Çok Katlı Yapı Bloklarının Piston-TLCD Mekanizmasıyla Titreşim Kontrolü Vibration Control of Multi-Storey Structures using Piston-TLCD Mechanism

Fırat Can Yılmaz¹, Muzaffer Metin², Sefer Arda Serbes³, Muaz Kemerli⁴, Ahmet Aydın⁵, İrfan Yazıcı⁶, Abdul Ahad Faizan⁷, M. Necmettin Sami İnanır⁴, Erkan Çelebi⁸, Tahsin Engin⁹

¹Makine Mühendisliği Bölümü Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli fcyilmaz@qtu.edu.tr ²Makine Mühendisliği Bölümü Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul mmetin@yildiz.edu.tr ³Makine Mühendisliği Bölümü Türk-Alman Üniversitesi. İstanbul serbes@tau.edu.tr ⁴Makine Mühendisliği Bölümü Sakarya Üniversitesi, Sakarya mkemerli@sakarya.edu.tr samiinanir@sakarya.edu.tr ⁵Makine Mühendisliği Bölümü Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya aahmet@subu.edu.tr ⁶ Elektrik & Elektronik Mühendisliği Bölümü Sakarya Üniversitesi, Sakarya iyazici@sakarya.edu.tr ⁷İnşaat Mühendisliği Bölümü Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya ahad.faizan@ogr.sakarya.edu.tr ⁸İnşaat Mühendisliği Bölümü Sakarva Üniversitesi. Sakarva ecelebi@sakarya.edu.tr ⁹Makine Mühendisliği Bölümü İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul tengin@itu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, harmonik bozucu sinyaller veya deprem etkisi ile tahrik edilen binalarda ortaya çıkan salınımların TLCD (*Tuned Liquid Column Damper*) yarı-aktif sönümleyiciler yardımıyla bastırılması amaçlanmıştır. TLCD ile salınım sönümleme metoduna yeni bir açıyla bakılarak TLCD yapısına entegre edilen pistonlar oluşturulan manyetik alan vasıtasıyla sönümlenerek piston-TLCD hareketi kontrol edilmiştir. Çalışmada piston-TLCD bloğu üzerinde oluşturulan manyetik sönüm kuvveti *LQR* ve H_{∞} algoritmaları ile kontrol edilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Kontrol algoritmalarının 20 katlı yapı bloğu üzerindeki salınım bastırım performansları rezonans altındaki durumla birlikte *Kobe, Kocaeli* ve *Northridge* deprem girişleri altında zaman ve frekans alanlarında gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar ISE performansı indeksi ile değerlendirilmiştir.

Abstract

In this study, the vibration oscillation suppression by TLCD (Tuned Liquid Column Damper) semi-active dampers at the buildings was investigated under harmonic disturbance signals

or earthquake effect. By looking at the oscillation damping method with TLCD from a new angle, the movement of the piston-TLCD was controlled by magnetic force that affects pistons at the TLCD columns. In the study, the magnetic damping force over the piston-TLCD was controlled by LQRand H_{∞} controller algorithms and their performances were compared. The oscillation suppression performance of the control algorithms at 20-storey building was shown at time and frequency domains under the resonance case with Kobe, Kocaeli and Northridge earthquake inputs. The obtained results were evaluated with ISE performance index.

1. Giriş

Binalar, rüzgâr ve zemin kaynaklı çeşitli bozucu etkiler nedeniyle salınım göstermektedirler. Zeminden bina üzerine etki eden deprem gibi sarsıntılar yapılar üzerinde yıkıcı etkilere sebep olabilmektedir. Yapı üzerindeki salınımların yapılara zarar vermeyecek düzeye bastırılması amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazılarında, deprem etkisine maruz kalan yapılarda salınımın bastırılması amacıyla sönümleyici eleman olarak çalışan TLCD yapıları kullanılmıştır. TLCD yapılarındaki temel prensip, binanın birinci doğal frekansı ve tasarlanan TLCD'nin doğal frekansının eşleştirilmesidir [1,2]. Böylece, rezonans durumunda TLCD frekansı ile tahrik frekansı eşleşerek ortaya çıkan enerji TLCD tarafından harcanmaktadır. Aynı zamanda, binaya TLCD kütlesinin ilave edilmesiyle binanın da birinci frekansı değişmekte ve bina rezonanstan uzaklaştırılmaktadır. Sonuc olarak, TLCD ile binanın rezonans etkisi altında ortaya çıkacak yıkıcı salınımları sönümlenerek daha düşük seviyelere Bu nedenle TLCD tasarımında bastırılabilmektedir. frekansının doğru ayarlanması son derece önemlidir. TLCD geometrik boyutları, TLCD frekansı ile doğrudan ilişkilidir [3]. Bu, frekanstan yola çıkarak TLCD boyutlarını elde etmeye olanak sağlarken yapılacak tasarımda TLCD'nin geometrik değerlerinde keyfi davranılmasına da müsaade etmez. Kondo ve arkadaşları tarafından TLCD yapısına ait geometrinin incelemesine dair önemli bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 3 farklı U-tipindeki TLCD yapıları incelenmiştir [4]. TLCD tasarımında, TLCD'nin toplam uzunluğu dışında, yatay uzunluğunun toplam uzunluğuna oranı, TLCD içerisine konulan sıvının kütlesinin yapı kütlesine oranı gibi çeşitli parametreler dikkate alınmıştır. TLCD parametreleri üzerine başka bir çalışma da Matteo ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, TLCD parametrelerinin optimal değerlerinin elde edilmesi incelenmiştir [5]. Altay ve Klinkel tarafından yapılan çalışmada ise yüksek katlı yapılar üzerinde yarı-aktif TLCD çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, doğal frekans ve sönüm değerini değiştirebilmesi amacıyla sütunlarında hareketli paneller bulunan bir yarı-aktif TLCD yapısı önerilmiştir [6]. Sadek ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise, TLCD geometrik kısıtları nedeniyle düşük sönüm etkisini artırmak için birden fazla TLCD yapısı paralel bağlanarak bir blok oluşturulmuş ve bu şekilde bir çözüm geliştirilmiştir [7]. TLCD içerisine yerleştirilen sıvının manyetoreolojik (MR) akışkan olduğu çalışmalar da mevcuttur. Ko ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada U-tip bir TLCD içerisine konulan MR akışkan, TLCD yapısının yatay düzlemindeki boru çevresine bobin sarılmasıyla MR akışının kontrol edildiği deneyler gerçekleştirilmiştir [8]. Bu şekilde MR sıvının viskozitesi duruma göre değiştirilerek en yüksek performansın elde edilmesi amaçlanmıştır. TLCD içerisine yerleştirilecek olan sıvılar hakkında deneysel başka bir çalışma Colwell ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu calısmada, TLCD icerisine su eklenmesinin dışında MR sıvı ve glikol kullanılarak TLCD'nin sönümleme performansı araştırılmıştır. [9]. Sıvı akışı sırasında sönüm kuvveti oluşturulması amacıyla TLCD yapıları içerisinde ayrıca orifis yapısı kullanılabilmektedir. Yalla ve arkadaşları tarafından orifis açıklığının kontrol edildiği çalışma bu konu için örnek verilebilir [10]. Bu çalışmada, orifis açıklığı değiştirilerek yine sıvı üzerinde oluşturulan sönüm etkisi kontrol edilmiştir. TLCD ve MR-TLCD yapıları kullanılarak Cheng ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada TLCD yapılarının rezonans frekansından uzaklaştıkça performansının düştüğü bulgusu elde edilmiştir [11].

Bu çalışmada, yapı birinci doğal frekansındaki harmonik bozucu giriş giriş veya deprem etkisi altındaki 20-katlı bir binanın salınımları piston-TLCD kullanılarak bastırılmaya çalışılmıştır. Sistemin deprem etkisi altındaki performansını incelemek için daha önce gerçekleşmiş *Kobe, Kocaeli* ve *Northridge* deprem verileri kullanılmıştır. Çalışmanın literatürdeki çalışmalardan farklı olan yenilikçi yönü, "u" formundaki TLCD'nin içinde hareket eden sıvıya ait sönümün TLCD'nin düşey kollarına yerleştirilen piston mekanizmasının manyetik bir etki ile hareket sönümüne yönelik kontrolüne davandırılmasıdır. Sistem üzerindeki zorlama etkisi gectikten sonra TLCD yapısı sönüm niteliğine göre bir miktar daha salınım yapabilmektedir. Bu da sistem salınımları üzerinde olumlu etki yerine olumsuz etkilere sebep olabilmektedir. Bu nedenle zorlayıcı etki geçtikten sonra TLCD yapısının sönümünün de işlevsel hale getirilmesi için piston-TLCD yapısı bu calışma ile önerilmektedir. Literatürde TLCD içine orifis yerleştirerek sönüm etkisinin ayarlanması çalışılmış olsa da, düşey kollara yerleştirilecek pistonların hareketi manyetik kuvvetlerle sönümlenerek daha etkin çözüm üretilmesi amaçlanmıştır. Bu yeni yaklaşımın etkisi ayrıca, sistemin birinci doğal frekansının dışında frekans bileşenlerine de sahip olan deprem sinyalleri kullanılarak araştırılmıştır. Önerilen yenilikçi piston-TLCD yapısıyla, deprem gibi farklı frekans bileşenlerine sahip bozucu etki altındaki bina üzerinde meydana gelen salınımlar bastırılmıştır.

2. Matematiksel Model



Şekil 2.1: 20 Katlı Bina Fiziksel Gösterimi

Şekil 2.1'de 20 katlı bina ve bina salınımlarını bastırmak için tasarlanan yarı-aktif TLCD sönümleyiciye ait fiziksel model görülmektedir. TLCD ile birlikte 21 serbestlik dereceli olan sistemin matematiksel modeli Denklem (2.2) ile (2.5) arasında ifade edilmiştir. Denklem (2.2) ve Denklem (2.3)'te yer alan piston-TLCD denklemlerini ifade etmektedir [11]. Denklem (2.4) ve Denklem (2.4)'te yer alan denklemler yapı bloğuna ait denklemlerdir ve çıkarılışında Denklem (2.1)'de ifade edilen Lagrange denkleminden yararlanılmıştır.

$$\frac{d}{d_t} \left(\frac{\partial (E_k - E_p)}{\partial \dot{q}_k} \right) - \left(\frac{\partial (E_k - E_p)}{\partial q_k} \right) + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_k} = Q_k \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de yer alan $E_k E_p$ ve E_d ifadeleri sırasıyla kinetik enerji, potansiyel enerji ve sönüm enerjisini ifade etmektedir. Ayrıca Denklem (2.1)'deki q_k ifadesi genelleştirilmiş koordinatları, Q_k , ifadesi de genelleştirilmiş kuvveti temsil etmektedir.

$$\rho Ab\ddot{x}_{1} + (pAL + m_{p})\ddot{y}_{1} + \frac{1}{2}\rho AK|\dot{y}_{1}|\dot{y}_{1} + 2\rho Agy_{1} = F_{s\"{o}n\"{u}m}$$
(2.2)

$$\begin{pmatrix} (m_1 + \rho AL + m_p) \ddot{x}_1 + \rho Ab \ddot{y}_1 + c_1 \dot{x}_1 - c_1 \dot{x}_2 \\ + k_1 x_1 - k_1 x_2 = 0 \end{cases}$$
(2.3)

$$m_{i}\ddot{x}_{i} + k_{i-1}(x_{i} - x_{i-1}) + c_{i-1}(\dot{x}_{i} - \dot{x}_{i-1}) + k_{i}(x_{i} - x_{i+1}) + c_{i}(\dot{x}_{i} - \dot{x}_{i+1}) = 0$$
(2.4)
$$i = 2 \cdot 19$$

$$m_{20}\ddot{x}_{20} + k_{19}(x_{20} - x_{19}) + c_{19}(\dot{x}_{20} - \dot{x}_{19}) + k_{20}x_{20} + c_{20}\dot{x}_{20} = m_{20}\ddot{x}_{g}$$
(2.5)

Denklem (2.2)-(2.5)'te ifade edilen $x_1: x_{20}, y_1$ ve \ddot{x}_g sırasıyla kat kütlelerinin yer değiştirmeleri, piston-TLCD içerisindeki sıvının yer değiştirmesi ve sisteme etki eden bozucu sinyalin ivme değeridir.

Şekil 2.1'de ve Denklem (2.2:2.5)'te kullanılan parametrelerin tanımları ve değerleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Parametre Listesi

Sembol	Tanım	Değer	Birim
m	Kat kütlesi	10 ⁶	kg
m_p	Piston kütlesi	6.0	kg
-	Piston Adedi 2		
ρ	Sıvı yoğunluğu	997.0	kg/m^3
D	Piston çapı 4.0		т
L	TLCD sıvı uzunluğu	49.9	т
b/L	TLCD sıvı yatay uzunluğunun toplam uzunluğa oranı	0.4	-
η	Sıvının viskoz sönüm kotsovusi	0.913	-
k	Vanı rijitliği	rijitliği $67x10^6$	
C K	Yapı sönüm değeri	$2973x10^3$	Ns/m
μ	Sıvı kütlesinin yapı kütlesine oranı	0.031	
Α	TLCD alanı	12.6	m^2
g	Yerçekimi ivmesi	9.81	m/s^2

Sönüm parametrelerine ait değerler Chen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan alınmıştır [12]. Piston-TLCD yapısının eklendiği 20 katlı binanın doğal frekans değerleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir, binanın en üst katı olan kat 1'e ait bode cevabı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

f_1	f2	f_3	f4	f_5
, <u>,</u>	,2	,,,	71	,,,
0.10 Hz	0.30 Hz	0.50 Hz	0.69 Hz	0.88 Hz
f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
1.06 Hz	1.24 Hz	1.42 Hz	1.58 Hz	1.73 Hz
f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}
1.88 Hz	2.01 Hz	2.14 Hz	2.24 Hz	2.33 Hz
f_{16}	<i>f</i> ₁₇	f_{18}	f_{19}	f_{20}
2.42 Hz	2.48 Hz	2.54 Hz	2.57 Hz	2.60 Hz



Şekil 2.2: Kat 1 Bode Diyagramı

Matematiksel gösterimlerin kontrol algoritma tasarımının gerçekleştirilebilmesi için matematiksel düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Denklem (2.2) ve Denklem (2.3)'te yer alan sıvı deplasmanı ve kat 1'e ait deplasmanın ikinci türevleri aynı diferansiyel denklem takımlarında yer almaktadır. Bu terimlerin ayrıştırılmaları gerekmektedir. Denklem (2.6)-(2.8)'de bu ayrıştırıma gösterilmiştir.

$$\ddot{x}_{1} = -\frac{\rho A b}{\left(M + \rho A L + m_{p}\right)} \ddot{y}_{1} \\ -\frac{c_{1}}{\left(M + \rho A L + m_{p}\right)} \dot{x}_{1} \\ +\frac{c_{1}}{\left(M + \rho A L + m_{p}\right)} \dot{x}_{2} \qquad (2.6) \\ -\frac{k_{1}}{\left(M + \rho A L + m_{p}\right)} x_{1} \\ +\frac{k_{1}}{\left(M + \rho A L + m_{p}\right)} x_{2}$$

Denklem (2.3)'de yer alan \ddot{x}_1 ifadesi Denklem (2.6)'da yalnız bırakılmış halde gösterilmiştir. Denklem (2.6), Denklem (2.2)'de yazılarak \ddot{y}_1 'ne ait diferansiye denklem elde edilir.

$$\ddot{y}_{1} = \frac{(M + \rho AL + m_{p})}{(M + \rho AL + m_{p})(pAL + m_{p}) - (\rho Ab)^{2}}$$
(2.7)

Tablo 2.2: Bina Doğal Frekansları

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \rho AK |\dot{y}_{1}|\dot{y}_{1} - 2\rho Agy_{1} + \frac{\rho Abc_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} \dot{x}_{1} \\ -\frac{\rho Abc_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} \dot{x}_{2} \\ +\frac{\rho Abk_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} x_{1} \\ -\frac{\rho Abk_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} x_{2} \\ +F_{s\"{o}n\"{u}m} \end{bmatrix}$$

Denklem (2.7), Denklem (2.6) içerisine yazılarak \ddot{x}_1 'e ait diferansiyel denklem elde edilir.

$$\ddot{x}_{1} = -\frac{\rho Ab}{(M + \rho AL + m_{p})} ($$

$$\frac{(M + \rho AL + m_{p})}{(M + \rho AL + m_{p})(pAL + m_{p}) - (\rho Ab)^{2}} ($$

$$-\frac{1}{2} \rho AK |\dot{y}_{1}|\dot{y}_{1} - 2\rho Agy_{1}$$

$$+\frac{\rho Abc_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} \dot{x}_{1} - \frac{\rho Abc_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} \dot{x}_{2}$$

$$+\frac{\rho Abk_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} x_{1} - \frac{\rho Abk_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} x_{2}$$

$$+F)) - \frac{c_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} \dot{x}_{1}$$

$$+\frac{c_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} \dot{x}_{2}$$

$$-\frac{k_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} x_{1} + \frac{k_{1}}{(M + \rho AL + m_{p})} x_{2}$$
(2.8)

Denklem (2.8) ile birlikte sistem kontrol tasarımına uygun bir hal almıştır.

3. Kontrolör Tasarımı

Bozucu giriş sinyalleri altında tahrik edilen 20-katlı yapı bloğunun piston-TLCD tasarımı ile birlikte salınımlarının bastırımı amaçlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilecek olan kontrol algoritması dizaynında 2 farklı yaklaşım ele alınacaktır. Birinci kontrol yaklaşımı olarak optimal kontrol algoritması tasarımı olan LQR (*Linear Quadratic Regulator*) tasarımı ele alınacaktır. Diğer kontrol algoritmasının tasarım yaklaşımı ise H_{∞} kontrol tasarımıdır. Tasarlanan kontrol algoritmaları çalışacak olan TLCD yarı-aktif bir sönüm elemanı olarak ele alınmasından önce sistem matematiksel ifadelerinin durumuzay gösterimleri Denklem (3.1)-(3.3)'te verilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + B_d d + B_u u + F_{s\"{o}n\"{u}m} \tag{3.1}$$

Denklem (3.1)'de A matrisi durum matrisi, B_d bozucu giriş matrisi, B_u kontrol giriş matrisi, x sistem durumlarını, d bozucu giriş sinyalini ve u kontrol giriş sinyalini ifade etmektedir. Doğrusal kontrol yaklaşımları ele alınarak oluşturulacak olan LQR ve H_{∞} kontrol algoritması tasarımlarında A matrisi içerisinde yer alan ve sönüm kuvvetini oluşturan $\frac{1}{2} \rho AK |\dot{y}_1| \dot{y}_1$ ifadeleri matris dışına taşınarak kontrol algoritmaları tasarlanmıştır. Bu haliyle sistemin durum-uzay gösterimi Denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + B_d d + B_u u \tag{3.2}$$

Denklem (3.2)'deki sistem durum vektörünün açık gösterimi Denklem (3.3)'te ifade edilmiştir.

$$x \in R^{42x1} = \begin{bmatrix} y_1 \\ x_{1:20} \\ \dot{y}_1 \\ \dot{x}_{1:20} \end{bmatrix}$$
(3.3)

3.1. Optimal Kontrol Tasarımı

Doğrusal sistem durum-uzay formasyonu üzerinden optimal kontrol tasarımının elde edilebilmesi amacıyla maliyet fonksiyonun oluşturulması gerekmektedir. Denklem (3.4)-(3.6)'da *LQR* tasarımında kullanılacak olan maliyet fonksiyonu gösterilmiştir.

$$I = \frac{1}{2} \int_0^\infty [x^T Q x + u^T R u] dt$$
(3.4)

Denklem (3.3)'de gösterilen Q ve R ifadeleri kontrol tasarımını gerçekleştiren tarafından belirtilen pozitif tanımlı matrislerdir. Q matrisi kontrol algoritması tasarımında sistem durumlarının ağırlıklandırılmasında, R matrisi ise kontrol giriş sinyalinin ağırlıklandırılmasında kullanılacaktır. Tasarımı gerçekleştirilen piston-TLCD yapısında kullanılacak olan ağırlıklandırıma matrisleri Denklem (3.5) ve (3.6)'da gösterilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0_{1x40} \\ 0 & 10^6 & 0_{1x40} \\ 0_{20x1} & 0_{20x1} & 0_{20x40} \\ 0 & 10^1 & 0_{1x40} \\ 0_{19x1} & 0_{19x1} & 0_{19x1} \end{bmatrix}$$
(3.5)

$$R = 10^{-5} \tag{3.6}$$

Denklem (3.5) ve Denklem (3.6)'da ifade edilen parametrelerde, R matrisinin küçük seçilmesiyle birlikte LQRtasarımı neticesinde elde edilecek kontrol algoritmasının kuvvet değeri artmaktadır, Q matrisinin yüksek seçilmesiyle birlikte durum ağırlıklandırması artmaktadır. Tasarım sonucunda elde edilecek olan kontrol giriş sinyali u =-Kx'dir. K, kontrol kazanç vektörü, x sistem durumlarıdır. Piston-TLCD dizaynında piston üzerine aktarılacak olan sönüm kuvveti, LQR tasarımıyla elde edilen kontrol kuvveti üzerinden takip eden tasarımla elde edilecektir.

$$F_{man} = u(t) = K_{control}z(t) = -F(t) \tanh(t_g \dot{y})$$
(3.7)

$$F(t) = \frac{u(t)}{-\tanh(t_g \dot{y})}$$
(3.8)

Denklem (3.7)'deki F_{man} piston sistemine uygulanacak olan manyetik kuvveti temsil etmektedir. Denklem (3.8)'deki t_g pozitif tanımlı bir değerdir ve tanh fonksiyonunun signum fonksiyonuna benzemesi için 10 olarak alınmıştır.

3.2. H_{∞} Kontrol Tasarımı

Sistem kararlılığının sağlanması ve bina yanal salınım miktarının azaltılması amacıyla Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (LMI) temelli tam durum geri beslemeli H_{∞} kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen kontrolör yapısının matematiksel ifadeleri Denklem (3.9)-(3-12)'de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + B_d d + B_u u \tag{3.9}$$

$$z = C_1 x + D_{11} d \tag{3.10}$$

$$u = Kx \tag{3.11}$$

$$\dot{x} = (A + B_u K)x + B_d d \tag{3.12}$$

Burada, $u \in R^{1\times 1}$, sistem kontrol giriş sinyali, $z \in R^{42\times 1}$, ağırlıklandırılmış durumlar, $C_1 \in R^{42\times 42}$, $D_{11} \in R^{42\times 12}$ ağırlıklandırma matrisleri, $K \in R^{1\times 42}$ kontrol kazanç matrisidir.

Sistem kararlılığının garanti altına alınması ve H_{∞} performans iyileştirilmesinin gerçekleştirilmesi için aday Lyapunov fonksiyonu, ağırlıklandırılmış durumlar ve sistem bozucu giriş sinyalinden oluşan Denklem (3.13) kullanılır.

$$\dot{V}(x(t),t) + z^T z - \gamma^2 d^T d < 0$$
(3.13)

Denklem (3.13)'deki V(x(t),t) Denklem (3.14)'te gösterilen aday Lyapunov fonksiyonudur.

$$V = x^T P x \tag{3.14}$$

Denklem (3.14)'teki $P = P^T > 0, P \in R^{42x42}$ simetrik pozitif tanımlı matrisdir. Denklem (3.13), Denklem (3.14) ve Denklem (3.12)'nin yardımıyla tekrar düzenlendiğinde Denklem (3.15) elde edilir.

$$x^{T}A^{T}Px + x^{T}K^{T}B_{u}^{T}Px + d^{T}B_{d}^{T}Px + x^{T}PAx + x^{T}PB_{u}Kx + x^{T}C_{1}^{T}C_{1}x + x^{T}C_{1}^{T}D_{11}d + d^{T}D_{11}^{T}C_{1}x + d^{T}D_{11}^{T}D_{11}d - \gamma^{2}d^{T}d < 0$$

$$(3.15)$$

Denklem (3.15) genişletilmiş durum vektörleriyle ifade edildiğinde $\chi = [x^T(t) \ d^T(t)]^T$, $\chi^T \Omega \chi < 0$ sağlanır. Burada,

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & \Omega_4 \end{bmatrix} < 0 \tag{3.16}$$

$$\Omega_1 = A^T P + PA + K^T B_u^T P + P B_u K + C_1^T C_1$$
(3.17)

$$\Omega_2 = PB_d + C_1^T D_{11} \tag{3.18}$$

$$\Omega_3 = B_d^T P + D_{11}^T C_1 \tag{3.19}$$

$$\Omega_4 = D_{11}^T D_{11} - \gamma^2 \tag{3.20}$$

Schur tümleyen kullanılarak Denklem (3.20), Denklem (3.21)'e dönüştürülür [13].

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & \Omega_4 \end{bmatrix} < 0 \tag{3.21}$$

$$\Omega_1 = A^T P + PA + K^T B_u^T P + P B_u K_2 \tag{3.22}$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} PB_1 & C_1^T \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

$$\Omega_3 = \begin{bmatrix} B_d^T P \\ C_1 \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

$$\Omega_4 = \begin{bmatrix} -\gamma & D_{11}^T \\ D_{11}^T & -\gamma \end{bmatrix}$$
(3.25)

Denklem (3.21), Soldan ve sağdan $diag\{X, I, I\}$, $diag\{X^T, I, I\}$ sırasıyla çarpılır. Burada $X = X^T = P^{-1}$ 'dir.

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & \Omega_4 \end{bmatrix} < 0 \tag{3.26}$$

$$\Omega_1 = XA^T + AX + W^T B_u^T + B_u W \tag{3.27}$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} B_d & XC_1^T \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

$$\Omega_3 = \begin{bmatrix} B_d^T \\ C_1 X \end{bmatrix}$$
(3.29)

$$\Omega_4 = \begin{bmatrix} -\gamma & D_{11}^T \\ D_{11}^T & -\gamma \end{bmatrix}$$
(3.30)

Denklem (3.27)'de W = KX'dir. Denklem (3.26) ve X > 0kıstasıyla kontrol kazanç matrisi elde edilir. Tasarım sonucunda elde edilecek olan kontrol giriş sinyali u = Kx'dir. K, kontrol kazanç vektörü, x sistem durumlarıdır. Piston-TLCD dizaynında piston üzerine aktarılacak olan sönüm kuvveti, H_{∞} tasarımıyla elde edilen kontrol kuvveti üzerinden Denklem (3.31) ve (3.32) vasıtasıyla elde edilecektir.

$$F_{man} = u(t) = K_{control}z(t) = -F(t)\tanh(t_a \dot{y}) \quad (3.31)$$

$$F(t) = \frac{u(t)}{-\tanh(t_g \dot{y})}$$
(3.32)

Denklem (3.31)'deki F_{man} piston sistemine uygulanacak olan manyetik kuvveti temsil etmektedir. Denklem (3.32)'deki t_g pozitif tanımlı bir değerdir ve tanh fonksiyonunun signum fonksiyonuna benzemesi için 10 olarak alınmıştır.

4. Simülasyon Sonuçları

Tasarımı gerçekleştirilen piston-TLCD yapısının harmonik sinyaller ve deprem sinyalleri karşısında 20-katlı bina deplasmanı üzerindeki etkisi simülasyon ortamında gerçekleştirilen araştırmalarla incelenmiştir. Tasarlanan kontrol algoritmasının etkinliği, sistem durumlarının zaman ve frekans alanındaki cevaplarının yanı sıra performans ölçütü üzerinden gösterilecektir. Kullanılan performans ölçütü hatanın karesinin integrali (ISE) matematiksel denklemi Denklem (4.1)'de gösterilmiştir.

$$ISE = \int_{t_i}^{t_f} e^2(t) \tag{4.1}$$

Denklem (4.1)'deki e, referans ivme sinyali ve gövde üzerindeki ivme sinyali arasında oluşturulan hatayı, t zamanı, t_i başlangıç zamanını, t_f sonlandırma zamanını temsil etmektedir.

Yapılan simülasyon çalışmalarında kullanılan harmonik giriş sinyali binanın ilk doğal frekansında oluşturulmuştur. Sistem bozucu giriş sinyalleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Bozucu Giriş Sinyalleri (a) Harmonik Giriş Sinyali, (b) Kobe Deprem Giriş Sinyali, (c) Kocaeli Deprem Giriş Sinyali, (d) Northridge Deprem Giriş Sinyali



Şekil 4.2: Kat 1 Deplasmanı Zaman Cevabı - Harmonik Sinyal

Şekil 4.2'de bina ilk doğal frekansıyla eşlesen harmonik bozucu giriş sinyali etkisinde 20-katlı binanın en yüksek katındaki deplasmanların zaman alanındaki değişimleri gözlemlenmektedir. Kat 1'in piston-TLCD yapısı olmadan meydana gelen salınım genliklerinin piston-TLCD yapısının birleşiminden sonraki genliklerine göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Tasarımı gerçekleştirilen piston-TLCD yapısıyla birlikte H_{∞} ve LQR tabanlı yaklaşımların her ikisi de yüksek bastırım performanslarına sahip olduğu görünürken, H_{∞} tabanlı yaklaşımın daha yüksek performansa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3: Kat 1 Deplasmanı Frekans Cevabı – Harmonik Sinyal



Şekil 4.4: Yarı-Aktif Manyetik Kuvvet Piston Hızı – Harmonik Sinyal



Şekil 4.5: Yarı-Aktif Manyetik Kuvvet Zaman Cevabı – Harmonik Sinyal

Şekil 4.3'te yer alan frekans alanındaki cevaplar incelendiğinde zaman alanında elde edilen cevaplara benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Piston-TLCD yapısının yapı bloğu üzerine konumlandırılmasından sonra frekans alanındaki genliklerde azalmalar meydana getirilmiştir. Şekil 4.4'te piston-TLCD yapısındaki piston mekanizmasının hareketi için kontrol algoritması temelli manyetik kuvvet değerleri gösterilmiştir. En yüksek manyetik kuvvet değerlle+4 değeriyle sınırlandırılmıştır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 incelendiği zaman en yüksek gerekli kuvvet değerinin LQR ve H_{∞} tasarımları için aynı olmasına rağmen toplam enerji tüketiminin LQR tabanlı piston-TLCD yaklaşımında daha yüksek olduğu görülmektedir.



Sekil 4.6: Kat 1 Deplasmanı Zaman Cevabı - Kobe Depremi



Şekil 4.7: Kat 1 Deplasmanı Frekans Cevabı - Kobe Depremi



Şekil 4.8: Yarı-Aktif Manyetik Kuvvet Piston Hızı - Kobe Depremi

Şekil 4.6'da Kobe depremi etkisinde kat-l üzerinde meydana gelen yer değiştirmelerin tasarlanan piston-TLCD yaklaşımıyla birlikte bastırımı gösterilmiştir. Kontrol algoritmalarından LQR ve H_{∞} benzer bir bastırım performansı sergilemişlerdir. Tablo 4.1'de gösterildiği gibi ISE performans kriterinde yaklaşık %14.5'lik bir azalmaya sebep olmuştur. Şekil 4.7'de elde edilen sinyalin frekans alanındaki cevabı incelenmiştir. Piston-TLCD yaklaşımıyla birlikte Kobe deprem girişi etkisinde yapının en üst katında (kat-1) meydana gelen salınımların genliklerinde azalma elde edilmiştir. Şekil 4.8'deki manyetik kuvvet değerleri incelendiği zaman LQR tasarımının benzer bastırım performansına sahip olmasına rağmen daha düşük bir kuvvet en yüksek kuvvete sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.9: Yarı-Aktif Manyetik Kuvvet Zaman Cevabı – Kobe Depremi

Şekil 4.9 incelendiği zaman *LQR* tabanlı yaklaşımın daha az enerji tüketimine ve daha düşük en yüksek kuvvet ihtiyacı olduğu sonucuna varılır.



Şekil 4.10: Kat 1 Deplasmanı Zaman Cevabı - Kocaeli Depremi



Sekil 4.11: Kat 1 Deplasmanı Frekans Cevabı - Kocaeli Depremi

Şekil 4.10'da Kocaeli depremi etkisinde kat-1 üzerinde meydana gelen yer değiştirmelerin tasarlanan piston-TLCD yaklaşımıyla birlikte bastırımı gösterilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen algoritmaların bastırım performansları benzer seviyede çıkmıştır. Tablo 4.1'de ISE performans ölçütü üzerinden zaman cevapları okunduğu zaman yaklaşık % 5'lik bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.11'de frekans alanındaki cevaplar gösterilmiştir. Binanın en üst katı olan kat-1'de tasarımı gerçekleştirilen yaklaşımla birlikte

frekans genliklerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.12: Yarı-Aktif Manyetik Kuvvet Piston Hızı – Kocaeli Depremi



Şekil 4.13: Yarı-Aktif Manyetik Kuvvet Zaman Cevabı – Kocaeli Depremi

Şekil 4.12'de tasarlanan algoritmalar neticesinde piston-TLCD tasarımının sönüm kuvveti şeklinde sisteme etki ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.13'teki manyetik kuvvet değerleri incelendiği zaman *LQR* tasarımının benzer bastırım performansına sahip olmasına rağmen daha düşük bir kuvvet harcamasına sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.14: Kat 1 Deplasmanı Zaman Cevabı - Northridge Depremi



Şekil 4.15: Kat 1 Deplasmanı Frekans Cevabı - Northridge Depremi



Şekil 4.16: Yarı-Aktif Manyetik Kuvvet Piston Hızı – Northridge Depremi



Şekil 4.17: Yarı-Aktif Manyetik Kuvvet Zaman Cevabı – Northridge Depremi

Şekil 4.14'te kat-1'in Northridge deprem giriş sinyali karşısında elde edilen piston-TLCD'nin bulunmadığı ve kontrol algoritması temelli manyetik kuvvetle hareketlendirilen piston yapısıyla piston-TLCD bulunan yapıdaki deplasman sinyallerinin zaman alanındaki karşılıkları gösterilmiştir. Tablo 4.14'teki ISE değerleri üzerinden yorumlandığında tasarlanan piston-TLCD yapısının Northridge deprem sinyali etkisinde yaklaşık olarak %15 civarında kat-1 deplasmanının performans indeksinde iyileşmeye sebep olduğu görülmektedir. Şekil 4.15'te frekans alanındaki cevaplar incelendiğinde tasarlanan kontrol algoritmasının tepe değerlerinde azalmalara sebep olduğu görülmektedir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 incelendiği zaman *LQR* tabanlı yaklaşımın daha az enerji tüketimine ve daha düşük en yüksek kuvvet ihtiyacı olduğu sonucuna varılır.



Şekil 4.18: Toplam Gerekli Kuvvet

Şekil (4.18) incelendiği zaman rezonans frekansında harmonik bozucu giriş sinyali sisteme etki ettiğinde önerilen H_{∞} tabanlı piston-TLCD yaklaşımının benzer titreşim bastırım etkinliğinde daha düşük bir enerji tüketimi gerçekleştirdiği görülmektedir. Sisteme etki eden bozucu giriş sinyali deprem giriş sinyali olduğunda *LQR* tabanlı piston-TLCD yaklaşımının daha az enerji tüketimine sahip oluğu görülmektedir. Şekil (4.2):(4.17) ve Tablo 4.1 incelendiğinde tasarımı gerçekleştirilen piston-TLCD yapısının en yüksek bastırım performansının yapı birinci doğal frekansında elde ettiği görülmektedir. Farklı baskın frekans değerlerine sahip olan deprem giriş sinyalleri tarafından tahrik edilen yapı bloğu üzerinde %6-%15 aralığındaki ISE performans ölçütünde iyileştirmelere sahip olduğu görülmüştür.

	TLCD'siz	H_{∞}	LQR
	ISE $(m^2 s)$	ISE $(m^2 s)$	ISE $(m^2 s)$
Harmonik Sinyal	6786	49.1	68.8
Kobe Depremi	2.7e-3	2.3e-3	2.3e-3
Kocaeli Depremi	4.3e-3	4.1e-3	4.1e-3
Northridge Depremi	3.7e-4	3.1e-4	3.1e-4

Tablo 4.1: Performans İndeksleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, yapı birinci doğal frekans değerine sahip harmonik bozucu giriş sinyali ve deprem bozucu giriş sinyalleri tarafından tahrik edilen 20-katlı bir binanın piston-TLCD yapısıyla birlikte deplasman bastırımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde *piston-TLCD* bloğunun yapı üzerine iletilen kuvveti *LQR* ve H_{∞} kontrolör algoritmaları üzerinden incelenmiş ve etkileri karşılaştırılmıştır. Piston-TLCD yapısının en yüksek bastırım miktarının rezonans frekansında tahrik eden harmonik giriş sinyali altında elde ettiği sonucu elde edilmiştir. Farklı frekans baskınlığına sahip olan 3 farklı deprem giriş sinyali altında yapılan incelemeler sonucunda piston-TLCD yapısının incelenen farklı frekans aralıklarında nispeten olumlu sonuç verdiği görülmüştür. Önerilen iki farklı kontrol algoritması temelli piston-TLCD yaklaşımları incelendiği zaman H_{∞} kontrol algoritması yapısı itibariyle ilk frekans tepesinin daha etkin bastırılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle rezonans frekansındaki harmonik bozucu giriş etkisindeki sistemde benzer titreşim bastırım performansında daha düşük bir enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. Sisteme etki eden bozucu giriş sinyali deprem sinyali gibi farklı frekans bileşenlerini taşıdığında enerji tüketimi *LQR* tabanlı piston-TLCD yapısına oranla yükseldiği sonucu elde edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, 221M148 no'lu Tübitak 1001 Projesi kapsamında desteklenmektedir.

Kaynakça

- A. Farshidianfar, ve P. Oliazadeh, "Closed Form Optimal Solution of A Tuned Liquid Column Damper Responding to Earthquake," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Cilt: 59, s: 159-164, 2009.
- [2] J. Y. Wang, Y. Q. Ni, J. M. Ko, ve B. F. Spencer Jr, "Magneto-Rheological Tuned Liquid Column Dampers (MR-Tlcds) For Vibration Mitigation of Tall Buildings: Modelling and Analysis of Open-Loop Control," *Computers & Structures*, Cilt: 83, No: 25-26, s: 2023-2034. 2005.
- [3] C. C. Chang, ve C. T. Hsu, (1998). "Control Performance of Liquid Column Vibration Absorbers," *Engineering Structures*, Cilt: 20, No: 7, s: 580-586.
- [4] S. Kondo, K. Ikari, ve T. Sawada, "Vibrating Properties of a Magnetic-Fluid Tuned Liquid Column Damper with Different U-Pipes," *In Materials Science Forum*, Cilt: 856, s: 21-25, 2016.
- [5] A. Di Matteo, F. Lo Iacono, G. Navarra, ve A. Pirrotta, "Optimal Tuning of Tuned Liquid Column Damper Systems In Random Vibration By Means Of An Approximate Formulation," *Meccanica*, Cilt: 50, s: 795-808, 2015.
- [6] O. Altay, ve S. Klinkel, "A Semi-Active Tuned Liquid Column Damper for Lateral Vibration Control Of High-Rise Structures: Theory And Experimental Verification," *Structural Control And Health Monitoring*, Cilt: 25, No: 12, 2018.
- [7] F. Sadek, B. Mohraz, ve H. S. Lew, "Single-And Multiple-Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Cilt: 27, No: 5, s:439-463, 1998.
- [8] J. M. Ko, S. Zhan, Y. Q. Ni, ve Y. F. Duan, "Smart TLCD Using Synthetic-Hydrocarbon-Based MR Fluid: An Experimental Study," In Smart Structures and Materials 2004: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, Cilt: 5391, s: 250-261, 2004.
- [9] S. Colwell, ve B. Basu, "Experimental and Theoretical Investigations of Equivalent Viscous Damping of Structures with TLCD for Different Fluids," *Journal of Structural Engineering*, Cilt: 134, No: 1, s: 154-163, 2008.
- [10] S. K. Yalla, A. Kareem, ve J. C. Kantor, "Semi-Active Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Structures," *Engineering Structures*, Cilt: 23, No: 11, s: 1469-1479, 2001.
- [11] C. W. Cheng, H. H. Lee, ve Y. T. Luo, "Experimental Study of Controllable MR-TLCD Applied To The

Mitigation of Structure Vibration," *Smart Structures and Systems*, Cilt: 15, No: 6, s: 1481-1501, 2015.

- [12] Y. Chen, W. Zhang ve H. Gao, "Finite Frequency H∞ Control for Building Under Earthquake Excitation," *Mechatronics*, Cilt: 20, No: 1, s: 128-142, 2010.
- [13] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, ve V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.