

# AKTİF KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLİ ÇOK SERBESTLİK DERECELİ BİR YAPININ DEPREME KARŞI LQR KONTROLÜ

Nurkan Yağız\*, Rahmi GÜÇLÜ\*\* ve İsmail YÜKSEK\*\*

\*İstanbul Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul

\*\*Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Beşiktaş, İstanbul

## ÖZET

17 Ağustos 1999 tarihinde Marmara Bölgesinde meydana gelen depremin binalarda sebep olduğu hasar, binalarda depreme karşı titreşim kontrolünü bir kez daha gündeme getirmiştir. Bu çalışmada, Aktif Kütle Sönümleyici (ATMD)ye sahip çok serbestlik dereceli bir gerçek bina modelinin deprem veya rüzgar kaynaklı titreşimlerini önlemek için bir İkinci Dereceden Doğrusal Düzenleyici (LQR) tasarlanmıştır. Simülasyonu yapılan sistem beş serbestlik derecesine sahiptir. Kontrol cihazı olarak doğrusal bir motor kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, kontrol edilmeme ve LQR kontrollü yapının her ikisinin de, kat yerdeğişimlerinin zaman ve frekans cevapları sunulmuş, sonuçlar tartışılmıştır.

## Anahtar Sözcükler

İkinci dereceden doğrusal düzenleyici (LQR), aktif kütle sönümleyici (ATMD), çok serbestlik dereceli yapı, deprem kaynaklı titreşim, rüzgar kaynaklı titreşim.

## ABSTRACT

The damage on buildings caused by the earthquake on August 17<sup>th</sup>, 1999 at Marmara Region has made vibration control of buildings against earthquakes popular again. In this study, a Linear Quadratic Regulator (LQR) is designed for a multi-degree of freedom real building model having an Active Tuned Mass Damper (ATMD) to suppress earthquake or wind induced vibration. The simulated system has five-degree of freedom. In this study, a linear motor is

used as the control device. At the end of the study, the time history of the floor displacements and frequency responses of both uncontrolled and LQR controlled structure are presented and results are discussed.

## Keywords

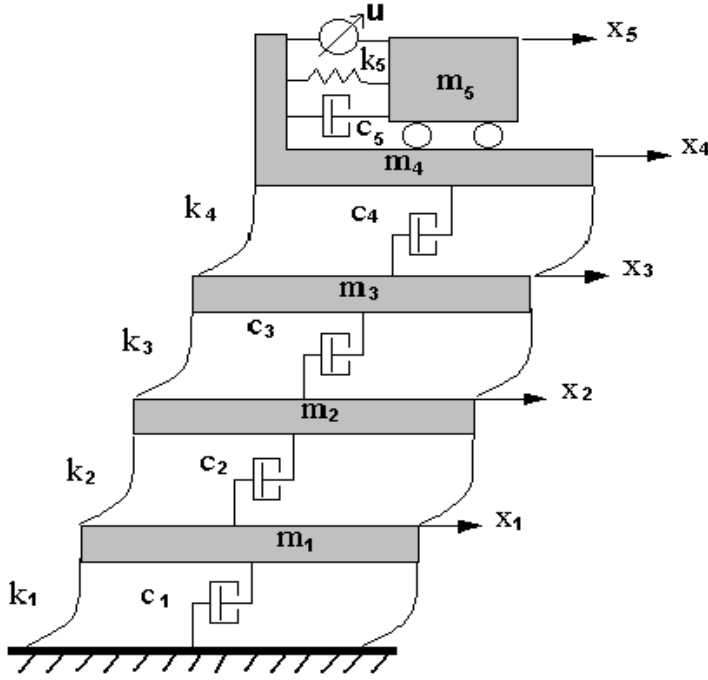
Linear quadratic regulator (LQR), active tuned mass damper (ATMD), multi-degree of freedom structure, earthquake induced vibration, wind induced vibration.

## GİRİŞ

17 Ağustos 1999 tarihinde olan Marmara Depremi gibi şiddetli yer sarsıntılarının dünya ölçeğinde yaptığı yıkıntı, yapı malzeme ve yöntemlerinin geliştirilmesinin yanısıra, deprem karşısında binaların titreşim kontrolü konusundaki araştırmaları da hızlandırmıştır. Bu çerçevede, son dönemlerde yapısal titreşimlerin kontrolü, gerek teorik gerekse pratik olarak oldukça hızlı bir gelişme göstermiştir. Elastik yatak kullanılarak titreşim izolasyonu gerçekleştirmek, pasif titreşim kontrol metodlarının en popüler olanlarından biridir. Kauçuk yaprak ve çelik plakalar içeren elastik yatak, deprem karşısında iyi sonuç verebilmektedir. Ayrıca, literatürde yarı aktif titreşim metodları da önerilmektedir. Yoshida ve Fujio (1999), titreşim kontrolünde, viskoz sönüm katsayısı değiştirilen yarı aktif bir kontrol metodunu temele uygulamıştır. Son yıllarda, deprem kaynaklı titreşimleri izole etmek için kullanılan aktif ikaz edicilerle ilgili yapılmış çalışmalar vardır. Fukushima ve diğerleri (1996), yüksek binalarda rüzgar ve depremden kaynaklanan titreşimleri azaltmayı amaçlayan aktif-pasif kompozit ayarlı kütle sönümleyici geliştirdiler. Binalarda, belirsizlikler ve sabit olmayan sistem parametreleri mevcut olduğundan, yapıların aktif kontrolü için robust (dayanıklı) kontrol metodları önerilmektedir (Nishimura ve diğerleri, 1996). Yağız ve diğerleri de (2000), yapısal titreşimleri azaltmak için Kayan Kipli Kontrol metodu kullanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, gerçek bir bina modeline İkinci Dereceden Doğrusal Düzenleyici (LQR) uygulamaktır. Bu metod, ilgili zaman aralıklarındaki yapısal cevap ve kontrol kuvvetlerini de içeren ikinci dereceden performans indeksinin minimum yapılmasına dayanmaktadır (Anderson ve Moore, 1990). Bu kontrol metodu, yapısal titreşimi azaltmakta ve kontrol sisteminin enerjisini korumaktadır.

## BİNANIN DİNAMİK MODELİ



Şekil 1. Binanın Fiziksel Modeli

Çalışma konusu bina 4 katlıdır. ATMD kütlesi ile beraber 5 Serbestlik derecesine sahip yapısal sistemin tüm hareketi yatay doğrultudadır. Ana yapının ilk titreşim moduna eşit olarak ayarlanan kontrolcülü ATMD, en üst katın üzerine yerleştirilmiştir. ATMD kontrol sisteminin amacı, yüksek binaların rüzgar ve deprem kaynaklı titreşimlerini azaltmaktır. Fiziksel sistem Şekil 1. de gösterilmiştir. Her bir katın kütlesi sırasıyla  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  ve  $m_4$  olup,  $m_5$  de ATMD'nin kütlesidir.  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  ve  $x_5$  de ilgili yatay yerdeğişimleridir. Katlara ait tüm yay ve sönüm elemanları, yatay yönde hareket etmektedir. Gerçek bir binaya ait olan sistem parametreleri Ek 2 te verilmiştir.

Sistemin hareket denklemi aşağıdadır:

$$[M] \underline{\dot{X}} + [C] \underline{X} + [K] \underline{X} = \underline{F}_u + \underline{F}_d \quad (1)$$

Burada,  $\underline{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$  ve  $\underline{F}_u = [0 \ 0 \ 0 \ F_u \ -F_u]^T$  dir.  $F_u$ , doğrusal motor tarafından üretilen kontrol kuvvetidir.  $\underline{F}_d$  ise yapısal sisteme uygulanan bozucu kuvvet vektörüdür.  $[M]$ ,  $[C]$  ve  $[K]$ ; kütle, sönüm ve katılık matrisleri olup, Ek 2 te sunulmuştur. Bu tür yapısal sistemlerde doğrusal motorların kullanımı deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır (Nishimura ve diğerleri, 1996). Bu tür bir doğrusal motorun denklemi,

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left[ \sum_{i=1}^n q_i x_i^2 + \sum_{j=1}^m R_j u_j^2 \right] dt$$

$$R i + K_e (x_5 - x_4) = u \quad (2)$$

$u$  ve  $i$ , sırasıyla bobin sargısının voltaj ve akımıdır. Burada  $u$ , aynı zamanda kontrol voltaj girişidir.  $R$  ve  $K_e$ , bobin sargısının direnç değeri ve etki eden voltaj sabitidir. Bobin sargı akımı ile kontrol kuvveti arasında aşağıdaki ilişki vardır:

$$F_u = K_f i \quad (3)$$

$K_f$ , bobin sargısının itme sabitidir. Bobin sargısının endüktans akımı ihmal edilmiştir. Denklem (1) ile (3) birleştirilerek düzenlenirse, durum uzayı biçiminde denklemleri yeniden düzenlemek de mümkündür.

## LQR TASARIMI

Bu yaklaşım bir durum kontrol problemidir. Optimum kontrol girişini hesaplamak için performans indeksi, tüm durum değişkenleri göz önüne alınarak girilir:

(4)

matris formunda,

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left[ \mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) \right] dt \quad (5)$$

burada ölçüm matrisi;

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Tüm ölçüm değişkenleri  $q_i$  ve  $R$ , performans indeksini pozitif sonsuz yapmak için pozitif olarak alınmalıdır. Kontrol kanununa göre LQR için en iyi kontrol girişi aşağıdaki gibi verilir:

$$u = G_{opt} \underline{x} = R^{-1} B^T P \underline{x} \quad (7)$$

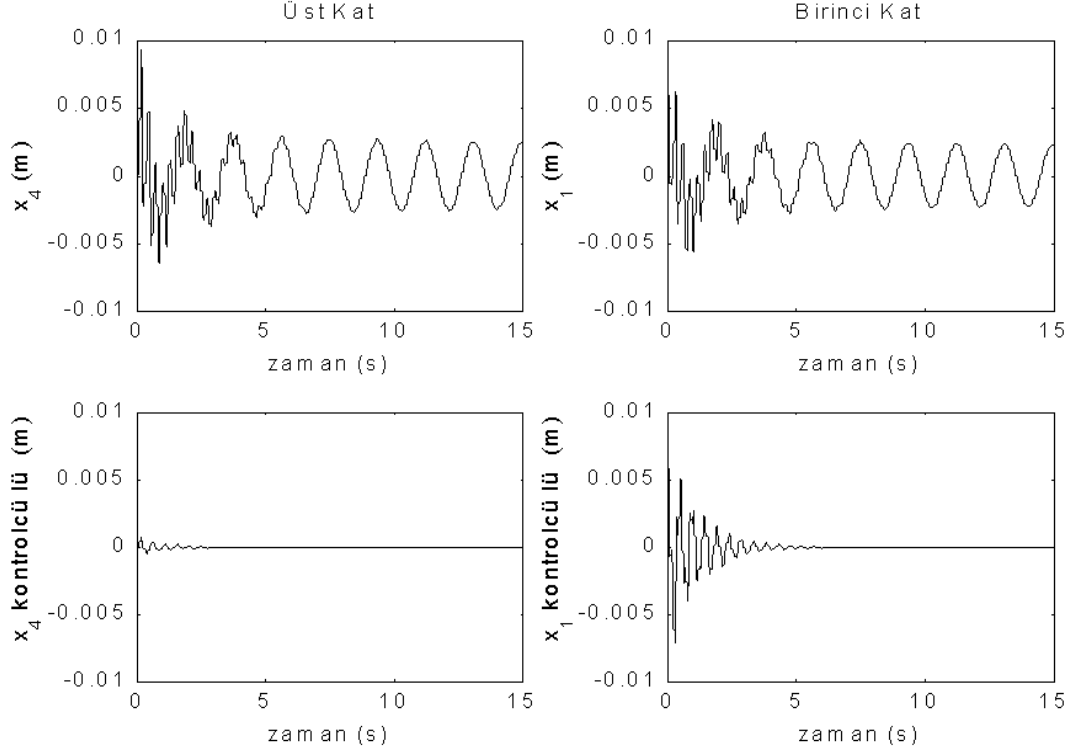
$P$ , aşağıdaki Riccati denkleminin çözümüdür:

$$A^T P - P B R^{-1} B^T P + P A + Q = 0 \quad (8)$$

Burada, sistemin kontrol edilebildiği ve durum değişkenlerinin de ölçülebildiği varsayılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan  $Q$  matrisinin bütün diyagonal terimleri  $1$ 'e eşittir, ancak  $q_4 = 10^{20}$  olarak seçilmiştir.  $R = 1$ 'dir.

## SİMULASYON

Yapısal sistemin, birinci katının başlangıç anında yerdeğişim değerinin  $0.01$  m olduğu kabul edilerek, simülasyonu yapılmıştır. Şekil 2.a ve 2.b, en üst ve birinci katların kontrolcülü ve kontrolcüsüz zaman cevaplarını göstermektedir. Yapının yatay yerdeğişimleri gözönüne alındığında önemli bir gelişmenin olduğu

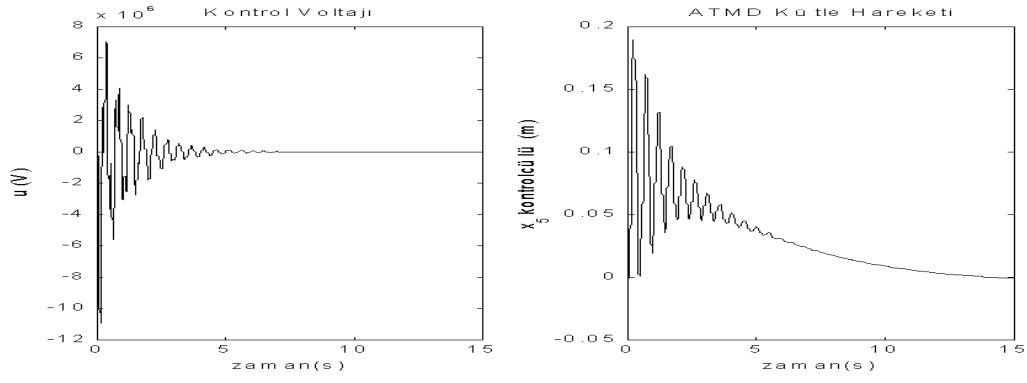


(a)

(b)

Şekil 2. Birinci Ve En Üst Katın Kontrolcü lü ve Kontrolcü sü Zaman Cevapları

gözlemlenmektedir. Şekil 3.a, voltaj girişindeki değişimi göstermektedir. ATMD kütlesinin hareketi de, Şekil 3.b de gösterilmiştir.

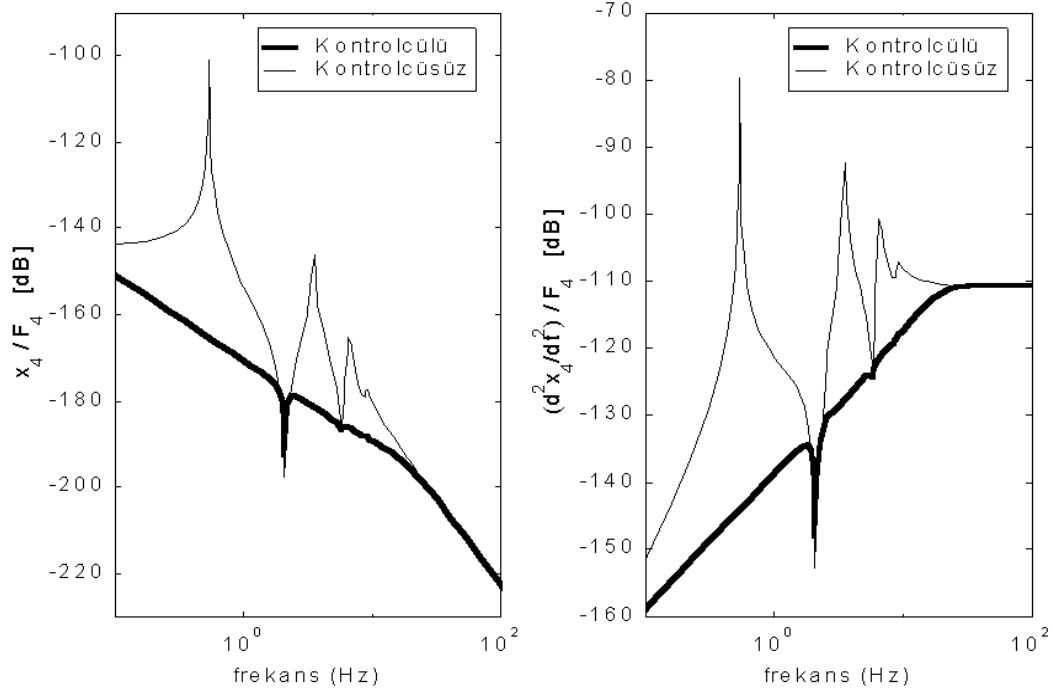


(a)

(b)

Şekil 3. Kontrol voltajının zaman cevabı ve ATMD'nin yerdeğişimi

Şekil 4., kontrolcülü ve kontrolcüsüz yapılar için sırasıyla en üst katın yerdeğişim ve ivmelerinin frekans cevaplarını göstermektedir. Binanın doğal frekansları; 0.5969, 3.561, 6.565 ve 8.876 Hz. değerindedir. ATMD'nin doğal frekansı ise birinci doğal frekansa eşit olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 4. En üst katın kontrolcülü ve kontrolcüsüz frekans cevapları

Şekil 4.'teki yüksek rezonanslı eğriler, kontrolcü kullanılmayan binaya aittir. Amaçlandığı gibi, en üst katındaki dahil tüm rezonans değerlerinde ciddi bir iyileştirme elde edilmiştir.

## SONUÇLAR



LQR kontrolcülü bir ATMD, dört katlı gerçek bir bina modeli için tasarlanmıştır. Deprem ve rüzgar kaynaklı titreşimler, yatay yönde yıkıcı ve rahatsız edici etkiye sahip olduğundan, bu çalışmada serbestlik dereceleri sadece bu yönde göz önüne alınmıştır. Bina, kontrol cihazı olarak kullanılan doğrusal motor dinamiği dahil edilerek modellenmiştir. Görülmektedir ki, bina üzerindeki olumsuz etkilere karşı LQR kontrolcününün tasarlanması, sismik izolasyon performansını oldukça iyileştirmiştir. Bina katlarının yerdeğişimi ve ivme cevaplarındaki gelişme, depremlerin yıkıcı etkilerine karşı, aktif kontrollü yapıların ciddi bir çözüm alternatifi olduğunu göstermektedir.

### KAYNAKÇA

Anderson, B.D.O., Moore, J.B., [Optimal Control: Linear Quadratic Methods], Prentice-Hall, N.J., 1990.

Fukushima, I., Kobori, T., Sakamoto, M., Koshika, N., Nishimura, I., Sasaki, K., [Vibration Control of a Tall Building Using Active-Passive Composite Tuned Mass Damper], Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, September, 1996.

Nishimura, H., Ohkubo, Y., Nonami, K., [Active Isolation Control for Multi-Degree-of-Freedom Structural System], Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, September, 1996.

Yağız, N., Yüksek, İ., Güçlü, R., [Sliding Mode Control of a Multi-Degree-of-Freedom Structural System], 2<sup>nd</sup> International Symposium on Mechanical Vibrations, Islamabad, Pakistan, September 25-28, 2000.

Yoshida, K., Fujio, T., [Semi-Active Base Isolation for a Building Structure], Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conference, Las Vegas, Nevada, 1999.

EK

Bina parametreleri:

$$m_1 = 450\ 000\ \text{kg.}$$

$$m_2 = m_3 = m_4 = 345\ 000\ \text{kg.}$$

$$m_5 = 40\ 000\ \text{kg.}$$

$$k_1 = 18,05 \cdot 10^6\ \text{N/m.}$$

$$k_2 = 340 \cdot 10^6\ \text{N/m.}$$

$$k_3 = 326 \cdot 10^6\ \text{N/m.}$$

$$k_4 = 285 \cdot 10^6\ \text{N/m.}$$

$$k_5 = 482 \cdot 10^3\ \text{N/m.}$$

$$c_1 = 26\ 170\ \text{N.s/m.}$$

$$c_2 = 490\ 000\ \text{N.s/m.}$$

$$c_3 = 467\ 000\ \text{N.s/m.}$$

$$c_4 = 410\ 000\ \text{N.s/m.}$$

$$c_5 = 1\ 970\ 000\ \text{N.s/m.}$$

$$K_f = 2\ \text{N/A.}$$

$$K_e = 2\ \text{V.s/m.}$$

$$R = 4,2\ \Omega .$$

$$x_1(0) = 0,01\ \text{m.}$$

Kütle, Sönüm ve Katılık Matrisleri

Kütle matrisi,

$$[M] = \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m5 \end{bmatrix}$$

Sönüm matrisi,

$$[C] = \begin{bmatrix} (c1 + c2) & -c2 & 0 & 0 & 0 \\ -c2 & (c2 + c3) & -c3 & 0 & 0 \\ 0 & -c3 & (c3 + c4) & -c4 & 0 \\ 0 & 0 & -c4 & (c4 + c5) & -c5 \\ 0 & 0 & 0 & -c5 & c5 \end{bmatrix}$$

Katılık matrisi,

$$[K] = \begin{bmatrix} (k1 + k2) & -k2 & 0 & 0 & 0 \\ -k2 & (k2 + k3) & -k3 & 0 & 0 \\ 0 & -k3 & (k3 + k4) & -k4 & 0 \\ 0 & 0 & -k4 & (k4 + k5) & -k5 \\ 0 & 0 & 0 & -k5 & k5 \end{bmatrix}$$