİCİ DOYUMLU KARMA H_2/H_∞ KONTROLÖR İLE KRENLERİN SİSMİK KONTROLÜ

ÖZET

Bu çalışmada, krenlerde depremden kaynaklanan yapısal titreşimleri azaltmak için aktif titreşim kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla makalede, Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME) tabanlı durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolörün ve krenler için önerilen aktif kontrol sisteminin performansı benzetim çalışmaları ile incelenmiştir. Konteyner kreni modeline bozucu giriş olarak Marmara Kocaeli depremine ait yer hareketinin zaman fonksiyonu uygulanmıştır. Ayrıca, tasarlanan kontrolörün performansı eyleyici doyumlu H_∞ kontrol algoritması ile karşılaştırılmış ve kontrolörün dayanıklılığı rijitlik parametrelerinin değişimine göre test edilmiştir. Benzetim çalışmalarının sonuçları, önerilen aktif kontrol sisteminin ve tasarlanan kontrolörün krenlerde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılmasında başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol, doğrusal matris eşitsizlikleri, krenler, depremden kaynaklanan titreşimler, aktif titreşim kontrolü.

1. GİRİŞ

Krenlerde depremden kaynaklanan titreşimlerin azaltılması çözüm bekleyen önemli bir problemdir. Bu problemin çözümü için önerilen yöntemlerden biri de sisteme aktif titreşim kontrolü uygulanmasıdır [1]. Yapısal sistemlerde depremden kaynaklanan titreşimleri izole etmek

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

için aktif kontrol uygulamaları son dönemlerde hız kazanan önemli bir çalışma alanı olmuştur. Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının yer değiştirmelerini istenilen düzeye tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Bu sistemler gelişmiş bilgisayarlar ile donatılmış olup, titreşimlerin etkilerini yapıda bir karşı hareket üreterek sönmülemeye çalışan kontrol sistemleridir [2]. Literatürde yapısal sistemlerde depremden kaynaklanan titreşimleri izole etmek için aktif kontrol uygulaması içeren çok sayıda çalışma mevcuttur [3], [4]. Literatürden görüldüğü gibi, aktif yapısal kontrol çalışmalarında gerekli kontrol kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan algoritmalara örnek olarak, dayanıklı kontrol (H_2 , H_∞ ve Kayan Kipli Kontrol), Bulanık Mantık Kontrol (BMK) ve Adaptif Kontrol yöntemleri verilebilir.

Krenlerde depremden kaynaklanan titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması yeni ve gelişmeye açık bir konudur. Sağrılı ve Azeloğlu [5], portal krenlerin deprem etkisi altındaki davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli, zeminin dinamiğini de içeren, doğrusal olmayan bir matematik model geliştirmiş ve bu matematik modelin doğruluğunu sarsma masası deneyleriyle ortaya koymuşlardır. Deneyler gerçek bir portal krenin 1/20 ölçekli eşdeğer dinamik modeli üzerinde gerçek deprem verileri kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, geliştirilen matematik modelin sistemin davranışlarını gerçekçi olarak ortaya koyduğunu ve krenlerin aktif titreşim kontrolü çalışmalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Sağrılı ve diğerleri [1], yaptıkları çalışmada, Sağrılı ve Azeloğlu'nun [5]'de doğruluğunu ortaya koydukları matematik modeli kullanarak sisteme aktif titreşim kontrolü uygulamışlardır. Çalışmada önerilen kontrolör Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrol (ÖUBMK) yapısıdır. Sonuçlar portal krenlerde aktif titreşim kontrolünün başarılı olduğunu göstermiştir. Azeloğlu ve Sağrılı [6], yapmış oldukları çalışmada [1]'de Sağrılı ve diğerleri tarafından geliştirilen ÖUBMK ile konteyner krenlerinde aktif titreşim kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, konteyner krenlerinin deprem etkisi altındaki davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli, tekerlek mekanizmasının ve zeminin dinamiğini de içeren bir matematik model geliştirmiş, ardından sisteme aktif titreşim kontrolü uygulamışlardır. Benzetim çalışmalarının sonuçları, aktif titreşim kontrolünün konteyner krenlerinde de başarılı olduğunu göstermiştir.

Son dönemlerde, dayanıklı kontrol tekniklerinin çözümünde yaşanan gelişmelere paralel olarak birçok mühendislik probleminin çözümünde H_2 ve H_∞ kontrol yapıları sıklıkla tercih edilmektedir. Aktif titreşim kontrolü uygulamaları bu problemlerin 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. Bunun en önemli nedeni, sistemin bozucu girişlerden etkilenmesinin engellenmesi için, bozuculardan çıkışlara olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu minimum yapma düşüncesiyle ortaya çıkan H_∞ kontrol yapısının, deprem gibi şiddeti ve özellikleri önceden bilinmeyen bozucu girişlerin etkisi altındaki yapısal sistemler için son derece uygun bir kontrol algoritması olmasıdır. 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 nedenle, Azeloğlu ve Sağrılı [7] kontrol algoritması olarak, H_2 ve H_∞ kontrol yapılarının DME yaklaşımıyla uygun bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilen karma H_2/H_∞ kontrol yapısını kullanarak konteyner krenlerine aktif titreşim kontrolü uygulamışlardır. Çalışmada [6]'daki matematik model kullanılmış ve tasarlanan kontrolörün performansı Marmara Kocaeli depreminin yer hareketinin zaman fonksiyonunun uygulandığı benzetim çalışmalarıyla ortaya konmuş ve sonuçlar H_∞ kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Hem zaman hem de frekans alanında oldukça tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Tüm bu çalışmalar krenlerde depremden kaynaklanan titreşimlerin aktif kontrol yoluyla etkili şekilde azaltılabileceğini göstermiştir. Ancak, kontrol kuvvetlerinin yüksek değerlerde oluşu sistemin bir dezavantajdır. Günümüzde yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında çözüm bekleyen önemli problemlerden biri eyleyici doyum problemidir. Eyleyici içeren geri beslemeli kontrol uygulamalarında eyleyiciler üzerinde çok katı genlik ve değişim sınırlamaları bulunur. Yapısal sistemlerin aktif titreşim kontrolü uygulamalarında, sismik yüklerin

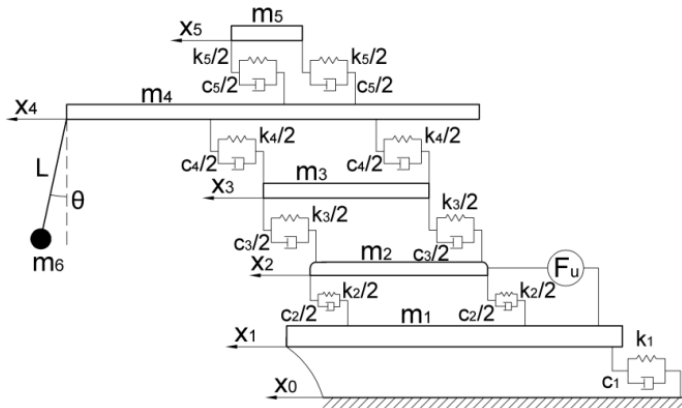
rastlantısal durumlarından dolayı, ihtiyaç duyulan gerekli kontrol kuvvetinin kullanılan eyleyicilerin kapasitesini aşabilmesi söz konusudur. Eyleyici doyumu problemi olarak adlandırılan bu durum, yapısal sistemlerin aktif kontrolü için kararsızlığın başlıca nedenlerinden biridir [8]. Bu nedenle yapısal sistemlerin aktif kontrolü çalışmalarında kullanılacak kontrolcülere ait eyleyicilerin doyumlu olması beklenir. Bu nedenle, kontrol algoritmasının tasarımı yapılırken bu kısıtlamaların matematiksel olarak probleme dahil edilmesi gerekmektedir. Eyleyici limitlerinin hesaba katılmadığı kontrolör tasarımlarında, beklenilmeyen geçici hal davranışları, kapalı çevrim performansının düşmesi ve kapalı çevrim kararsızlığı gibi problemlerle karşılaşılabilir [9]. Bu durum, yazarları [7]'de ortaya koydukları DME tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol algoritmasını geliştirerek eyleyici doyumlu hale getirmek konusunda motive etmiştir. Bu nedenle bu çalışmada, kontrol kuvvetinin sınırlandırılması ile titreşim genliklerinin en aza indirilmesi arasında bir ödünleşmeye karar verilerek, eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritmasının tasarımı yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, krenlerde deprem kaynaklı titreşimlerin aktif kontrolünü DME tabanlı durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrolör ile gerçekleştirmektir. Bu amaçla çalışmanın ikinci bölümünde kren sisteminin matematik modeli verilmiş, üçüncü bölümde kontrol algoritmasının tasarımı yapılmış ve dördüncü bölümde tasarlanan kontrolörün performansı bozucu giriş olarak Marmara Kocaeli depreminin yer hareketinin uygulandığı benzetim çalışmalarıyla ortaya konmuştur. Beşinci bölümde ise sonuçlar değerlendirilmiştir.

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. iz , 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. MATEMATİK MODEL

Çalışmanın bu bölümünde deprem etkisindeki konteyner krenlerinin dinamik davranışlarını ortaya koyan, 6 serbestlik dereceli, zeminin ve tekerlek mekanizmasının dinamiğini de içeren bir matematik model geliştirilmiştir. Depremlerin yıkıcı etkileri yatay titreşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıktığından, serbestlik derecesi sadece bu yönde hesaba katılmış ve aktif kontrol konteyner rıhtımı ile yürütme mekanizması arasında uygulanmıştır [7]. Sistemin fiziksel modeli Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deprem etkisi altındaki konteyner kreninin fiziksel modeli

Modelde, $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$ sırasıyla, konteyner rıhtımı, tekerlek 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 yerdeğiştirmelerini ve θ yükün salınım açısını ifade etmektedir.

Matematik model şu kabulleri içermektedir; sistemin serbestlik derecesi yatay doğrultuda alınmıştır, matematik model bom eksenini doğrultusundaki dinamik etkileri içerecek şekilde oluşturulmuştur, modelde yer alan tüm kütleler ilgili elemanın ağırlık merkezine indirgenmiş noktasal kütleler olarak kabul edilmiştir, matematik modelde yükün salınımı düzlemsel olarak incelenmiş, halat rijit ve kütsüz olarak ele alınmıştır, zeminin krenin bom eksenini doğrultusundaki rijitliği ve sönümü modele dahil edilmiştir, tekerlek ve ray bağlantısının krenin bom eksenini doğrultusundaki rijitliği ve sönümü modele dahil edilmiştir ve aktif kontrol mekanizması x_1 - x_2 arasında yerleştirilmiştir.

Kren yapısının hareket denklemini aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

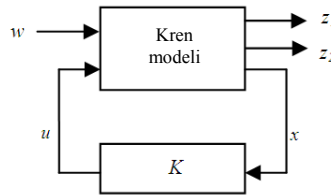
$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = F_u u(t) + E_w w(t) \quad (1)$$

Burada $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ \theta]^T$ ilgili kısımların yerdeğiştirmelerini gösteren durum vektörünü, $w(t)$ sisteme uygulanan bozucu girişi, $E_w = [-(c_1 \dot{x}_0 + k_1 x_0) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ bozucuların ağırlık matrisini, $u(t)$ kontrol kuvvetini, F_u kontrolörün yerleştirildiği yeri ifade etmektedir. M_s, C_s ve K_s sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. Sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri Ek'de verilmiştir.

3. EYLEYİCİ DOYUMLU DAYANIKLI KARMA H_2/H_∞ KONTROLÖRÜN TASARIMI

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. Özellikle sismik zorlanma altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında kontrol algoritmasının hem zaman hem de frekans alanı cevaplarında arzu edilen performansı göstermesi beklenir. Ayrıca giriş bölümünde belirtildiği gibi, sismik yüklerin rastlantısal durumlarından dolayı, aktif yapısal kontrol çalışmalarında kontrol algoritmasının doyumlu eyleyiciye sahip olması beklenir. Dolayısıyla, hem zaman hem de frekans alanında etkili sonuçlar alabilmek ve eyleyici doyumu problemini aşabilmek için bu çalışmada DME tabanlı durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tasarlanmıştır. Bu amaçla, H_2 ve H_∞ kontrol yapıları DME yaklaşımıyla uygun şekilde birleştirilmiş ve eyleyici doyumu olayı kontrol mimarisine DME biçiminde getirilen kısıtlar yoluyla eklenmiştir.

Durum geri-beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı Şekil 2'de görülmektedir. Burada, kren modeli doğrusal zamanla değişmeyen (DZD) sistem olarak ele alınmıştır [10].



Şekil 2. Durum geri-beslemeli kontrolör yapısının blok diyagramı

Kontrol probleminin durum uzay formunda gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z_1 &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ z_2 &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u\end{aligned}\quad (2)$$

Burada, $x \in \mathfrak{R}^n$ durum vektörünü, $z_1, z_2 \in \mathfrak{R}^{n_z}$ 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.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A + B_2K)x + B_1w \\ z_1 &= (C_1 + D_{12}K)x + D_{11}w \\ z_2 &= (C_2 + D_{22}K)x + D_{21}w\end{aligned}\quad (3)$$

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.

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

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

$$\begin{aligned}[(A + B_2K)x + B_1w]^T Px + x^T P[(A + B_2K)x + B_1w] + [(C_1 + D_{12}K)x + D_{11}w]^T \\ [(C_1 + D_{12}K)x + D_{11}w] - \gamma^2 w^T w < 0\end{aligned}\quad (5)$$

(5) ifadesinin düzenlenmesiyle,

$$\begin{bmatrix} ((A + B_2K)^T P + P(A + B_2K) + (C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K)) & PB_1 + (C_1 + D_{12}K)^T D_{11} \\ B_1^T P + D_{11}^T (C_1 + D_{12}K) & -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned}P^{-1}(A + B_2K)^T + (A + B_2K)P^{-1} + P^{-1}(C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K)P^{-1} - (B_1 + P^{-1}(C_1 + D_{12}K)^T D_{11}) \\ (-\gamma^2 I + D_{11} D_{11}^T)^{-1} (B_1^T + D_{11}^T (C_1 + D_{12}K)P^{-1}) < 0\end{aligned}\quad (7)$$

eşitsizliği elde edilir [11]. $X_\infty = P^{-1}$ değişken dönüşümüyle,

$$\begin{bmatrix} ((A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T X_\infty (C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K)X_\infty) & B_1 + X_\infty (C_1 + D_{12}K)^T D_{11} \\ B_1^T + D_{11}^T (C_1 + D_{12}K)X_\infty & -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11} \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} (A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T & B_1 \\ B_1^T & -\gamma I \end{bmatrix} + \frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} X_\infty (C_1 + D_{12}K)^T \\ D_{11}^T \end{bmatrix} [(C_1 + D_{12}K)X_\infty \quad D_{11}] < 0 \quad (9)$$

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.

$$\begin{bmatrix} (A+B_2K)X_\infty + X_\infty(A+B_2K)^T & B_1 & X_\infty(C_1+D_{12}K)^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ (C_1+D_{12}K)X_\infty & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

Bilindiği gibi sistemin bozucu girişlerden çıkışlara transfer fonksiyonunun H_2 normunun $\|T_{z_2, w}\|_2^2$ 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,

$$(A+B_2K)X_2 + X_2(A+B_2K)^T + B_1B_1^T < 0 \quad (11)$$

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

$$iz(Q) < \eta \quad (13)$$

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 [12]. 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,

$$X = X_2 = X_\infty \quad (14)$$

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,

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + B_2W + W^TB_2^T & B_1 & XC_1^T + W^TD_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1X + D_{12}W & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

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

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

DME'leri elde edilir [9].

Literatürde eyleyici doyumunun kontrol mimarisine eklenmesi için iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. İlk olarak doyumlu eyleyici yapısına, kontrol sinyaline DME biçiminde getirilen kısıtlar ile ulaşılabilir. İkinci olarak eyleyici doyumunu sistemin dinamiğine dahil edilebilir. Yazıcı [13] doktora tezinde benzetim çalışmaları ile ilk yöntemin daha az tutucu ve uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla bu çalışmada, eyleyici doyumunu, DME kısıtları şeklinde doğrudan kontrol sinyali üzerinden matematiksel olarak kontrolör mimarisine eklenmiştir.

Doyumlu eyleyicinin DME kısıtları şeklinde doğrudan kontrol sinyali üzerinden matematiksel olarak elde edilmesi aşağıdaki gibidir.

En büyük denetim sinyali, $\|u\|_2 \leq u_{\max}$ şeklinde ifade edilebilir ve

$$u^T u \leq u_{\max}^2 \quad (19)$$

eşitsizliği olarak yazılabilir. Çalışmada $u = Kx$ olarak tanımlandığından

$$x^T K^T K x \leq u_{\max}^2 \quad (20)$$

olarak elde edilir. $W = KX$ tanımlaması

$$\frac{x^T X^{-1} W^T W X^{-1} x}{u_{\max}^2} \leq 1 \quad (21)$$

eşitsizliğini elde etmemizi sağlar.

Burada, $x(t) \subset \varepsilon\left(\frac{X^{-1} W^T W X^{-1}}{u_{\max}^2}\right)$ şeklinde ifade edilebilir.

ifadesinden $X^{-1} \geq \frac{X^{-1} W^T W X^{-1}}{u_{\max}^2}$ eşitsizliği elde edilir ve bu eşitsizliğin sağından ve solundan X

ile çarpılırsa

$$XX^{-1} X \geq \frac{XX^{-1} W^T W X^{-1} X}{u_{\max}^2} \quad (22)$$

eşitsizliği elde edilir. (22) eşitsizliğinin düzenlenmesi

$$X \geq \frac{W^T W}{u_{\max}^2} \quad (23)$$

sonucu elde etmemizi sağlar.

$X - \frac{W^T W}{u_{\max}^2} \geq 0$ ile Schur tümleyeni kullanılarak

$$\begin{bmatrix} X & W^T \\ W & u_{\max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (24)$$

doğrusal matris eşitsizliği elde edilebilir.

Dolayısıyla (15), (16), (17) ve (24) DME'lerini çözen uygun X , Q ve W matrisleri bulunursa, eyleyici doyumlu alt en iyi durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol sinyali $u = WX^{-1}x$ formunda elde edilebilir. Bu durumda kontrol kazancı aşağıdaki gibidir.

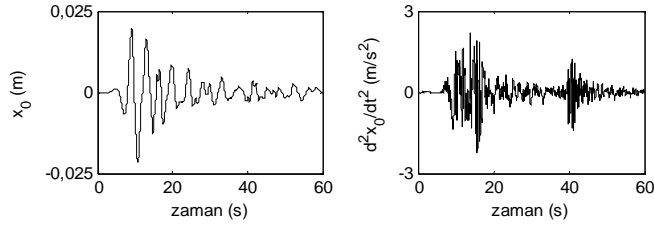
$$K = WX^{-1} \quad (25)$$

Bu çalışmada, kontrolör tasarımında Matlab-Simulink programı ve DME'lerin çözümünde YALMIP ayrıştırıcı ile LMILAB çözücüsü kullanılmıştır [14]. Benzetim çalışmalarında kullanılan kapalı çevrim sistemin durum uzay matrisleri ekte verilmiştir. Çalışmada, DME tabanlı durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol kazancı, sistemin frekans alanı cevaplarına göre γ ve η 'nin ağırlıklandırılması ile aşağıdaki gibi elde edilmiştir. İfade kolaylığı açısından geliştirilen kontrolör bundan sonra kısaca "doyumlu karma kontrolör" olarak adlandırılmıştır. Eyleyici doyumu limiti ± 2500 kN için 76 iterasyon sonucunda, optimum kontrol kazancı aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$K = WX^{-1} = [-1.1621 \ -0.1207 \ -0.0124 \ 0.1147 \ 0.0184 \ -0.0006 \ -0.1807 \\ -0.0225 \ -0.0120 \ -0.0001 \ 0.0181 \ 0.0012].$$

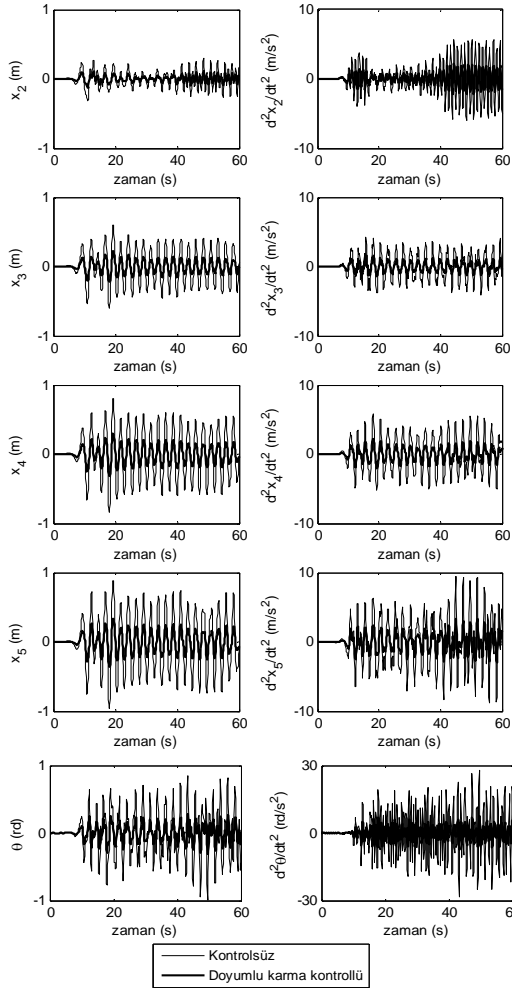
4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

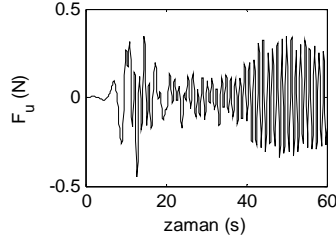
Benzetim çalışmalarında konteyner krenine ait matematik modele bozucu giriş olarak Marmara Kocaeli depremine ait yer hareketinin zaman fonksiyonu uygulanmıştır. Marmara depreminin yer hareketi Şekil 3'de görülmektedir. Benzetim çalışmalarında ekte sunulan gerçek konteyner krenine ait parametreler kullanılmıştır [7].



Şekil 3. Marmara Kocaeli depreminin yer hareketi

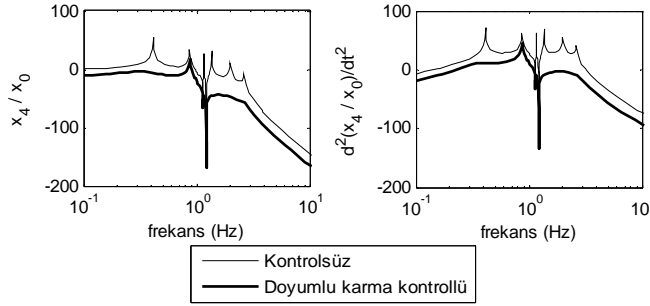
Benzetim çalışmalarının sonuçları kontrolsüz ve kontrollü olarak Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 4'de x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nin yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları, Şekil 5'de ise kontrol kuvvetinin zaman cevabı yer verilmiştir.

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



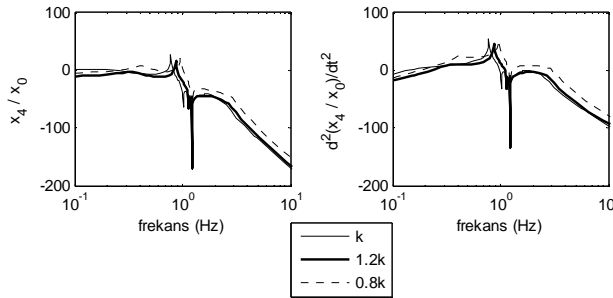
Şekil 5. Kontrol kuvvetinin zaman cevabı ($x \pm 2500$ kN)

Şekil 6'da x_4 '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 6. x_4 'ün yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları

Tasarlanan kontrolörün dayanıklılığı kren sisteminin rijitlik parametrelerinin $\pm\%20$ değişimine göre yapılan benzetim çalışmalarıyla test edilmiştir. Şekil 7'de kren köprüsünün parametre değişimlerine göre çizdirilen yer değiştirme ve ivme frekans cevapları verilmiştir. Sonuçlar tasarlanan kontrolörün parametre değişimlerinden etkilenmediğini göstermiştir.



Şekil 7. x_4 'ün sistemin rijitlik parametrelerinin değişimine göre elde edilen yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada konteyner krenlerinin aktif titreşim kontrolü için DME tabanlı durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tasarlanmıştır. Bu amaçla, H_2 ve H_∞ kontrol yapıları DME yaklaşımıyla uygun şekilde birleştirilmiş ve eyleyici doyumu olayı kontrol mimarisine DME biçiminde getirilen kısıtlar yoluyla eklenmiştir. Bu sayede, hem zaman hem de frekans alanında etkili sonuçlar veren, ayrıca sismik yüklerin rastlantısal durumlarından kaynaklanan eyleyici doyumu probleminden etkilenmeyen etkin bir kontrol algoritması tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolörün ve krenler için önerilen aktif kontrol sisteminin performansı bozucu giriş olarak 1999 Marmara Kocaeli depreminin yer hareketinin uygulandığı benzetim çalışmaları ile ortaya konmuştur. 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 göstermiştir. Ayrıca, üretilen kontrol kuvveti sismik yüklerin rastlantısal durumlarından bağımsız hale getirilerek istenilen limitler içerisinde kalmış, böylelikle sistemin kararlılığı sağlanmış ve pratikte uygulanabilir duruma getirilmiştir. Rijitlik parametrelerinin değişimine göre yapılan benzetim çalışmaları ise tasarlanan kontrolörün dayanıklı olduğunu ortaya koymuştur.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Sağırlı, A., Azeloğlu, C.O., “Investigation of the Dynamic Behaviors of Cranes under Seismic Effects with Theoretical and Experimental Study”, *Advanced Materials Research*, Issue 2012, Vol. 445, pp. 1082-1087, 2011.
- [6] Azeloğlu, C.O., Sağırlı, A., “Konteyner Krenlerinde Depremden Kaynaklanan Titreşimlerin Aktif Kontrolü”, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 29, No:4, pp. 383-394, 2011.
- [7] Azeloğlu, C.O., Sağırlı, A., “DME Tabanlı Durum Geri-beslemeli Karma H_2/H_∞ Kontrolörlere Krenlerde Yapısal Titreşimlerin Kontrolü”, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Kabul 09.01.2012.
- [8] Kim, J.H., Jabbari, F., “Actuator Saturation and Control Design for Building under Seismic Excitations”, *J.Eng.Mech.*, 128(4), 403-412, 2002.
- [9] Hu, T., Lin, Z., *Control Systems with Actuator Saturation: Analysis and Design*. Boston, MA: Birkhauser, 2001.
- [10] 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.
- [11] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V., “*Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*”, *SIAM Studies in Applied Mathematics*, Philadelphia, 1994.
- [12] Khargonekar, P.P., Rotea, M.A., “Mixed H_2/H_∞ Control Problem: A Convex Optimisation Approach”, *IEEE Trans. Automatic Control*, 3(7), 1991, 824–837, 1991.

- [13] Yazıcı, H., "Eyleyici Gecikmesine Bağlı Doyumlu ve Dayanıklı H_∞ Denetleyiciyle Deprem Etkisi Altındaki Yapısal Sistemlerin Titreşimlerinin Kontrolü", Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 2011.
- [14] Löffberg, 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;

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

Sönüm matrisi;

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

Rijitlik matrisi;

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

Konteyner krenine ait parametreler

$m_1 = 600000\text{kg}$	$k_1 = 18050000\text{N/m}$	$c_2 = 10680\text{Ns/m}$
$m_2 = 63000\text{kg}$	$k_2 = 12448000\text{N/m}$	$c_3 = 1900\text{Ns/m}$
$m_3 = 38200\text{kg}$	$k_3 = 2210000\text{N/m}$	$c_4 = 2890\text{Ns/m}$
$m_4 = 105000\text{kg}$	$k_4 = 3360000\text{N/m}$	$c_5 = 650\text{Ns/m}$
$m_5 = 15000\text{kg}$	$k_5 = 765000\text{N/m}$	$L = 6\text{m}$
$m_6 = 20000\text{kg}$	$c_7 = 26170\text{Ns/m}$	

Kapalı çevrim sistemin durum – uzay matrisleri

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_1/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_1/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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