



8 Katlı Yapının Dinamik Yükler Altında Titreşim Kontrolü

Vibration Control of an 8-Storey Building Under Dynamic Loads

Mürüvvet BATI^{1,*} , Kemal BEYEN² 

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-9370-0780

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-8878-0985

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 16/01/2020

Kabul Tarihi : 05/05/2020

Anahtar Kelimeler

Yapısal Kontrol
Ayarlı Kütle Sönümleyici (TMD)
Pasif Kontrol
Aktif Kontrol

Özet

Son yıllarda yapıların davranışını orta ve şiddetli depremler önemli ölçüde etkilemektedir. Sismik hareketler önceden nasıl olacağı tahmin edilemez ve doğa gereği önlenemez. Yapıların sismik tepkisini azaltmak amacıyla çeşitli yapısal kontrol sistemleri uygulanmaktadır. Aktif ayarlı kütle (TMD) ve pasif ayarlı kütle (PTMD) sönümleyiciler yapıların görece kat ötelemelerinin minimize edilmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada 8 katlı betonarme bir yapının dinamik yüklerin oluşturduğu tepkileri azaltmak amacıyla pasif ayarlı kütle (PTMD) ve aktif ayarlı kütle sistemleri (ATMD) ile kontrol sistemlerinin etkileri araştırılmıştır. Matlab makro kodlamayla yazılan analiz programı kullanılarak yürütülen simülasyon çalışmaları ile elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Sonuçlara göre yapı kat seviyelerindeki yer değiştirme ve ivme değerlerinin ATMD sisteminde sonuçların kat tepkilerini önemli ölçüde düşürürken, PTMD kat tepkilerini azaltmada daha az etkisi olmuştur.

Research Paper

Received Date : 16/01/2020

Accepted Date : 05/05/2020

Keywords

Structural Control
Tuned Mass Damper (TMD)
Passive Control
Active Control

Abstract

In recent years, significant affects have been observed on the behavior of structures in moderate and severe earthquakes. Seismic movements are unpredictable and cannot be prevented naturally. However, various structural control systems can be applied in engineering practice to limit the seismic response of the structure. Active tuned mass damping (ATMD) and passive tuned mass (PTMD) systems among them that are currently used for minimizing the relative storey offset of the structures. In this study, 8-storey reinforced concrete (RFC) structure is designed to control with passive tuned mass (PTMD) and active tuned mass systems (ATMD), which, as expected, should reduce the responses generated by the earthquake type dynamic loads. The results obtained by simulation studies carried out using Matlab macro coding analysis program were discussed in detail. According to the results, maximum displacement and acceleration values at the floor levels are significantly minimized. It is seen that the floor responses are effectively reduced in the ATMD system, while PTMD had less effect on reducing floor response.

1. Giriş

Yer kabuğu üzerinde Dünyanın oluşumundan bu yana gerçekleşen yırtılma veya kırılmalar sebebiyle pek çok deprem meydana gelmiştir. Yer kabuğundaki bu hareketler ortaya çıkan enerji hareketiyle can ve mal kaybına neden olan depremler meydana gelebilmektedir. Bu yüzden yapıları deprem gibi dinamik yüklere karşı koyabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Günümüzde dinamik yüklere karşı yapının performansını iyileştirip tepkilerini azaltmak amacıyla pek çok yapısal kontrol sistemleri geliştirilmiştir.

Yapısal titreşimleri önlemek amacıyla en yaygın kullanılan sistemlerden biri Ayarlanmış kütle sönümleyicileridir (Tuned Mass Damper). Bir kütle, yay ve sönümleyiciye sahip TMD yapıya sonradan ilave edilerek istenmeyen titreşimleri azaltır

TMD yapıyla beraber hareket edebilir. TMD kütlesi yapı kütlelerinin %1'i kadar olup yay kütle sisteminin frekansı yapının birinci modunun frekansına ayarlanır. Ayarlı kütle sönümleyicileri genel olarak yapıya etkiyen dinamik yükleri azaltmak amacıyla yapının en üst katına yerleştirilir.

Titreşim kontrolü kavramı 1900'lere kadar dayanır. İlk olarak Frahm [15] 1909 yılında gemi makinelerinin

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): batimuruvvet@gmail.com



omurgasında titreşim sorununu önlemeye yönelik ortaya çıkmıştır. TMD kullanımı ilk teorik çalışma 1928'de Ormondroyd ve Den Hartog [1] tarafından yapılmıştır.

O zamandan beri, çok fazla farklı dinamik yüklemeler için etkinliğini araştırmak amacıyla çalışmalar yapılmış ve uygulanmıştır. TMD'ler rüzgar kaynaklı titreşimleri engellemek için yüksek yapılarda kullanılmaktadır. Örnekler arasında: Boston'daki 244 m yüksekliğindeki John Hancock Kulesi [2] İki adet 2.7 x 105 kg (300 ton) kurşun ve çelik bloktan oluşan TMD; New York'ta 280 m yüksekliğindeki Citycorp Center Ofis Binası 3.6 x 105 kg (400 ton) beton bloktan oluşan TMD [3]; New York'taki Park Binasının [4] teras kısmında dansın neden olduğu titreşimleri azaltmak için kullanılmıştır.

Sismik bölgede inşa edilen yapılar için titreşimler aşırı olabilir, bu yüzden titreşim kontrolü güvenlik ve insan konforunu sağlamak için gereklidir. Aktif kontrolün inşaat mühendisliği yapılarına nasıl uygulanacağı üzerine fikir Yao [5] 'un çalışmalarıyla açıklığa kavuşmuştur.

Bu çalışmada pasif ve aktif kontrol prosedürleri ile ilişkili detaylar genel kavramları araştıracaktır. PTMD ve ATMD uygulamalarının karşılaştırılması 8 katlı binanın sismik davranışıyla belirlenmiştir. Öncelikle kontrolsüz yapının tepkileri sonra pasif ve aktif ayarlı kütle sistemleri yapıya uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Aynı zamanda Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de yer alan düzensizlik limitleri kontrol edilecektir.

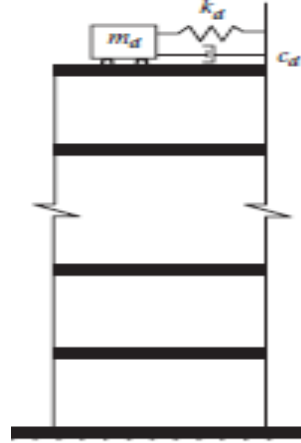
2. Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri dışarıdan herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan yapıya yerleştirilmiş çeşitli mekanizmalarla dinamik enerjiyi ısıya dönüştürür veya üzerine alır. Bununla birlikte, pasif kontrol cihazları dışarıdan güç kaynağına ihtiyaç duymadığı için doğal olarak stabildir. Başlıca pasif kontrol sistemleri; ayarlı kütle sönümleyici (TMD), ayarlı sıvı sönümleyici (TLD), viskoelastik sönümleyici, viskoz sıvı sönümleyiciler ve metalik sönümleyicilerdir.

2.1. Pasif Ayarlı Kütle Sönümleyici (PTMD)

Şekil 1'de çok serbestlik dereceli bir yapı ve bu yapının en üst katına yerleştirilmiş TMD'nin modeli görülmektedir. Burada k_d , c_d ve m_d ayarlı kütle sisteminin (TMD) rijidlik katsayısı, sönüm katsayısı ve kütlelerini ifade etmektedir. TMD'nin kütlelerinin yapıya göre 180° faz dışı hareketi ile yapıyla aynı frekansta titreşir ve enerji sönümlenir. Pasif TMD'ler yapının genel olarak birinci mod tepkilerini azaltacak şekilde tasarlanır. Diğer modların da kontrolün sağlanması aktif kontrol sistemleri ile mümkün olabilmektedir.

Bir TMD'nin en basit şekli, sabitlenmiş yardımcı bir kütle yay yaylı kumanda cihazından oluşur veya Şekil 1'de gösterildiği gibi ana yapının kat seviyelerine (genellikle üst kat) yerleştirilir. Damperin frekansı belirli bir yapısal frekansa (genellikle ilk doğal frekans) ayarlanır, yapısal hareket ile bu frekans uyarıldığında, damper faz dışı rezonansa girer. Böylece yapıya etki eden kuvvetlerin enerji yayılımı damper ile elde edilebilir.



Şekil 1. Pasif Ayarlı kütle sönümleyici yerleştirilmiş yapı

Pasif kontrol sistemi kullanılan yapıların genel hareket denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$(M_{o+} M_p) \ddot{X}_s + (C_o + C_p) \dot{X}_s + (K_o + K_p) X_s = e_s \ddot{x}_g \quad (1)$$

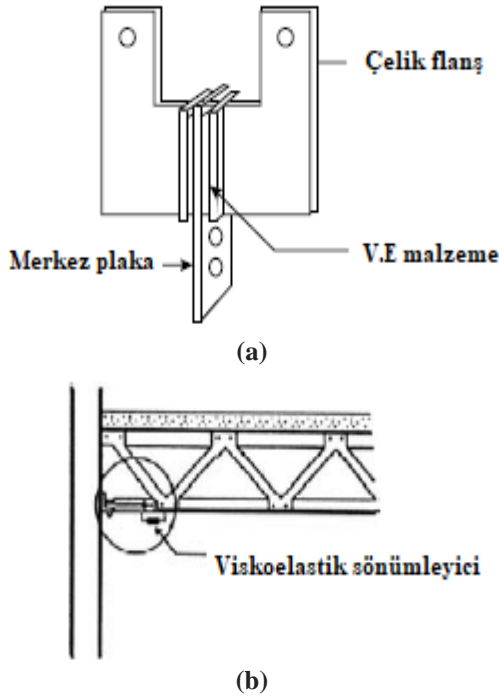
Burada M_o , C_o , K_o sırasıyla orijinal yapının kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, M_p , C_p , K_p pasif kontrol sistemin kütle rijitlik ve sönüm matrislerini ifade etmektedir. X_s pasif kontrol sistemi ilave edildikten sonra yer değiştirme vektörünü ifade etmektedir. e_s depremin yapıya etki vektörünü \ddot{x}_g ise yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

2.2. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (TLD)

Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (TLD), yapısal titreşim enerjisini azaltan bir TMD ile aynı temel prensibe sahiptir ve karmaşık mekanizmaları yoktur. TLD'ler de genel olarak yapısal tepkilerin maksimum olduğu en üst katlara yerleştirilir. Bir Ayarlı Sıvı Sönümleyici su veya başka bir sıvı malzeme, kütle gibi yerçekimi tarafından oluşan kuvvetle etkilenir ve sistem çalışır. Dinamik etkilerle oluşan yapısal titreşim TLD'yi harekete geçirir ve hazne içindeki sıvı hareketi ile enerji sönümlenir. TLD'ler ilk olarak gemilere uygulanırken 1980'lerde inşaat mühendisliği titreşim kontrolü olarak kullanılmaya başlanmıştır [10].

2.3. Viskoelastik Sönümleyiciler

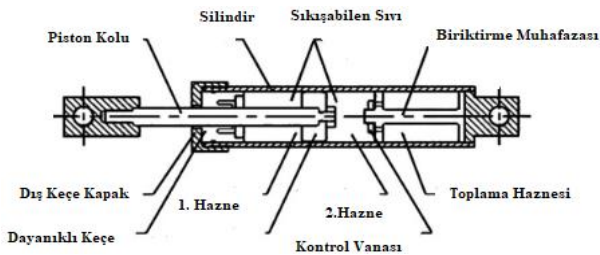
Viskoelastik sönümleyiciler viskoelastik malzemenin kesme deformasyonu yapıdaki titreşim enerjisini dağıtır ve yapı tepkilerini azaltır. Viskoelastik sönümleyicinin histeris eğrisi eliptir ve bu sayede mükemmel enerji dağıtım kapasiteleri vardır. Viskoelastik sönümleyicilerin avantajları imalatı kolay, dayanıklılığı iyi ve düşük maliyetli olmaları olarak sıralanabilir. Hem deprem hem de rüzgâra karşı yapı kontrolünde kullanılır. Viskoelastik sönümleyicilerin dezavantajları sıcaklıktan etkilenmeleridir.



Şekil 2. (a) Viskoelastik sönümleyici, (b) Dünya Ticaret Merkezinde kullanılan viskoelastik sönümleyici detayı

2.4. Viskoz Sıvı Sönümleyiciler

Viskoz sönümleyiciler çelik bir piston içindeki akışkan silikon veya yağ aracılığıyla çalışmaktadır. Viskoz sönümleyicilerin avantajları yoğunluğunun düşük olması, sıkıştırılmaz olması, ısıya dayanıklı olması ve geniş frekans bandında çalışabilmeleridir. Viskoz sıvı sönümleyiciler genellikle ağır sanayi ve askeri alanlarda kullanılır.

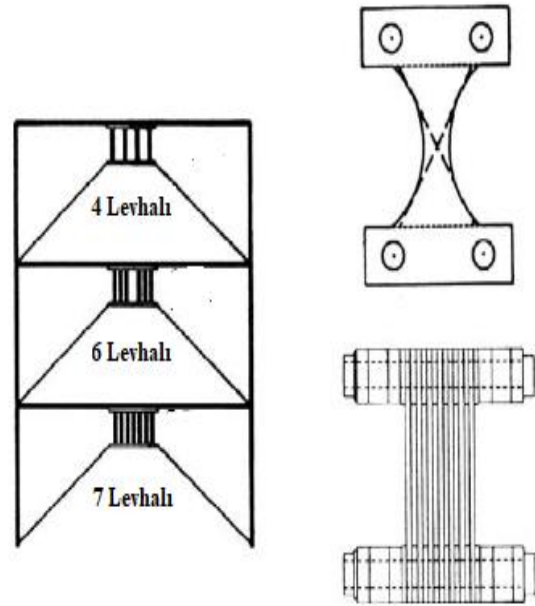


Şekil 3. Viskoz Sıvı Sönümleyici

2.5. Metalik Sönümleyiciler

Yapıya yerleştirilen metalik sönümleyicilerin elastik olmayan deformasyonu enerjiyi dağıtırlar. Bu sönümleyiciler ile enerjinin belli noktalarda yoğunlaşması sağlanır ve böylelikle taşıyıcı sistem zarar görmez. Sönümleyici şekil değiştirmesi halinde sökülebilir yerine yenisi takılabilir. Metalik sönümleyici olarak genel olarak X, üçgen veya dikdörtgen şeklinde yumuşak çelik veya kurşun malzemeler kullanılır.

Şekil 4'deki modelde ADAS olarak adlandırılan X şeklinde metalik sönümleyici yerleştirilmiş yapı ve sönümleyicinin detayı yer almaktadır. Şekilde görüldüğü üzere çelik levhalar birbirine paralel olarak yerleştirilir ve plakalar V şeklinde çelik çubukların arasına yerleştirilir.



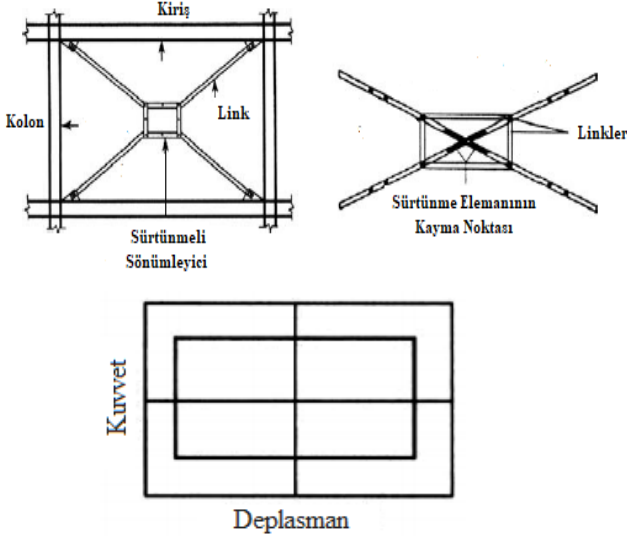
Şekil 4. X Şekli Metalik Sönümleyici Yerleştirilmiş Yapı ve Sönümleyici Detayı

2.6. Sürtüneli Sönümleyiciler

Sürtüneli sönümleyiciler, yapıya eklenen kavramalar arasına yerleştirilen elemanlar aracılığıyla, hareketin kinetik enerjisini ısı enerjisine dönüştürürler. Sürtüneli Sönümleyiciler hidrolik olarak çalışan araçlardır. Elemanlardaki kayma sürtünmesi aracılığıyla sönüm sağlanır. Sürtüneli sönümleyicinin en bilinen örneği 1980'lerin başında Pall ve Marsh pasif sürtüneli sönümleyicilere öncülük etmişlerdir [11]. Pall ve Marsh'ın X şekilli çubuklardan oluşan sistemleri sürtünme prensibini kullanırlar [12]. Şekil 5'de görüldüğü üzere bu elemanlar kavramalar gibi diyagonal yerleştirilmeyip kat kirişlerine paralel yerleştirilmiştir. Sürtüneli sönümleyicilerin en önemli özellikleri, orta şiddette deprem ve rüzgâr gibi dinamik yer hareketlerinin etkileri

sonucunda kaymaya izin verilmeyecek şekilde tasarlanmış olmalarıdır.

Sürtünmeli araçlar efektif kullanım, güvenilirlik ve ekonomik olmalarından yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sönümleyicilerin uzun süre mekanik özelliklerini korumak zordur. Korozyon ve sıcaklık değişimlerinden etkilenirler.



Şekil 5. Pall Sürtünme Tipi Sönümleyici ve Kuvvet Deplasman grafiği

3. Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemleri, pasif kontrol sistemlerinden farklı olarak dışarıdan güç kaynağına ihtiyaç duyar. Bu dış güç kaynağı aracılığıyla kontrol edilen tetikleyici sayesinde yapıya kuvvet uygulanır ve yapının dışarıdan gelen etkiye karşılık verdiği tepkiyi azaltacak kontrol kuvvetleri hesaplanıp uygulanır. Aktif kontrol sistemleri dış ve iç etkilerden oluşacak tepkileri kontrol edebilir.

Aktif kontrolün amacı, yapı kontrolü süresince yapıya geri besleme sisteminden kontrol kuvveti uygulanarak yapının tepkilerinin belirli sınırlar içinde tutmaktır.

Fallah ve Taghikhany (2013), sismik yüklemeye maruz kalan kablo destekli bir köprünün merkezi olmayan kontrol performansını incelemek için zaman gecikmesi H2 / LQG kontrol stratejisini kullanmışlardır [19]. Li ve Adeli (2016) 10 katlı bir yapıda, yapı parametrelerinin belirsizliklerini göz önünde bulundurarak H2 / H ∞ algoritmasını kullanarak aktif ayarlı kütle sönümleyicisiyle (ATMD) yapısal tepe tepkilerinin azaltıp gürbüz kontrol yapmışlardır [20]. Jian ve Adeli yüksek katlı yapılarda geometrik ve malzeme özelliklerinin değişimlerini içeren doğrusal olmayan aktif kontrol modeli sunmuşlardır. Model 3 boyutlu çelik bina yapıları için onaylanmıştır [21]. Pujol ve meslektaşları, histerik sistemlerin hızı dayalı aktif titreşim kontrolü hakkında bir araştırma yaptılar. Bahsedilen histerik model, doğrusal olmayan bir terimin

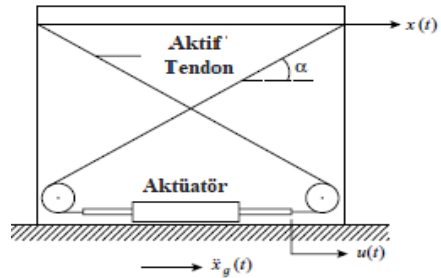
pasif bir fonksiyonla değiştirildiği Bouc-Wen modelinin bir modifikasyonuna dayanıyordu. Bu histerik modelleri kullanarak, histerik temel izolasyon yapıları üzerindeki sismik etkileri azaltmak için hızı dayalı aktif titreşim kontrol şemasının geliştirildiğini gösterdiler [22].

Başlıca aktif kontrol sistemleri; aktif kütle sönümleyicisi, aktif tendon kontrolü, aktif destek kontrolü ve darbe harekete geçirici sistem olarak sıralanabilir.

3.1. Aktif Tendon Kontrolü

Aktif tendon sistemi önerilmeli tendonlardan ve aktüatörlerden oluşur. Öngerilmeli tendon eğik form ve çapraz formda yerleştirilir. Bu sistem için dört adet tendon ve iki aktüatör kullanılır. Tendonların ikisi yapının bir yüzüne, diğer ikisi diğer yüzüne yerleştirilir. Yapı dinamik yükler altında uyarıldığında aktüatörler tarafından verilen yer değiştirmeye tendonlar gerilme kuvvetlerinin değişimi ile yapı kontrolü sağlanmış olur.

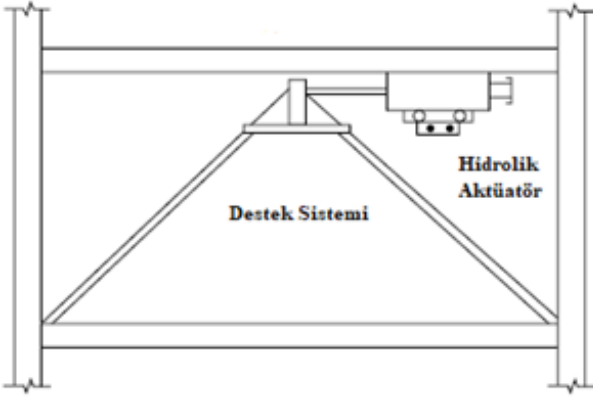
Aktif bir tendon sisteminin 6 katlı tam ölçekli uygulanması, Japonya'nın Tokyo kentinde 600 tonluk bina test edilmiştir [7]. Aktif tendon sistemleri kullanılarak kontrol edilen yapılar üzerinde gerçekleştirilen hem teorik hem de deneysel çalışmaların sonuçları yapıların tepkilerinin önemli ölçüde düşürmüştür. İnşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan Aktif Tendon Sistemi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Aktif Tendon Sistemi

3.2. Aktif Destek Kontrolü

Aktif destek sistemi, elektrohidrolik mekanizma tarafından yapıya eklenen öngerilmeli destek kirişleriyle sağlanmaktadır. Bu destek elemanları diyagonal, X ve K şeklinde kullanılır. Yapının çeşitli yerlerine yerleştirilmiş sensörler tarafından kontrol bilgisayarına sinyaller iletilir. Bu sinyaller kontrol bilgisayarı tarafından değerlendirilip dinamik iticiye sinyaller gönderir ve bu sinyaller dinamik itici tarafından yapının tepkilerini azaltacak doğrultuda kuvvet uygulanır. Bu sistemler yüksek katlı ve uzun açıklıklı yapılarda kullanılabilir. Bu sistemde mevcut yapısal elemanlarından yararlanılarak kontrol sisteminin maliyeti minimize edilir.



Şekil 7. Aktif Destek Sistemi

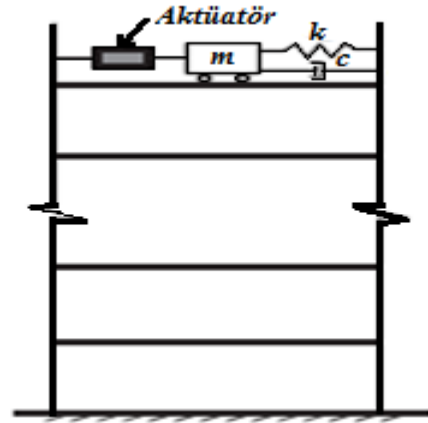
3.3. Darbe Harekete Geçirici

Bir darbe üretme sistemi, hidrolik aktüatör yerine bir darbe üretici kullanır. Darbe üreticileri, aktif bir kontrol kuvveti üretmek için pnömatis mekanizmalar kullanır. Bu mekanizmalar bir darbe tipi çalıştırma kuvveti oluşturmak için basınçlı hava kullanır, yüksek basınçlı sıvı kullanan hidrolik aktüatörlerden farklıdır. Akıllı bir yapı sisteminin çeşitli konumlara darbe yapısı yerleştirilebilir. Bu konumlardan herhangi birinde büyük bir bağıl hız tespit edildiğinde, bu konumda pnömatis aktüatör tetiklenir ve yapıya hız uygulanır. Miller ve arkadaşları altı katlı çelik bir çerçevenin en üst katına darbe üretici yerleştirerek sarma tablasında darbe üreticisiyle testler yaptılar [9] ve test sonuçları darbe üreticilerinin sismik tepki kontrolü için umut verici bir cihaz olduğunu göstermişlerdir.

Bu sistemin dezavantajları sistemi: darbe üreticileri tarafından kullanılan sıkıştırılmış gaz enerjisi ucuz olsa da, tam ölçekli binaları stabilize edecek kadar güçlü olmayabilir ve darbe üretme sistemleri kuvvet olarak yüksek doğrusal olmayan yapıya sahip olmalarıdır.

3.4. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemleri

Pasif ayarlı kütle sönümleyici sistemi yapının birinci mod frekansına ayarlandığından dolayı sadece birinci modun hakim olduğu titreşim frekansında etkilidir. Deprem gibi dinamik yüklemeler daha geniş frekans aralığına sahip olduğundan pasif ayarlı kütle sönümleyicilerin eksikleri giderilerek aktif ayarlı kütle sistemleri geliştirilmiştir. Aktif ayarlı kütle sönümleyiciler dinamik yüklerin çok sayıda frekans bandı için projelendirilebilir.



Şekil 8. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici Yerleştirilmiş Yapı

Aktif ayarlı kütle sönümleyici çalışma prensibi geri beslemeli kontrol sistemi ile çalışır. Geri beslemeli kontrol gerçek zamanlı izleme ile yapılır. Çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümünde durum uzay denklemleri kullanılır.

$$M_s \ddot{X}_s + C_s \dot{X}_s + K_s X_s = b_s u + e_s \ddot{x}_g \quad (2)$$

$$u = -\hat{G}_d \dot{X}_s - \hat{G}_v \ddot{X}_s - G_a \ddot{X}_s \quad (3)$$

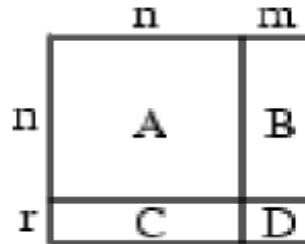
$$Z = \begin{Bmatrix} X_s \\ \dot{X}_s \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\ddot{X}_s = -M_s^{-1} C_s \dot{X}_s - M_s^{-1} K_s X_s + M_s^{-1} b_s u + M_s^{-1} e_s \ddot{x}_g \quad (5)$$

$$\dot{Z} = AZ + Bu + Ew \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ M_s^{-1} K_s & M_s^{-1} C_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} b_s \end{bmatrix} \quad E = \begin{Bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} e_s \end{Bmatrix} \quad w = \ddot{x}_g \quad (8)$$



Şekil 9. Durum Uzay Gösterimi

Burada A (2nx2n) boyutlu kütle, rijitlik ve sönüm katsayılarından oluşan sistem matrisidir. B (2n x m) boyutunda kontrol kuvveti yer matrisi ve E (2n x r) boyutunda dış kuvvet matrisidir. Aktif kontrol sisteminde, kontrol kuvvetinin aktive olabilmesi için gerekli enerji miktarının büyük olması enerji kaynağı sorununu oluşturur. Büyük aktif kontrol sistemlerinin kullanılması ve enerji kaynağının yerleştirilmesi ve bakımı maliyet sorununu oluşturur.

Farklı yapısal güvenlik seviyeleri için aktif kontrol sistemlerinin kullanımı etkili enerji dağıtım sistemlerinin uygulanması için büyük enerji kaynağına ihtiyaç vardır (Enerji kaynağı sorunu). Bu sistemler yapı kullanımına göre kontrol sistemi ve enerji kaynağının yapıya yerleştirilmesi ve sistemin istikrarlı çalışabilmesi için bakımı kaçınılmazdır (Maliyet sorunu). ATMD sayesinde yapısal güvenlik, insanların yaşam konforu ve yapıda önceden belirlenmiş noktada izin verilen sınır değerler sağlanabilir. Ancak ATMD kontrol kullanmasında maliyetin önemli bir kısıtlama olduğu görülmektedir. Bu yüzden klasik en uygun kontrol algoritmasında belirli performans indeksi tanımlanır. Performans indeksi J yapıyı ifade eden Z(t) ve yapıya uygulanması gereken kontrol kuvveti U(t) ye bağlıdır.

$$J = \int_0^t [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (9)$$

Yapısal kontrol için performans indeksi ikinci derecedir. Denklemde T ifadesi matrisin transpoze edilmesini, Q (2nx2n) boyutlu pozitif yarı tanımlı matris olup güvenliği, R (m x m) pozitif tanımlı matris olup maliyeti ifade eder. R ve Q birbiri ile ters orantılı olarak çalışır. Bu yüzden aynı anda minimize edilemez. Optimal kontrol kazancı:

$$u(t) = -G(t)Z(t) \quad (10)$$

$$G(t) = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T P(t) \quad (11)$$

$$u(t) = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T P(t)Z(t) \quad (12)$$

Burada G(t) kontrol kazancı matrisidir. Geri besleme kazancı matrisi pozitif tanımlıdır, kapalı döngü sistemi kararlı ve asimptotiktir. Ricatti matrisi olarak bilinen P simetrik matrisi aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$\dot{P}(t) + P(t)A - \frac{1}{2}PBR^{-1}B^T P(t) + A^T P(t) + 2Q = 0 \quad (13)$$

Ricatti matrisi büyük ölçüde yapısal özelliklere ve ağırlık matrislerine bağlıdır. Ricatti matris P'nin deprem süresince sabit olduğu önerilir[6]. Kontrol sistemi, Ricatti matrisinin sabit bir matris olduğu varsayılır; dolayısıyla denklem (12)'nin ilk terimi, P't'nin deprem süresinden daha uzun olması koşulu ile sıfır alınabilir [6]. Bu sayede matrisin basitleştirilmesine yol açıp cebirsel denklemler için daha az hesaplama süresi harcanacaktır.

Deplasmanları bulmak için denklem (6) da u(t) denklemi yerine konulduğunda aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{Z}(t) = (A + BG)Z(t) + Ew \quad (14)$$

4. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 Yapı Tasarımı

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de(TBDY-2018) yapı tasarımında uygulanması gereken temel ilkeler: taşıyıcı sistemin sadeliği ve basitliği, düzenli ve simetrik olarak düzenlenmesi, yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olmasının yanı sıra taşıyıcı sistemin yeterli süneklikte tasarlanması vurgulanmaktadır.

TBDY-2018'e göre: sismik hareketler, yapı modelleme ve yapısal elemanlarının davranışlarındaki belirsizlikler yanı sıra analiz ve tasarım metodlarındaki yaklaşımlar sebebi ile yapının deprem davranışının öngörülebilir olmasını sağlamak için taşıyıcı sistemin olabildiğince sade ve basit olması, deprem etkisi altında yapı tasarımının esas kuralıdır [16]. Depreme karşı davranışlarındaki olumsuzluklar nedeni ile tasarımından ve yapımından kaçınılması gereken yapılara düzensiz binalar denir. Aşağıda TBDY-2018'e göre yapılarda bulunan düzensizlik türleri ve sınır durumları verilmiştir.

4.1. Deprem Yönetmeliğine Göre Yapılardaki Düzensizlik Türleri

TBDY-2018'de belirtilen deprem etkisi altındaki düzensiz binalar türleri planda ve düşeyde olarak iki türdür. Aşağıdaki tablo 1'de planda düzensizlik durumları verilmiştir.

Tablo1. Planda Düzensizlik Durumları

A-Planda Düzensizlik Durumları

- A1 -Burulma Düzensizliği
- A2-Döşeme Süreksizlikleri
- A3-Planda Çıkıntılar Bulunması

B-Düşeyde Düzensizlik Durumları

- B1-Komşu Katlar Arası Dayanım Düzensizliği (Zayıf Kat)
- B1-Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat)
- B3-Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği

4.1.1. Burulma Düzensizliği (A1)

A1 tipi düzensizlik, birbirine dik iki doğrultudaki depremden herhangi biri için, bir kattaki maksimum görelî yer değiştirmenin ortalama görelî yer değiştirmeye oranı olarak hesaplanan bir burulma düzensizliği katsayısına bağlı olarak tanımlanmaktadır.

$$(\Delta_i)_{ort} = \frac{1}{2} [(\Delta_i)_{max} + (\Delta_i)_{min}] \quad (15)$$

$$\eta_{bi} = (\Delta_i^{(x)})_{max} / (\Delta_i^{(x)})_{ort} > 1.2 \quad (16)$$

Kendi düzlemleri içerisinde döşemelerin rijit diyafram olarak çalışması durumunda kullanılacak formül yukarıda verilmiştir. $(\Delta_i^{(x)})_{max}$ binanın i'nci katındaki maksimum azaltılmış görelî kat ötelemesi, $(\Delta_i)_{min}$ binanın i'nci katındaki minimum azaltılmış görelî kat ötelemesi, $(\Delta_i^{(x)})_{ort}$ binanın i'nci katındaki ortalama azaltılmış görelî en düzensizliği katsayısıdır.

4.1.2. Döşeme Süreksizlikleri (A2)

Kat seviyesindeki boşluk alanlarının toplamının brüt döşeme toplam alanının 1/3'ünü geçmesi, deprem yüklerinin aktarımını engelleyecek lokal döşeme boşluklarının olması ve kat seviyesindeki döşemelerde düzlem içi rijitlik ve dayanımlarında azalmaların bulunması döşeme süreksizlikleri durumlarıdır.

4.1.3. Planda Çıkıntılar Bulunması (A3)

Yapı kat planlarında çıkıntı olan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinin de, yapının o katının aynı doğrultulardaki toplam plan boyutlarının %20'sinden daha büyük olması durumu [16].

4.1.4. Komşu Katlar Arası Dayanım Düzensizliği (Zayıf Kat)(B1)

Geçmiş depremlerde dolgu duvarların zemin katlarda üst katlara göre az veya hiç bulunmayan yapılar da büyük hasarlar meydana gelmiştir. Zemin katlarda yapının düşey rijitliğinin az olması yatay deplasmanlara karşı direncinin az olmasına sebep olur. Düşey yönde rijitlik süreksizliği bulunan katlar zayıf kat olarak tanımlanır. Geniş alanlar sağlamak amacıyla ticari amaçlı kullanılan mekanlarda dolgu duvar örülmeyen veya yüksek yapılar da zemin katın kat yüksekliğinin göreceli olarak fazla olması durumlarında yapıların deprem gibi dinamik yükler altında hasar almasına sebep olur.

Betonarme yapılar da Dayanım Düzensizliği, herhangi bir birbirine dik iki deprem doğrultusunun, herhangi bir kat için toplam etkili kesme alanının, bir üst kattaki toplam etkili kesme alanına oranı 0.80'den küçük olması durumudur.

$$\eta_{ci} = (\sum A_e)_i / (\sum A_e)_{i+1} < 0.80 \quad (17)$$

Herhangi bir kattaki etkili kesme alanı tanımı :

$$(\sum A_e)_i = (\sum A_w)_i + (\sum A_g)_i + (0.15 \sum A_k)_i \quad (18)$$

Denklem (17-18)'de yer alan ; η_{ci} Dayanım Düzensizliği Katsayısı , $\sum A_e$ herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusundaki etkili olan kesme alanı, $\sum A_g$ herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusuna paralel doğrultuda perde olarak çalışan taşıyıcı sistem elemanlarının alanlarının toplamı, $\sum A_k$ herhangi bir katta, gözönüne alınan deprem doğrultusuna paralel kâgir dolgu duvar alanlarının (kapı ve pencere boşlukları hariç) toplamı, $\sum A_w$ herhangi bir katta, kolon en kesiti etkin gövde alanlarının toplamını ifade etmektedir [16].

4.1.5. Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat)(B2)

Rijitlik Düzensizliği, bodrum katlar hariç, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir i'nci kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranının 2.0'i aşması durumudur.

$$\eta_{ki} = (\Delta_i^{(x)} / h_i)_{ort} / (\Delta_{i+1}^{(x)} / h_{i+1})_{ort} > 2.0 \quad (19)$$

$$\eta_{ki} = (\Delta_i^{(x)} / h_i)_{ort} / (\Delta_{i-1}^{(x)} / h_{i-1})_{ort} > 2.0 \quad (20)$$

Denklem (19-20)'de $(\Delta_i)_{ort}$ binanın i'nci katındaki ortalama azaltılmış görelî kat ötelenmesi, η_{ki} yumuşak kat düzensizliği katsayısı h_i ise görelî kat yüksekliğidir.

4.1.6. Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği (B3)

Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizlik durumları: kolon veya perde elemanlarının bazı katlarda kaldırılarak guseli kolonların veya kirişlerin üstüne veya ucuna oturtulması, ya da üst kattaki perdelerin altta kolonlara oturtulması durumudur. TBDY-2018 binanın herhangi bir katında konsol kirişlerin veya alttaki

kolonlarda oluşturulan guselerin üstüne veya ucuna oturtulmasına hiçbir zaman izin verilmez.

4.2. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 Açısından Yapısal Kontrol Gerekliliği

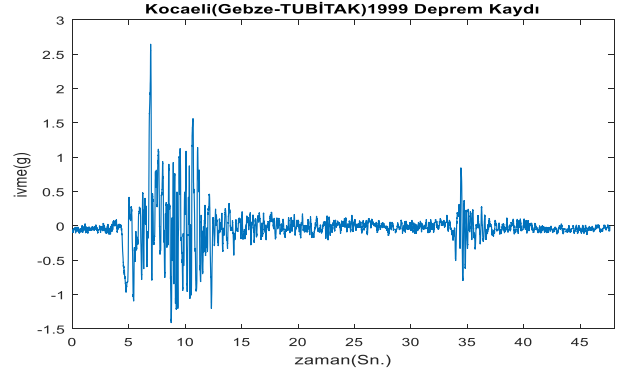
Geçmişteki depremlere bakıldığında tasarım ve yapım aşamasından kaynaklanan kusurlar sebebiyle yapılar ciddi hasarlar almışlardır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre düzensiz binalar ile ilgili yapının hem düşeyde hem yatayda sınır koşullar ile yapının dinamik yükler altında taşıyıcı sisteminin kararlı bir davranış göstermesi amaçlanmıştır. Zayıf kat düzensizliği sınırlaması ile yapının kolon ve perde gibi taşıyıcı elemanların yeterli kesitte tasarlanmasını, yumuşak kat ve burulma düzensizliği sınırlaması ile yapının ötelenme oranlarını kontrol altına almayı amaçlamıştır. TBDY-2018'in yapı için belirlediği limit durumları aşmamak ve yapı dinamik karakterini geliştirmek amacıyla hem mevcut hem de yeni yapılacak binalara yapısal kontrol sistemleri uygulanabilir.

Düzensiz yapıların karmaşık yanıtlarını, uygun kontrol tasarımıyla önemli ölçüde azaltılabilir. Yang ve Huang asimetrik plana sahip ve burulma davranışı gösteren düzensiz yapı sistemlerinin sismik izolasyonla iyileştirilmiştir [17]. Goel asimetrik yapıya ilave edilen damperlerin yapı deformasyonlarına etkilerini araştırmıştır [8]. Jangid ve Datta Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyiciler ile yapının burulma davranışını incelemişlerdir [18]. Lin ve Chopra tek katlı asimetrik yapıda ilave viskoz sönümleyici etkilerini araştırmışlardır [14].

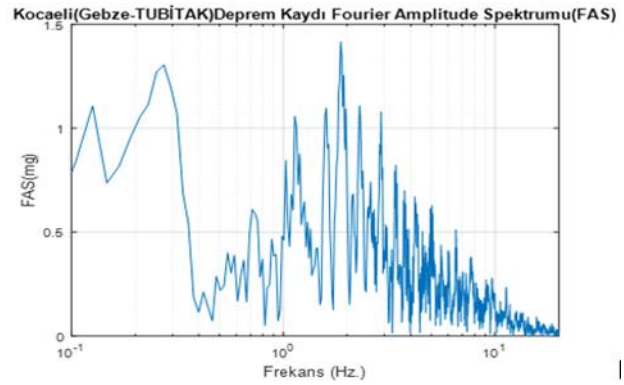
5. Sayısal Çalışma

Yapı kontrol algoritmasının etkinliği 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi'nin Gebze-TUBİTAK izleme istasyonu kayıtları kullanılarak belirlenmiştir. Bina türü konutların deprem sonrası gözlenen hasar dağılımları incelendiğinde, ülkemizde sıklıkla yaşadığımız depremlerin ortak karakteristiği olarak yanal atım fay mekanizmasının tetiklediği bir deprem olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin Gebze istasyon kaydı şekil 10' da gözlenen frekans içeriğiyle seçilmiştir. Çalışma depremi Kocaeli Gebze kaydı kaynak mekanizmasının, kırılım, yayılım, yönelim etkilerinin izlendiği frekansları yeterli genlik büyüklükleriyle barındırmaktadır [23, 24]. Öte yandan, şehirlerimizde genelde hâkim olan 6 - 8 katlı betonarme binaların sahip oldukları hâkim frekans bandı (0.5 sn. (2.0 Hz.) – 0.8 sn. (1.25 Hz.) band aralığı Şekil 10(b) 'de gözlenen genlik-frekans içerikleriyle yapı davranışına dikkat çeken mertebelerde etki verdiği önceki çalışmalardan bilinmektedir [23, 24, 25]. Bu çalışmada amaçlanan değişik kontrol benzeşim çalışmalarının

performansları gerçek sına şartlarında test edilmiş olacaktır. Yapı parametreleri ve hem pasif hem de aktif kontrol için yapıya yerleştirilen ayarlı kütle sönümleyici parametreleri tablo 2'de verilmiştir. Simülasyon çalışmaları makro kodlarla Matlab [13] programında yazılarak yürütülmüş ve sonuçları aşağıda tartışılmıştır.



a)



b)

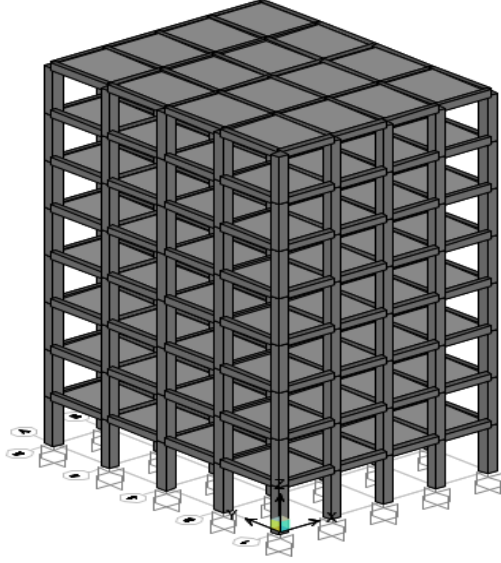
Şekil 10. a)Kocaeli (Gebze-TUBİTAK) 1999 Deprem Kaydı b) Fourier Amplitude Spektrumu (FAS)

$$M = \begin{bmatrix} m1 & & & 0 \\ & m2 & & \\ & & m3 & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & mn \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$K = \begin{bmatrix} k1 + k2 & -k2 & & & 0 \\ -k2 & k2 + k3 & -k3 & & \\ & -k3 & k3 + k4 & \ddots & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & -kn \\ & & & & -kn & kn \end{bmatrix} \quad (22)$$

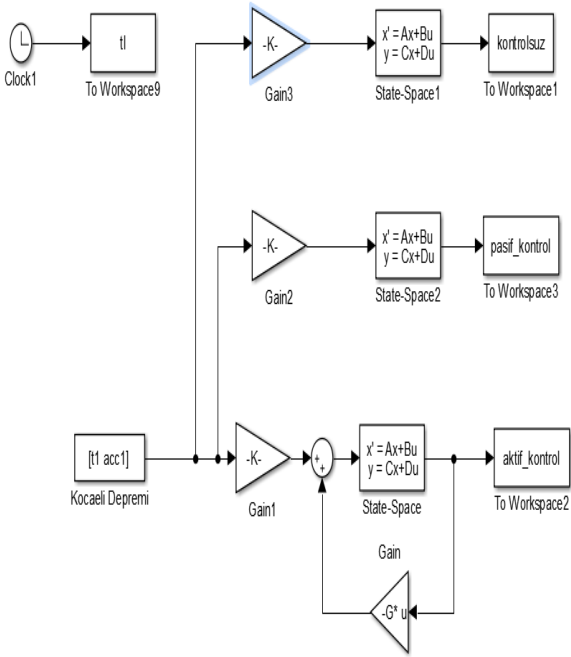
$$C = \begin{bmatrix} c1 + c2 & -c2 & & & 0 \\ -c2 & c2 + c3 & -c3 & & \\ & -c3 & c3 + c4 & \ddots & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & -cn \\ & & & & -cn & cn \end{bmatrix} \quad (23)$$

M, C, K sırasıyla n serbestlik dereceli yapının kütle, rijitlik ve sönüm matrislerini ifade etmektedir.



Şekil 11. 8 Katlı Yapının Sonlu Eleman Modeli (SEM)

R ağırlık matrisinin köşegen elemanları 10^{-4} ve diğer elemanlar sıfır olarak seçilmiştir. $Q=[1 \ 1 \ 0 \ 0]$ olarak diyagonal oluşturulmuştur. Q matrisine değeri 10^3 seçilen bir çarpım katsayısı uygulanmıştır. Şekil 11’de Matlab-Simulink ortamında 8 katlı yapının kontrolü için kullanılan model yer almaktadır. Yapının kontrolsüz, pasif ve aktif kontrollü durumları makro kodlar kullanarak simülasyon yürütülmüştür.



Şekil 12. Matlab-Simulink Ortamında 8 Katlı Yapının Durum-Uzay(State-Space) Modeli

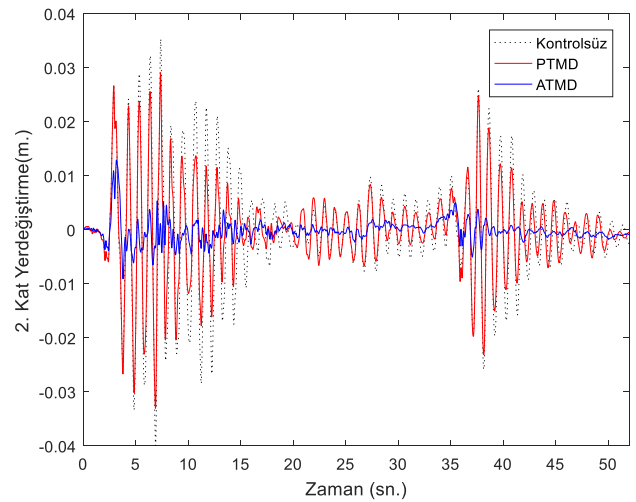
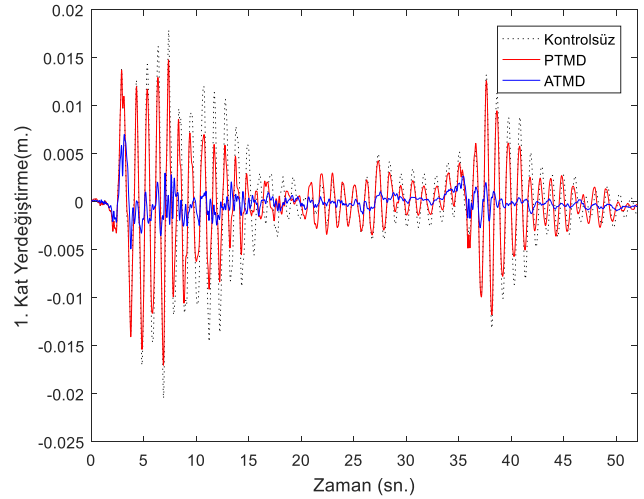
Tablo 2. a) Yapı Parametreleri; b) Ayarlı Kütle Sönümleyici Parametreleri

(a)

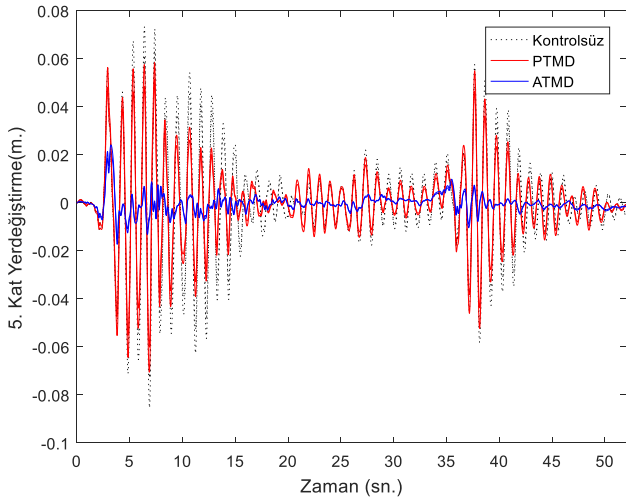
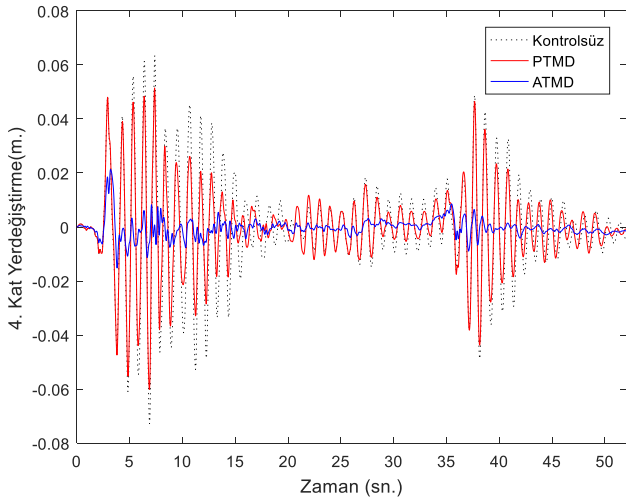
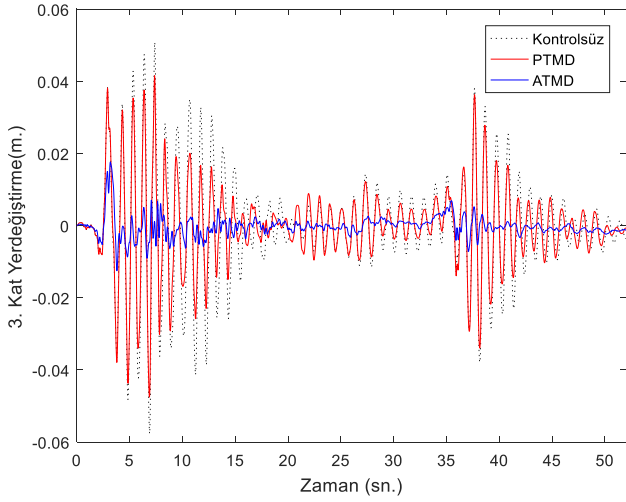
	Kütle(kg)	Rijitlik(kN/m)	Sönüm(kN.s/m)
1. Kat	340000	390500	29400
2. Kat	340000	390500	29400
3. Kat	340000	390500	29400
4. Kat	340000	390500	29400
5. Kat	340000	390500	29400
6. Kat	340000	390500	29400
7. Kat	340000	390500	29400
8. Kat	340000	390500	29400

(b)

	md(ton)	kd(kN/m)	cd(ton.s/m)
PTMD/ATMD	45	980	80

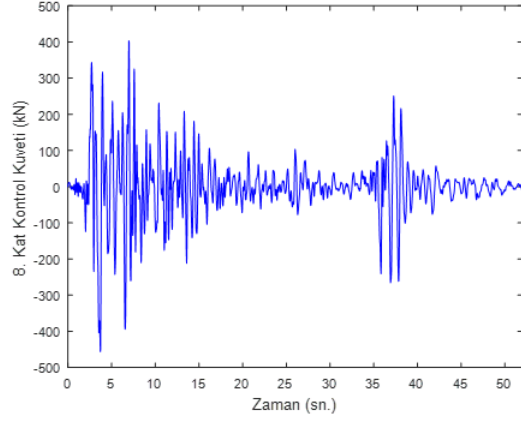


Şekil 13. Deprem etkisi altında kontrolsüz, PTM, ATMD 1. ve 2. kat yer değiştirme grafiği

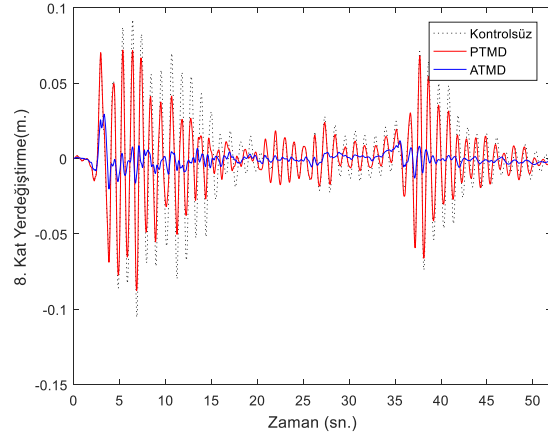
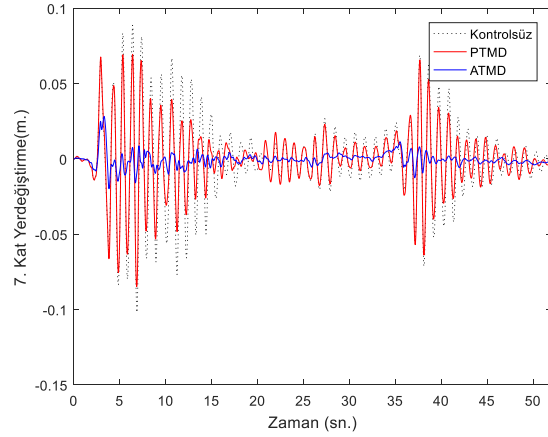
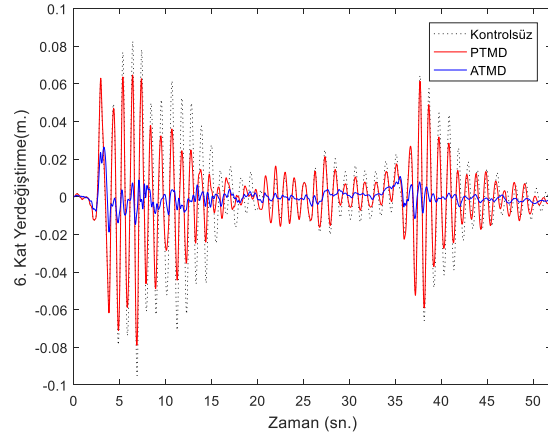


Şekil 14. Deprem etkisi altında kontrolsüz, PTM, ATMD 3. ,4. ve 5. kat yer değıştirme grafiği

Şekil 15'de Aktif kontrol esnasında yapıya gelen deprem kuvvetine karşılık yapı tepkisini azaltacak geri beslemeli kontrol kuvveti grafiği yer almaktadır.

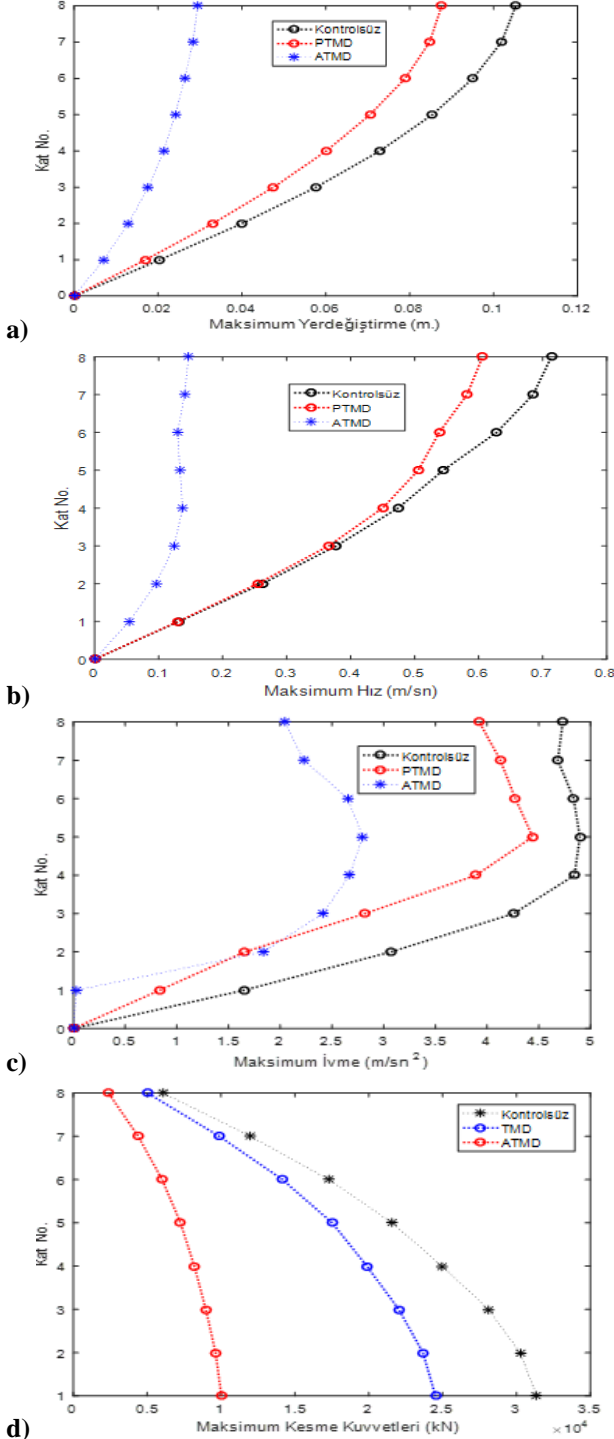


Şekil 15. 8. Kat kontrol kuvvetleri



Şekil 16. Deprem etkisi altında kontrolsüz, PTM, ATMD 6. ,7. ve 8. kat yer değıştirme grafiği

Şekil 13,14,16' da Kocaeli-1999 (Gebze-TUBİTAK) deprem kaydı altında yapının kat seviyelerinin yer değiştirme zaman grafikleri yer almaktadır. Ayarlı kütle sönümleyicinin yapı kat etkilerini nasıl etkilediği en iyi en üst kat tepkileri incelendiğinde anlaşılır. En üst kat seviyesinde yapı PTMD'la kontrol edildiği durumdayken en üst katın yer değiştirme tepkilerinde %21 azalma varken, ATMD'la kontrol edildiği durumda bu azalma %70' tir.



Şekil 17. a) Kat Seviyesi Maksimum Yer değiştirme; b) Kat Seviyesi Maksimum Hız; c) Kat Seviyesi Maksimum İvme; d) Kat Seviyesi Maksimum Kesme Kuvveti.

Şekil 17' de kontrolsüz, pasif ve aktif kontrollü yapının kat seviyelerindeki maksimum yer değiştirme, hız, ivme ve kesme kuvveti değerleri verilmiştir. Aktif kontrollü durumda pasif kontrollü duruma göre yapının kat seviyesi maksimum tepkilerini azaltmada daha etkili olduğu görülmektedir.

Tablo.3 TBDY 2018'e Göre Yapı Düzensizlikleri ve Görelî Kat Ötelemesi Kontrol Sonuçları

	B2 Düzensizliği	Görelî Kat Ötelemesi
Kontrolsüz	2.ve 8. Kat	5.,6.,7. ve 8. Kat
Pasif Kontrol	8. Kat	7. ve 8. Kat
Aktif Kontrol	X	X

Tablo 3'te Yapıdaki düzensizliği ve görelî kat ötelenmelerinin giderilmesinde aktif kontrolün daha etkili olmuştur.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada 8 katlı bir yapının dinamik yükler altında pasif ve aktif kontrol sistemleri kullanılarak yapının davranışları araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Yapı kontrolü için binanın en üst katına ayarlı kütle sönümleyici yerleştirilmiştir. Kocaeli-1999 (Gebze-TUBİTAK) deprem kaydı altında yapı davranış simülasyon çalışmalarında, yapıda aktif kontrolün pasif kontrole göre kat tepkilerinde önemli ölçüde azalma ve yapı düzensizliklerinin giderilmesinde de daha etkili olduğu gözlenmiştir. Q matrisinde büyük değerler seçilmesi durumunda veya R matrisine küçük değerler seçilmesi durumunda maliyetin artmasına sebep olabilir. Kontrolün optimum olması açısından Q ve R ağırlık matrislerinin seçimi konusunda günümüzde çalışmalar sürmektedir. Yapı kontrol sistemleri, hem yeni yapılacak yapılarda hem de mevcut yapıların veya hasarlı yapıların güçlendirilmeleri için de kullanılabilir.

Kaynaklar

- [1] Ormondroyd, J., and Den Hartog, J. P., (1928), "The theory of dynamic vibration absorber," Trans. ASME APM-50-7, pp. 9-22.
- [2] Hancock Tower now to get dampers," (1975), Engineering News Record, Oct. 30, p. 11.
- [3] "Tuned mass dampers steady sway of sky scrapers in wind," (1977), Engineering News Record, Aug. 18, p. 28-29.
- [4] Webster A. C. and Vaicaitis R., (1992), "Application of tuned mass dampers to control vibrations of composite floor systems," Engineering 1., AISC, pp. 116-124.

- [5] Yao, J.T.P., Concept of structural control. J. of Struct. Div., ASCE, 98(ST7), pp. 1567-1 574, 1972.
- [6] Yang, J. N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P. (1987) New optimal control algorithms for structural control. Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 113, No. 9, pp. 1369-1386.
- [7] Soong, T. T. (1990) Active Structural Control: Theory and Practice, 2nd edn., John Wiley.
- [8] Goel, R. K. (1998). Effect supplementing viscous damping on seismic response of asymmetric-plan systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 27: 125-141.
- [9] Miller, R.K. et al., Active vibration control of large civil structures, ASCE Journal of Engineering Mechanics, 114, 1542, 1988.
- [10] Bauer, H.F., Oscillations of invincible liquids in a rectangular container: a new damper for excited structures, Journal of Sound and Vibration, 93, 117, 1984.
- [11] Pall, A.S. and Marsh, C., Response of friction damped braced frames, ASCE Journal of Structural Division, 108, 1313, 1982.
- [12] Pall, A. et al., Friction dampers for seismic control of Canadian Space Agency headquarters, Earthquake Spectra, 9, 547, 1993.
- [13] Matlab Release 2016a of MathWorks Inc., USA, 2016.
- [14] Lin, W. H., and Chopra, A. K. (2003a). Asymmetric one-story elastic system with non-linear viscous and viscoelastic dampers: earthquake response. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 32: 555-577.
- [15] Frahm, H. (1911). Device for damping of bodies, U.S. Patent, No. 989958.
- [16] TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- [17] Yang, Y.B. and Huang, W.H., "Equipment Structure Interaction Considering the Effect of Torsion and Base Isolation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Cilt 27, 155-171, 1998.
- [18] Jangid, R. S. and Datta, T. K. (1997). Performance of multiple tuned mass dampers for torsionally coupled system. Earthquake Engineering and Structural Dynamics (USA). 26, 307-317.
- [19] Fallah, A.Y., and Taghikhany, T. (2013). "Time-Delayed Decentralized H2/LQG Controller for Cable-Stayed Bridge Under Seismic Loading." Structural Control and Health Monitoring, 20(3), 354-372.
- [20] Li, Z., and Adeli, H. (2016). "New Discrete-time Robust H2/H ∞ Algorithm for Vibration Control of Smart Structures using Linear Matrix Inequalities." Engineering Applications of Artificial Intelligence, 55: 47-57.
- [21] Jiang, X., and Adeli, H. (2008a). "Dynamic Fuzzy Wavelet Neuroemulator for Nonlinear Control of Irregular High Rise Building Structures." International Journal for Numerical Methods in Engineering, 74 (7): 1045-66.
- [22] Pujol, G., Acho, L., Pozo, F., Rodríguez, A. & Vidal, Y. 2011. A velocity based active vibration control of hysteretic systems. Mechanical Systems and Signal Processing, 25, 465-474.
- [23] Beyen, K., 2019. Hanging Wall and Footwall Effects in the Largest Reverse-Slip Earthquake of Turkey, October 23, 2011, M W 7.2 Van Earthquake. Arabian Journal for Science and Engineering, 44, 4757-4781.
- [24] Beyen, K., Erdik, M., 2004. Two Dimensional Nonlinear Site Response Analysis of Adapazari Plain and Predictions Inferred From Aftershocks of The Kocaeli Earthquake, 17 August 1999, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24 (2004) 261-279.
- [25] Beyen, K., Tanırca, G., 2015. Strong ground motion characteristics of the 2011 Van Earthquake of Turkey: Implications of seismological aspects on engineering parameters. Earthquakes and Structures, 8(6), 1363-1386.