

# Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Optimum Ayarlanması

[Optimal Tuning of Mass Dampers]

Editörler  
Gebrail BEKDAŞ  
Sinan Melih NİGDELİ



[iuc-universitypress.org](http://iuc-universitypress.org)

**IUC**  
UNIVERSITY  
PRESS

# Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Optimum Ayarlanması

Bu kitap, Cumhuriyetimizin kuruluşunun 100. yılı anısına “*Cumhuriyetin 100. Yılına 100 Kitap*” projesi kapsamında İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa tarafından yayımlanmıştır.

Editörler  
Gebrail Bekdaş  
Sinan Melih Nigdeli


Aralık 2023



İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
CERRAHPAŞA

IUC  
UNIVERSITY  
PRESS

## Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Optimum Ayarlanması

**Editör:** Gebrail Bekdaş 

**Kurum:** İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

**E-posta:** bekdas@iuc.edu.tr

**Editör:** Sinan Melih Niğdeli 

**Kurum:** İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

**E-posta:** melihni@iuc.edu.tr

Yayıncı

**IUC**  
UNIVERSITY  
PRESS

**Adres:** Üniversite Mahallesi, 34320 İstanbul/Türkiye

**E-posta:** iucpress@iuc.edu.tr

**E-ISBN:** 978-605-7880-38-3

**DOI:** 10.5152/3000

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yayınevi Seri No: 23

Yayıncılık Hizmetleri






© 2023. Telif hakkı yazarlara aittir. Bu kitaptaki bölümler açık erişimli olup Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası Lisansı altında dağıtılmaktadır. Bu lisans kullanıcılara, bölümleri herhangi bir amaç için indirme, çoğaltma ve yayımlanan bölümler üzerinde çalışma imkânı sunar. Böylece yayınlarımızın en geniş şekilde yayılmasını ve daha geniş bir etkiye sahip olmasını sağlar.

### Sorumluluk Reddi


Kitapta yayımlanan metinlerin/bölümlerin ifadeleri veya görüşleri yazar(lar)ın ve editör(ler)in görüşlerini yansıtır. İÜC Yayınevi ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa yazarların içeriğinden sorumlu değildir. Yayımlanan kitaplardaki çalışmaların doğru ve iyi araştırılmış olması ve metinlerde ifade edilen görüşlerin tutarlılığı yazar ve editörlerin sorumluluğundadır. İÜC Yayınevi ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, yazarlara çalışmalarını bilimsel toplulukla paylaşmak için bir platform sağlamaktadır.

Atıf için: Bekdaş, G., & Niğdeli, S. M. (Ed.). (2023). *Ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum ayarlanması*. İstanbul: İÜC Yayınevi.


## YAZARLAR

**Ayla Ocak** 

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı,  
İstanbul, Türkiye*

**Aylin Ece Kayabekir** 


*İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, İstanbul, Türkiye*

**Gebrail Bekdaş** 


*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı,  
İstanbul, Türkiye*

**Mehmet Berat Bilgin** 

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı,  
İstanbul, Türkiye*

**Melda Yücel** 

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı,  
İstanbul, Türkiye*

**Oğuz Uzdil** 

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı,  
İstanbul, Türkiye*

**Serdar Ulusoy** 

*Türk- Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat  
Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

**Sinan Melih Nigdeli** 

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı,  
İstanbul, Türkiye*

# İÇİNDEKİLER

REKTÖRÜN ÖN SÖZÜ .....V

ÖN SÖZ ..... VI

GİRİŞ..... VII

## BÖLÜM 1: PASİF KONTROL SİSTEMLERİ

*Ayla Ocak, Sinan Melih Nigdeli, Gebrail Bekdaş*

1. Giriş..... 1
- 1.1 Metalik Sönümleyici ..... 1
- 1.2 Sürtünme Tipi Sönümleyici..... 2
- 1.3 Visko-elastik Sönümleyici ..... 2
- 1.4 Viskoz Sönümleyici ..... 4
- 1.5 Ayarlı Kütle Sönümleyici ..... 4
- 1.6 Ayarlı Sıvı Sönümleyici ..... 6

## BÖLÜM 2: AKTİF KONTROL SİSTEMLERİ

*Serdar Ulusoy, Gebrail Bekdaş, Sinan Melih Nigdeli*

1. Aktif Kontrol Sistemleri..... 9
2. Literatür Araştırması ..... 11
- 2.1. Aktif Tendon Sistemleri ..... 11
- 2.2. Aktif Kütle Sönümleyici ..... 11
3. Yöntem ..... 12
4. Başarım Sonuçları..... 12

## BÖLÜM 3: MEKANİK SİSTEMLERİN HAREKET DENKLEMLERİ

*Mehmet Berat Bilgin, Sinan Melih Nigdeli, Gebrail Bekdaş*

1. Hareket Denklemleri..... 14
2. Yorumlar ..... 18

## BÖLÜM 4: AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMİZASYONU

*Oğuz Uzdil, Gebrail Bekdaş, Sinan Melih Nigdeli*

1. Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimizasyonu ..... 20
2. Sayısal Örnek..... 22

## Bölüm 5: ÇOK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLER İÇİN AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİNİN OPTİMİZASYONU

*Oğuz Uzdil, Sinan Melih Nigdeli, Gebrail Bekdaş*

1. Optimizasyon Yöntemleri..... 25
2. Kütle Sönümleyicili Yapının Analizleri ..... 27

## Bölüm 6: OPTİMUM KÜTLE SÖNÜMLEYİCİSİ TASARIMI İÇİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI BİR TAHMİN MODELİ

*Melda Yücel, Gebrail Bekdaş ve Sinan Melih Nigdeli*

1. Optimizasyon Yöntemi: Çiçek Tozlaşma Algoritması..... 32
2. Optimizasyonun Amacı ..... 33
3. Yapay Sinir Ağları (YSA)..... 33
4. Optimum TMD Tasarımı İçin YSA Modeli ..... 34
5. Sayısal Örnekler ..... 34
6. Sonuçlar ..... 35

## Bölüm 7: AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMİZASYONU

*Ayla Ocak, Sinan Melih Nigdeli, Gebrail Bekdaş*

1. Ayarlı Sıvı Sönümleyicilerin Optimum Tasarımı ..... 39

## BÖLÜM 8: AKTİF AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMİZASYONU

*Aylin Ece Kayabekir, Gebrail Bekdaş, Sinan Melih Nigdeli*

1. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyicili Yapıların Analizi ..... 46
2. Optimizasyon Metodu ..... 48
3. Sayısal Örnek..... 49

## REKTÖRÜN ÖN SÖZÜ

Türk milletinin bağımsızlık mücadelesi, 29 Ekim 1923'te Cumhuriyetin ilanı ile taçlanmıştır. Dünya tarihine altın harflerle kazınan büyük bir mücadele sonucu elde edilen şanlı zafer, Türk milletinin hür ve bağımsız yaşama kararlılığı ile çıktığı yolda; inanç, cesaret, güven ve sınırsız fedakârlıkla gösterdiği eşsiz kahramanlıkların eseridir. Egemenliğin kayıtsız şartsız millete teslim edildiği Türkiye Cumhuriyeti, Millî Mücadele'mizin önderi Gazi Mustafa Kemal Atatürk'ün milletimize en büyük armağanıdır.

Cumhuriyetin kazanımlarını koruma ve milletimizin muasır medeniyetler seviyesine ulaşma hedefinde, eğitim ve bilim her zaman en büyük rehberdir. Bu hedeflerin gerçekleştirilmesinde ise en büyük sorumluluk kuşkusuz üniversitelere düşmektedir.

Ülkemizin köklü ve öncü üniversiteleri arasında yer alan İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa; bilimsel yaklaşımı benimseyen, bilgi üreten ve uygulamalarıyla toplumun gelişmesine katkıda bulunmayı ilke edinen bir araştırma üniversitesidir. Cumhuriyet değerlerine bağlı bir yükseköğretim kurumu olarak Cumhuriyetimizin 100. yılına ithafen akademisyenlerimizin iş birliğiyle "*Cumhuriyetin 100. Yılına 100 Kitap*" projesini hayata geçiriyoruz. Proje kapsamında, akademisyenlerimizin kendi uzmanlık alanlarıyla ilgili kaleme aldıkları ve İÜC Yayınevi tarafından basılan kitaplar, açık erişimle tüm toplumun faydasına sunulmaktadır. Sağlıktan mühendisliğe, sosyal bilimlerden eğitime kadar pek çok alanda hazırlanan 100 kitap; eğitim-öğretim materyali, ders kitabı olarak kullanılabilen gibi araştırma geliştirme kapsamında yararlanılacak kaynak olarak da kullanılacak nitelikteki kitaplardan oluşmaktadır.

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa olarak köklü geçmişimizden aldığımız güçle Cumhuriyetimizi nice yüzyıllara taşımak için var gücümüzle çalışmaya ve üretmeye devam ediyor, 100. yılını kutladığımız Cumhuriyetin kurulmasında emeği geçen tüm kahramanlara adadığımız "*Cumhuriyetin 100. Yılına 100 Kitap*" projemizi; tüm akademisyenlerin, öğrencilerin ve araştırmacıların kullanımına sunuyoruz.

**Prof. Dr. Nuri AYDIN**  
Rektör  
29 Ekim 2023

## ÖN SÖZ

Ayarlı kütle sönümleyicileri her türlü mekanik sistemde kullanılan ve sistemde rahatsız edici olarak meydana gelen titreşimlerin sönümlenmesinde fayda sağlayan bir sistemdir. Rüzgar ve deprem etkileri altında özellikle titreşime hassas olan kule, köprü ve yüksek yapılar için uygulanabilir bir sistemdir. Bu sistemlerin etkinliği ancak yapının özelliklerine göre düzgün bir şekilde ayarlandığında sağlanmaktadır. Bu durum ise sistemin optimum tasarımını önemli hale getirmektedir. Yeni türde kütle sönümleyici sistemlerinin geliştirilmesi ve tasarlanması da bu sistemleri günümüzde depreme karşı dayanıklı yapılar oluşturmak amacıyla önemli kılmaktadır.

Editörü olduğumuz bu kitabın içeriğinde pasif ve aktif yapısal kontrol sistemlerini tanıtıldıktan sonra problemin en genel halini temsil eden hareket denklemleri sunulmuştur. Sonrasında ayarlı kütle sönümleyicilerinin klasik, metasezgisel ve yapay sinir ağları tabanlı optimizasyonu sunulmuştur. Ayarlı sıvı sönümleyicilerin ve aktif ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımları son olarak verilmiştir. Kitabın editörleri olarak bu kitapta yazar olarak katkı sağlayan herkese teşekkürlerimizi sunarız.

Millî mücadele ve egemenlik sonucunda Mustafa Kemal Atatürk'ün kurduğu Cumhuriyetimizin kuruluşunun 100. Yılına taçlandırması amacıyla İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa'da oluşturulan 'Cumhuriyetin 100. Yılına 100 Kitap' projesinde yer almaktan gurur duyar, bu projeye destek sağlayan ve gerçekleşmesine için çabalarını eksik etmeyen herkese teşekkürlerimizi sunarız.

Büyük Önderimiz Gazi Mustafa Kemal Atatürk'ü, aziz şehitlerimizi ve gazilerimizi saygı ve rahmetle anıyoruz.

Saygılarımızla,

**Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ**  
**Prof. Dr. Sinan Melih NİGDELİ**

# GİRİŞ

Ayarlanmış kütle sönümleyiciler çeşitli mekanik sistemlerde uygulama alanı bulur ve sistem içindeki bozucu titreşimlerin azaltılmasında etkilidir. Bu sistem özellikle rüzgar ve deprem gibi etkenlerin neden olduğu titreşimlere karşı hassas olan kule, köprü, yüksek bina gibi yapılarda uygulanabilmektedir. Bu sistemlerin etkinliği, optimum sistem tasarımının önemini vurgulayan, yapının belirli özelliklerine göre ayarlanmış hassas ayarlara dayanır. Yeni kütle sönümleyici sistemlerinin devam eden gelişimi ve tasarımı, bu sistemlerin çağdaş inşaatta, özellikle de depreme dayanıklı yapıların oluşturulmasındaki önemini vurgulamaktadır. Bu kitapta yer alan bölümlerin içeriği aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Yapısal kontrol sistemleri pasif, aktif, yarı aktif ve hibrit sistemler dahil olmak üzere çeşitli biçimlerde gelir. Aktif kontrol sistemlerinde kontrol kuvvetinin üretilmesi, enerjiyle çalışan bir aktüatöre dayanır. Pasif kontrol sistemleri ise harici enerjiye ihtiyaç duymadan mekanik elemanlar ve yapılar içindeki titreşim genliklerini azaltmayı ve titreşimleri sönümlemeyi amaçlamaktadır. İlk bölümde farklı pasif kontrol sistemleri türleri hakkında kısa ayrıntılar verilmektedir.

Pasif kontrol sistemlerinin titreşimleri en aza indirmede yetersiz kaldığı durumlarda veya daha yüksek düzeyde konfor ve kesintisiz bina kullanımına ihtiyaç duyulduğunda aktif bir kontrol sistemi gerekli hale gelebilir. Bu sistemler, harici bir kaynaktan üretilen bir kontrol kuvveti kullanır ve belirli bir kontrol algoritması tarafından belirlenir. İkinci bölümde aktif kontrol sistemlerine kısa bir genel giriş yapılmıştır.

Üçüncü bölüm, bir ve iki serbestlik derecesine sahip sistemler için hareket denklemlerinin kısa bir sunumunu sağlar. Analiz ve tasarım aşamaları, yukarıda bahsedilen sistemlerin yanı sıra idealleştirilmiş kontrollü yapıları da içeren mekanik sistemler ve kontrol sistemlerine ilişkin bir çalışmayı kapsar. Hareket denklemlerinin türetilmesi hem Newton hem de Lagrange yöntemleriyle açıklanmaktadır.

Dördüncü bölüm, ayarlanmış kütle sönümleyicilerin etkili tasarımı için literatürde bulunan ve optimal parametreleri (frekans oranı ve sönüm oranı) öneren denklemleri sunmaktadır. Basit çalışma prensibi ve pratikteki çok sayıda başarılı uygulama, ayarlı kütle damperlerinin yapısal kontrol sistemleri olarak yaygın şekilde benimsenmesine katkıda bulunmuştur.

Beşinci bölümde, çok serbestlik dereceli sistemler için ayarlanmış kütle sönümleyiciye sahip bir yapı içindeki optimum parametrelerin belirlenmesine yönelik prosedür sunulmuştur. Optimizasyon sürecinde Jaya Algoritmasının, Öğretme-Öğrenim Tabanlı Optimizasyonun ve Çiçek Tozlaşması Algoritmasının kullanımını içermektedir.

Bölüm 6'da sunulan çalışma, çiçek tozlaşma algoritmasını (FPA) kullanarak ayarlanmış kütle sönümleyicileri (TMD) optimize ederek yapısal hasarı en aza indirmek için optimizasyon ve makine öğrenimini birleştiriyor. Bu modern sistem, optimizasyon analizlerine hızlı ve etkili bir alternatif sunarak optimum TMD tasarımları için eşdeğer bir analiz yöntemi sunar.



Sıvıyla doldurulmuş tanklar, titreşimleri azaltmak ve sönümlmek için sıvının hareketinin oluşturduğu kuvvetlerden yararlanarak kütle sönümleyici görevi görür. Bu sönümleme sistemlerinin optimum şekilde ayarlanması çok önemlidir. 7. bölüm, eşdeğer doğrusallaştırılmış durumda armoni arama algoritması ve çiçek tozlaşma algoritması kullanılarak sıvı ayarlı sönümleyicilerin optimize edilmesine odaklanmaktadır.

Son bölümde, aktif ayarlı kütle sönümleyicilerin (ATMD) optimal tasarımı sunulmaktadır. PID tipi kontrolör kullanan bir ATMD sistemi, yapısal titreşimleri azaltmak amacıyla yapı üzerine yerleştirilir. Bu bağlamda, hareket denklemi formülasyonu ve kullanılan geliştirilmiş türde harmoni arama yöntemi, optimizasyon süreci için açıklanmıştır.

# **BÖLÜM 1**

## **PASİF KONTROL SİSTEMLERİ**

Ayla OCAK  
Sinan Melih NİGDELİ  
Gebrail BEKDAŞ

# Pasif Kontrol Sistemleri

## Passive Control Systems

### BÖLÜM HAKKINDA

Yapısal kontrol sistemleri pasif, aktif, yarı-aktif veya hibrit (karma) sistemler olabilmektedir. Aktif kontrol sistemi içerisinde enerji ile çalışan bir aktüatör tarafından üretilen kontrol kuvvetine ihtiyaç duyulurken, pasif kontrol sistemleri dış enerji gerektirmeden mekanik elemanlar ile yapıda titreşimlerin genliklerinin azalmasını ve sönümlenmesini sağlarlar. Bu bölümde pasif kontrol sistemlerinin türleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yapısal kontrol, titreşim, pasif kontrol

### ABOUT the CHAPTER

Structural control systems can be passive, active, semi-active or hybrid systems. While the control force produced by an energy-powered actuator is needed in the active control system, passive control systems reduce the amplitude and dampen the vibrations in the mechanical elements and the structure without requiring external energy. In this section, brief information about the types of passive control systems is given.

**Keywords:** Structural control, vibration, passive control

## Giriş

Pasif kontrol sistemleri, enerjinin dönüşümü ilkesi ile çalışan, yapısal bir kontrol sistemidir. Bu sistemler yapıya bağlanmış bir yay ve kütle yardımıyla sistemde oluşan enerjiyi toplayıp, daha sonra yapının enerjisini sönümlemek için kullanır. Biriken enerji mekanik enerjiye çevrilerek sönümleme hedeflenir. Bu özellikleri düşünüldüğünde, dışarıdan ek bir enerji kaynağına ihtiyaç duymayışı ve sisteme gelen enerjiyi dönüştürmesi pasif kontrol sistemlerini, diğer kontrol sistemlerine oranla daha ekonomik bir sistem yapmaktadır. Enerji israfını önlemesi, zararlı çevresel etkileri de azaltmaktadır.

Pasif kontrol cihazlarına örnek olarak, metalik sönümleyici, sürtünme tipi sönümleyici, viskoz sönümleyici, visko-elastik sönümleyici, ayarlı kütle sönümleyici ve ayarlı sıvı sönümleyici gösterilebilir. Pasif cihazlar, temelde hız ve yer değiştirmeye bağlı çalışmaktadır. Bu cihazlar, hız ve yer değiştirme parametrelerine uygun olarak, barındırdıkları sıvı, katı kütle ya da malzemenin sürtünme-kayma, akma gibi özelliklerinden faydalanarak çeşitlenmektedir. Ayarlı kütle sönümleyiciler, standart katı kütle ve yay sisteminden oluşurken, katı kütlelerin yerini sıvı kütleyle bırakması ve sönümlemede sıvının çalkalanma enerjisinden faydalandığı sistemler ayarlı sıvı sönümleyici olarak adlandırılmıştır. Viskoz, visko-elastik ya da sürtünme tipi sönümleyiciler ise sürtünme-kayma hareketinin enerjisinin kullanıldığı cihazlardır. Viskoz ve visko-elastik sönümleyicilerde, kullanılan levha arasında viskoz akışkan sıvı ve visko-elastik malzeme kullanımı ile sönüm sağlanmaktadır. Viskoz sönümleyiciler enerjiyi yaymak için iki katı kütle arasındaki viskoz akışkan malzemenin giriş hızını kullanmaktadır. Visko-elastik sönümleyicilerde ise kullanılan visko-elastik malzemenin levhalar arasındaki kayma hareketinden doğan enerji yardımıyla sistemin enerjisi dağıtılmaktadır. Metalik sönümleyicilerde enerji dağıtma aracı, kullanılan metal malzemenin akma ve deformasyon enerjisi olmaktadır. Yer değiştirme faktöründen faydalanarak sönümü sağlayan pasif sönümleme sistemidir.

## Metalik Sönümleyici

Metalik sönümleyiciler genellikle malzeme olarak kurşun ya da yumuşak çeliğin kullanıldığı, metalin akma ve deformasyon enerjisinden faydalanılan sistemlerdir. Temelde metalin plastik deformasyonu ile sistemin enerjisini dağıtarak sönümü sağlamaktadır.



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.



Ayla Ocak

Sinan Melih Nigdeli

Gebrail Bekdaş

Istanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul,  
Türkiye  
E-posta: bekdas@iuc.edu.tr  
aylaocak@outlook.com  
melihnig@iuc.edu.tr

**Bu bölümü alıntıla / Cite this chapter as:**  
Ocak, A., Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2023).  
Pasif kontrol sistemleri. G. Bekdaş, & S. M.  
Nigdeli (Ed.), *Ayarlı kütle sönümleyicilerinin  
optimum ayarlanması* içinde (s. 1-7).  
İstanbul: İÜC Yayınları.

## Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Optimum Ayarlanması

Çelik, içerisinde bulunan karbon miktarına göre sertlik ve mukavemet değişimine uğramaktadır. İçerisindeki karbon miktarı arttıkça çeliğin sertliği ve mukavemeti artmakta, sünekliliği azalmaktadır. Bu durumda plastik deformasyon miktarının bir ölçüsü olarak da ifade edilen sünekliliğin azalması, malzemenin gevrek bir davranış göstermesine ve düşük plastik deformasyon enerjisinin oluşmasına sebep olmaktadır. Enerji dağıtımında kullanılan plastik deformasyon enerjisinin yüksek olması istendiği için metalik sönümleyicilerde sünekliliği yüksek olan yumuşak çelik tercih edilmektedir. Malzeme sertliği dışında metalik sönümleyicide dikkat edilmesi gerek bir diğer durum, malzemenin korozyona uğrama olasılığıdır. Bu yüzden paslanmaya dirençli malzeme kullanımı, sönümleyicinin ömrünü arttıracaktır.

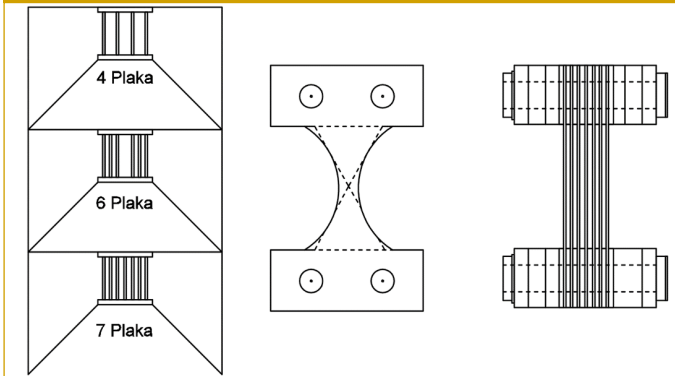
Metalik sönümleyiciler X, dikdörtgen ya da üçgen şekilli levhalar şeklinde üretilmektedir. Geleneksel üretim şekillerinin bu şekilde olmasının başlıca sebebi, gerilmenin eşit bir şekilde malzemede dağılması ile akmanın üniform gerçekleşmesini sağlamaktır. Yaygın olarak, sönümlemede verimli olduğu görülen, x şekilli, ek sönümleme ve rijitlikli (Additional Damping and Stiffness - ADAS) cihaz ve üçgen plakalı ek sönüm ve rijitlikli (Triangular-Plate Ad-

ded Damping and stiffness - TADAS) cihaz, metalik sönümleyici olarak kullanılmaktadır (Whittaker vd., 1991; Tsai vd., 1993). Şekil 1'de ADAS ve Şekil 2'de TADAS metalik sönümleyici örneği gösterilmektedir.

ADAS elemanından sonra, soğuk yumuşak çeliğin bükülmesiyle elde edilen şeritlerden, U şekilli metalik sönümleyici geliştirilmiştir (Aguirre ve Roberto Sanchez, 1992; Dolce vd., 1996). Bu tip cihazlar, U şeklindeki uç kısımlarda plastik deformasyonların oluşmasıyla, bir kesme cihazı gibi çalışmaktadır (Bagheri vd., 2015). Tek eksenli ve çift eksenli çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 3'te tek eksenli U şekilli metalik sönümleyiciye örnek verilmiştir.

Şekil 1

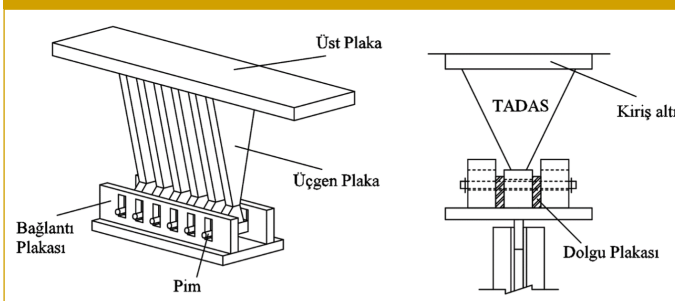
X şekilli metalik sönümleyici, ADAS cihazı ve kesiti



*Açıklama notu.* Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Thompson, C. L., & Alonso, L. J. 1991, "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices" Earthquake Spectra, 7(4), 563-604 kaynağından alınmıştır.

Şekil 2

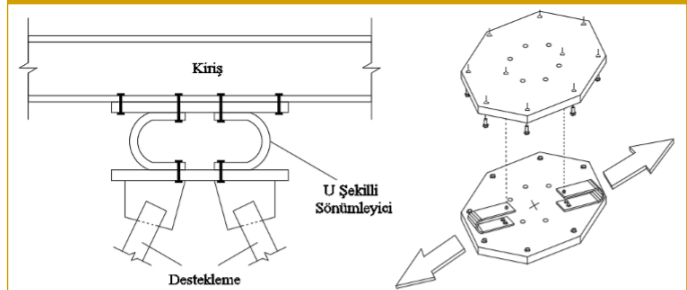
Üçgen şekilli metalik sönümleyici, a) TADAS cihazı b) TADAS cihazı kesiti



*Açıklama notu.* Mohammadi, R. K., Nasri, A., & Ghaffary, A. 2017, TADAS dampers in very large deformations. International Journal of Steel Structures, 17(2), 515-524; Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P., & Su, Y. F., 1993, Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. Earthquake Spectra, 9(3), 505-528 kaynaklarından alınmıştır.

Şekil 3

Tek eksenli U şekilli metalik sönümleyici ve kesiti



*Açıklama notu.* Bagheri, S., Barghian, M., Saeedi, F., & Farzinfar, A., 2015, U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. In Structures (Vol. 3, pp. 163-171). Elsevier kaynağından alınmıştır.

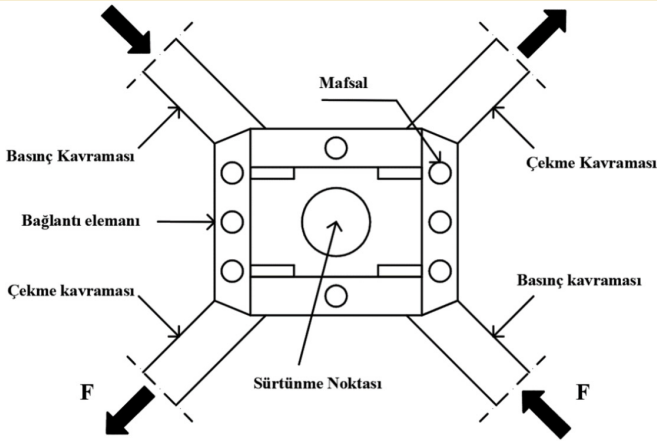
İki levha arasına yerleştirilen metal plakalar ve parçaların farklı geometrik şekil ve boyutlarda kullanılarak elde edildiği metalik sönümleyiciler bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak, iki levha arasına yerleştirilen metal kutu şekilli metalik sönümleyici (Box-Shaped Damper - BSD) ve U, C ve S şekilli metallerden oluşturulan akordeon şekilli metalik sönümleyiciler (Accordion Metallic Damper - AMD) gösterilebilir (Shirinkam ve Razzaghi, 2020; Motamedi ve Nateghi-A, 2018).

## Sürtünme Tipi Sönümleyici

Sürtünmeli pasif cihazlar, sistemin kayma-sürtünme enerjisinden faydalanan sistemlerdir. Kayma hareketi sonucu oluşan sürtünme enerjisi ısıya çevrilerek sönüm sağlanmaktadır. Sürtünme tipi pasif cihazların temelini, Pall'ın geliştirdiği çapraz şekilli kavramaların olduğu çelik çubuklardan meydana gelen model oluşturmaktadır (Pall vd., 1993). Pall tarafından geliştirilen Sürtünme tipi sönümleyici örneği Şekil 4'te gösterilmektedir.

Sürtünme tipi cihaz mantığı, otomobillerde bulunan fren sisteminden esinlenilerek geliştirilmiştir. Bu sistemler akmanın geciktirilmesine bir başka deyişle sistemin elastikliğinin korunup kontrol sonrası sistemin eski haline getirilmesini amaçlamaktadır. Sisteme gelen titreşimleri önlemek için, ana yapının akmasından önce kayma-sürtünme hareketiyle kontrolü sağlamakta, sistem eski şeklini almaktadır (Pasquin vd., 2004; Jaisee vd., 2021). Zaman içerisinde Pall'ın geliştirdiği klasik model güncellenerek, geliştirilmiş Pall sürtünme sönümleyici (Improved Pall Friction Damper - IPFD) cihaz üretilmiştir (Wu vd., 2005). Bu yeni modelin

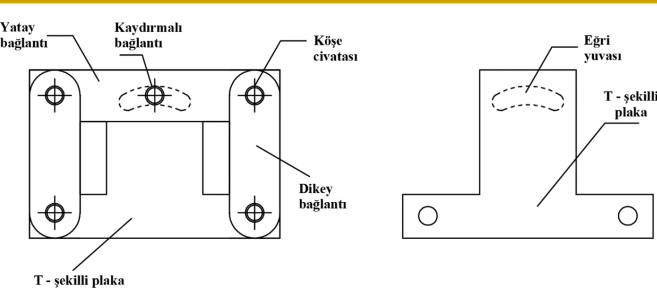
Şekil 4  
Sürtünme Tipi Sönümleyici



*Açıklama notu.* Okut, 2006, Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Sismik Etkiler Altındaki Betonarme Yapılarda Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul kaynağından alınmıştır.

analizi ve maliyeti, klasik Pall sürtünme cihazından (Pall Friction Damper - PFD) daha kolay ve düşük maliyetlidir (Jaisee vd., 2021). PFD cihazın merkezindeki artı işaretini andıran plaka yerine T şeklinde plaka kullanılmıştır. Şekil 5'te IPFD örneği şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 5  
Geliştirilmiş Pall Sürtünme Sönümleyici cihaz (IPFD)

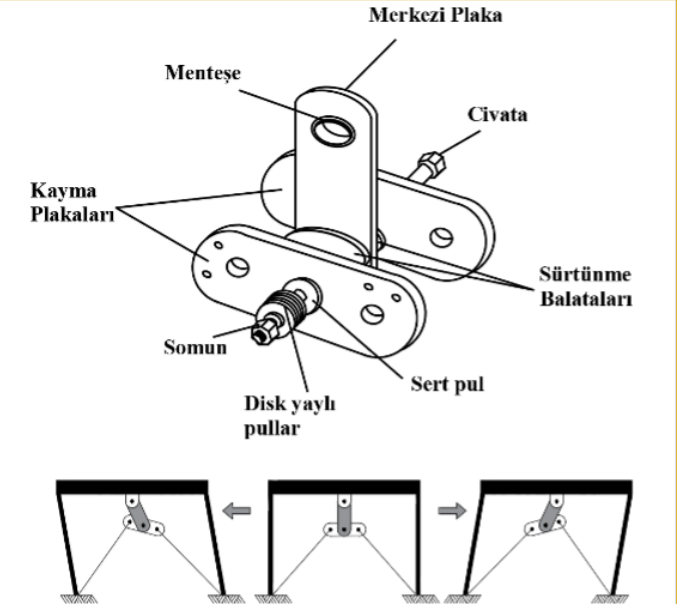


*Açıklama notu.* Wu, B., Zhang, J., Williams, M. S., & Ou, J. 2005. Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers. Engineering Structures, 27(8), 1258-1267 kaynağından alınmıştır.

Genellikle X şeklinde çapraz çelik çubuklardan oluşan, merkezinde sönümleyici bulunan bu sistemler, zaman içerisinde geliştirilerek farklı modellerde de tasarlanmıştır. Çelik çapraz tasarımlara örnek olarak T şekilli çoklu kullanıma uygun tasarlanmış, kayma sürtünme sönümleyici cihaz (friction damper device - FDD) gösterilebilir. Şekil 6'da geliştirilen FDD sönümleyici ve yanıl bir kuvvet sonrası hareketi şematik olarak gösterilmektedir (Mualla ve Belev, 2002).

Pasif sürtünme cihazlarının ömrünü etkileyen birçok etken vardır. Kullanılan metalin karakteristik özellikleri, korozyon, sönümleyicide sürtünme balataları gibi parçalarda kullanılan gresin yaratacağı kirlenme vb. öğeler sönümleyicinin ömrünü ve verimliliğini etkilemektedir. Yapılan bir çalışmada cıvalı durumdaki sürtünme sönümleyicinin paslı ve gresliye oranla %56 gibi dikkate değer

Şekil 6  
Sürtünme Sönümleyici cihaz (FDD) ve hareket şeması



*Açıklama notu.* Mualla, I. H., & Belev, B., 2002, Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. Engineering Structures, 24(3), 365-371 kaynağından alınmıştır.

bir oranda enerji kaybını azalttığı tespit edilmiştir (Chan ve Tang, 2022). Bu durum göz önüne alındığında sönümleyici ömrü açısından uygun malzeme seçimi ve bakımı büyük önem arz etmektedir. Klasik sürtünme tipi sönümleyicilerde, çelik, pirinç ve grafit ile kaplanmış bronz gibi malzemeler kullanılmaktadır. Düşük karbon içeren çelik malzeme kullanıldığında, kaplamadaki korozyon daha da arttığı için bu tür karbon içeriğinden kaçınılmalıdır (Öztürk, 2007). Yapılan çalışmalarda krom miktarının yüksek olduğu çelik malzemenin kaplama ile temasında korozyon oluşturmadığı gözlemlenmiştir (Aldemir ve Aydın, 2005).

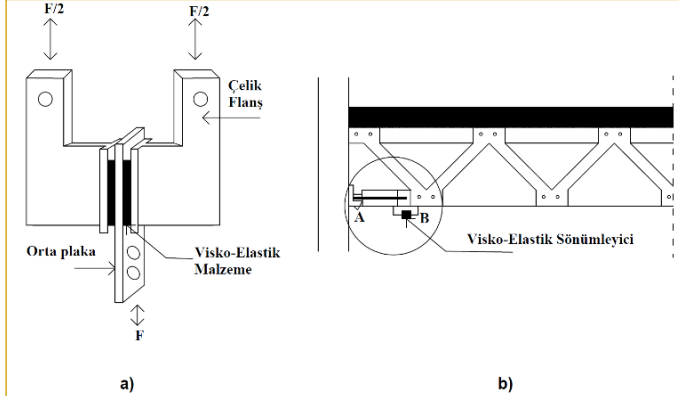
## Visko-elastik Sönümleyici

Visko-elastik sönümleyici (Visco-Elastic Damper-VED), iki plaka arasına yerleştirilen visko-elastik malzemeden oluşan bir sistemdir. Plakalar arasındaki malzemenin kayma hareketinden doğan enerji, ısı enerjisine dönüştürülerek, yerleştirildiği yapının titreşim kontrolünde kullanılmaktadır. Kayma hızına bağlı geliştirilmiş pasif bir sönümleme cihazıdır. Plakalar arasındaki visko-elastik malzemenin kayma deformasyonu, sönümün ana enerji kaynağını oluşturmuştur. Burada plakalar bir piston görevi görerek hareket etmektedir. Şekil 7'de visko-elastik sönümleyici örneği ve yerleşim yeri detayı gösterilmiştir.

Visko-elastik malzeme yüksek enerji dağıtma özelliğine sahiptir. Kontrol esnasında kayma-sürtünme hareketinden doğan kinetik enerjinin bir miktarı visko-elastik malzemede depolanırken, kalan kısmı ısıya çevrilerek sisteme dağılmaktadır. Malzemede depolanan az miktardaki enerji ihmal edilebilir olsa da visko-elastik malzemenin frekans ve ısıdan etkilenmesi kaçınılmazdır (Huang vd., 2019). Sıcaklığın artması, enerji yayılımını düşürmekte, sönüm performansını azaltmaktadır (Mahmoodi, 1969; Modhej ve Zahrai, 2021). Bu durum göz önüne alındığında, ortam sıcaklığı,

Şekil 7

a) Visko-elastik sönümleyici cihaz (VED) b) yerleşim yeri detayı

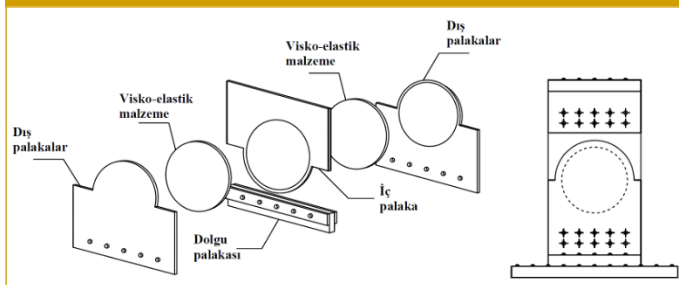


*Açıklama notu.* Aldemir, Ü., Aydın, E., 2005. Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Yeni Yaklaşımlar, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 435/1, İstanbul kaynağından alınmıştır.

visko-lastik sönümleyicilerde dikkat edilmesi gereken parametreler arasında yerini almıştır. Sönümleyicide kullanılan visko-elastik malzeme, kauçuk vb. malzeme türevlerinden meydana gelmektedir. Bu malzeme, plakalar arasına farklı kauçuk karışımlarda ve şekillerde yerleştirilebilmektedir. Levha arasındaki malzeme, dikdörtgen kare yerleştirilebildiği gibi dairesel formda kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Nasab ve Kim, 2022). Dairesel formda visko-elastik malzeme kullanılmış visko-elastik sönümleyici ve görünüşü Şekil 8'de şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 8

a) Dairesel formda visko-elastik malzeme ve sönümleyici görünüşü b) Dairesel VED kesiti.



*Açıklama notu.* Nasab, M. S. E., & Kim, J., 2022, Fuzzy analysis of a viscoelastic damper in seismic retrofit of structures. Engineering Structures, 250, 113473 kaynağından alınmıştır.

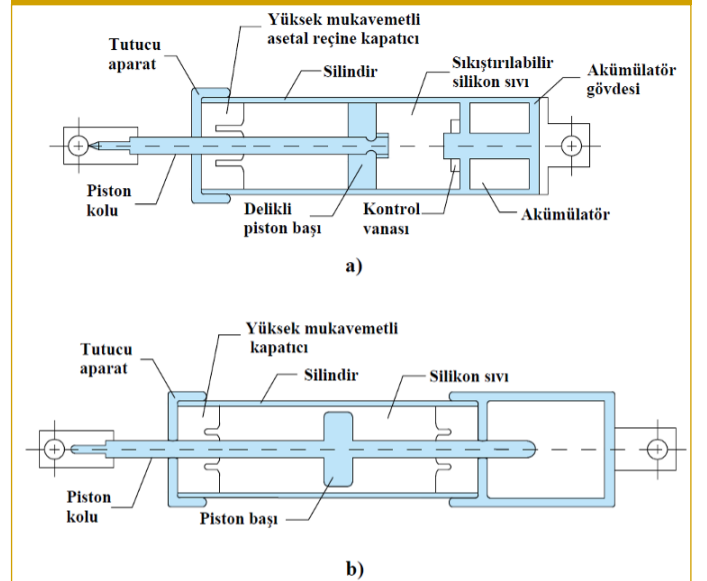
## Viskoz Sönümleyici

Viskoz sönümleyici (Viscous Damper – VD), visko-elastik sönümleyicilerle benzer şekilde hıza bağlı, pasif bir sönümleyicidir. Sürtünme ve plakalar arası malzemenin kayma hızından faydalanan bu sistemlerde, visko-elastik sönümleyicide kullanılan katı malzeme, yerini viskoz akışkan bir malzemeye bırakır. Viskoz akışkan malzemenin dışında, çelik plakalar yerine pistonlar kullanılmaktadır. Viskoz malzeme, pistonlar arasında itme-çekme prensibiyle hareket eder. Kayma hızından ve sürtünmeden oluşan enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesiyle, sönüm için kullanılacak enerji elde edilmiş olur. Viskoz sönümleyicinin ilk örneği 1992'de Constati-

nou'nun geliştirdiği, içerisinde viskoz malzemenin silikon yağı kullanılarak, çelik pistonların akışkan malzemede kaymasıyla biriken enerjinin, bir akümülatör yardımıyla depolandığı uygulamadır (Okut, 2006). Viskoz sönümleyiciler her zaman akümülatörlü şekilde tasarlanmaz. Bunun yerine piston geçiş çubuğu kullanılarak da üretilebilmektedir. Akümülatör kullanıldığı durumda, silindir içindeki viskoz akışkan malzeme, piston başında bulunan delikler aracılığıyla bir hazneden başka bir hazneye hareket ederken, piston geçiş çubuğu kullanıldığında, malzeme, piston başı ile silindir arasında bulunan boşluktan geçerek hazneye ulaşmaktadır (Kaleybar ve Tahrani, 2021). Akümülatörlü ve piston geçiş çubuklu viskoz sönümleyici örneği kesiti Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekil 9

a) Akümülatörlü viskoz sönümleyici kesiti, b) Piston geçiş çubuklu viskoz sönümleyici kesiti



*Açıklama notu.* Kaleybar, R. S., & Tahrani, P (2021, October). Effects of using different arrangements and types of viscous dampers on seismic performance of intermediate steel moment frames in comparison with different passive dampers. In Structures, 33, 3382-3396. Elsevier kaynağından alınmıştır.

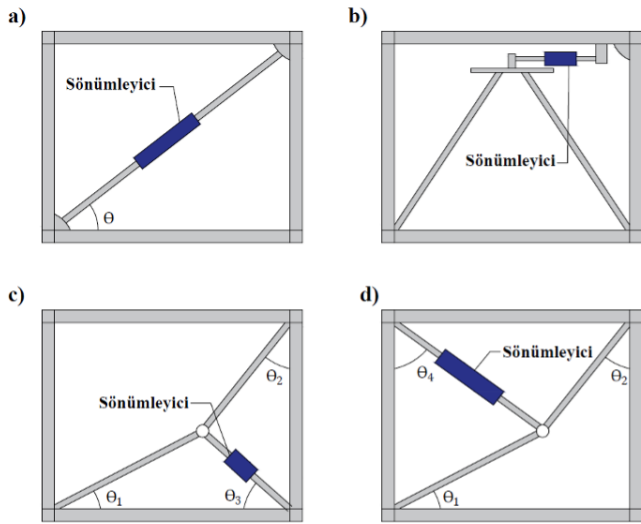
Viskoz sönümleyici, sisteme bağlanırken farklı şekillerde konumlandırılabilir. Diyagonal şekilde sisteme eklenebileceği gibi zikzak olarak ya da bir mafsal yardımıyla da sisteme eklenebilirler (Zhang vd., 2012). Şekil 10'da viskoz sönümleyicinin yerleşim örnekleri verilmiştir.

## Ayarlı Kütle Sönümleyici

Ayarlı kütle sönümleyiciler (Tuned Mass Damper – TMD), katı bir kütle ve yaydan oluşan, yer değiştirmeye bağlı pasif bir sönümleme sistemidir. Frahm'ın 1909'daki "titreşim sönümleyici" olarak ifade ettiği icadıyla literatüre kazandırılmış, Den Hartog ve Ormondroyd'un çalışmalarıyla teorik altyapısı oluşturulmuştur (Frahm, 1909; Den Hartog ve Ormondroyd, 1928). Yapının kontrolünü, sönümü doğrudan etkileyen, sönümleyici frekansı ve kütle parametreleri belirlemektedir. Sönümleyicinin frekansının, yerleştirdiği yapının doğal frekansına çok yakın bir değerde seçilmesi, kontrol performansı açısından önemli bir yere sahiptir. Frekansın doğru seçimi ile sisteme gelen herhangi bir dinamik yük

Şekil 10

Sönümleyici yerleşim örnekler (Zhang vd., 2012): a) diyagonal yerleşim, b) zikzak yerleşim, c) alt mafsal destekli yerleşim, d) üst mafsal destekli yerleşim

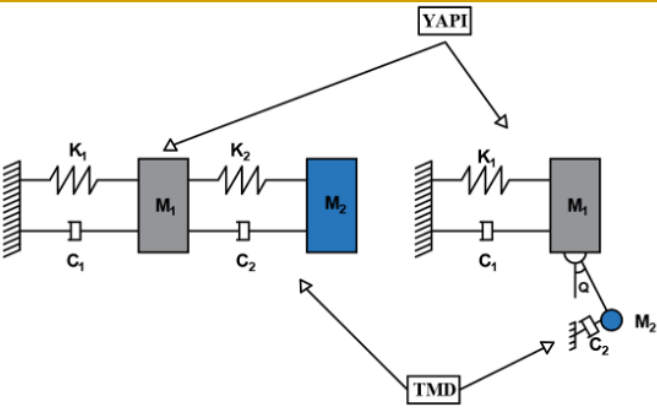


*Açıklama notu.* Zhang, R., He, H., Weng, D., Zhou, H., & Ding, S., 2012, Theoretical analysis and experimental research on toggle-brace-damper system considering different installation modes. Scientia Iranica, 19(6), 1379-1390 kaynağından alınmıştır.

karşısında, sönümleyici bu frekans bilgisini kullanarak, yapının yer değiştirmesine zıt yöndeki hareketiyle sönümü sağlamaktadır. Kütle ve yayın yapıya bağlanarak oluşturduğu, ayarlı kütle sönümleyici için mekanik model örneği Şekil 11'de gösterilmiştir.

Şekil 11

Ayarlı kütle sönümleyici mekanik modeli



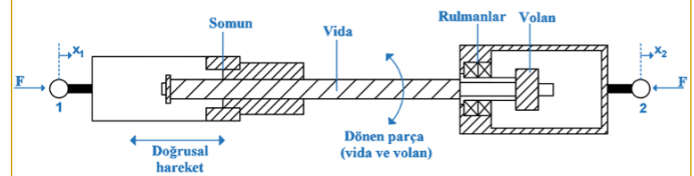
*Açıklama notu.* Yetişken, A., 2016, Sıvı Sönümleyici Sistemlerin Yapılarının Sönüm Kapasitelerine Etkisinin Sarsma Masası Kullanılarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon kaynağından alınmıştır.

Ayarlı kütle sönümleyiciler için diğer bir ana kontrol parametresi küttedir. Yapı ile kütle arasındaki oran, tek serbestlik dereceli bir sistemde kütle sönümleyicinin, yapının kütlelerinin yaklaşık %5'i olacak şekilde seçilmesi tavsiye edilmektedir (Vickery vd., 1983; Rana ve Soong, 1998). Sistemde kullanılan kütlelerin, daha önce yapının doğal frekansına göre belirlendiği modda hareket eden

rek yer değiştirmesi, sönüm için kullanılacak enerjinin kaynağını oluşturmaktadır. Kütlelerin, sönümleyici performansı üzerindeki etkileri göz önüne alınarak, zaman içerisinde inerter cihazlar geliştirilmiş, kütle sönümleyicilere ilavesiyle, kütlelerin etkiye oranı ayarlanabilir hale gelmiştir. Şekil 12'de inerter bir cihaz örneğinin kesiti verilmektedir.

Şekil 12

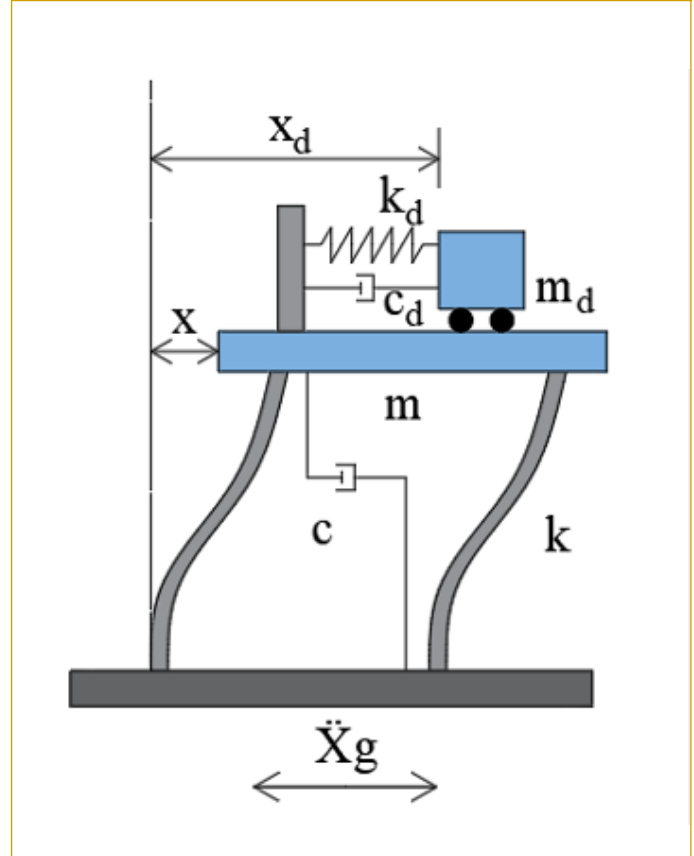
Inerter cihaz kesiti



Ayarlı kütle sönümleyiciler, basit tasarımı, bakım ve onarım kolaylığı gibi avantajlarından dolayı, köprü, kule, bina, termik santral, baca, rüzgâr türbini vb. farklı türdeki yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle rüzgâr titreşimlerinde oldukça etkili olan pasif sönümleme cihazları arasında, son yıllarda sismik güçlü titreşimler karşısında gösterdiği performans sayesinde, tercih edilen bir kontrol cihazı haline gelmiştir. Bir sismik uyarım altındaki ayarlı kütle sönümleyicinin hareketini ifade eden yapı ve sönümleyici modeli ve hareket doğrultusu, şematik olarak Şekil 13'te gösterilmiştir.

Şekil 13

Sismik uyarı altında Ayarlı kütle sönümleyici (TMD) ve yapı modeli



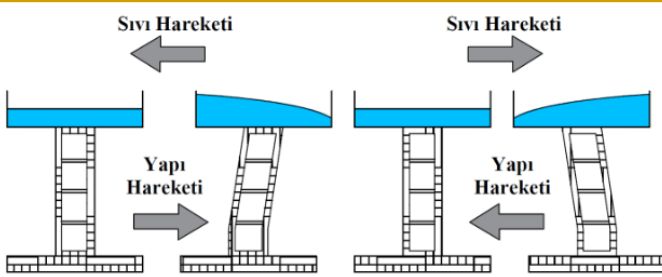


## Ayarlı Sıvı Sönümleyici

Ayarlı sıvı sönümleyiciler (Tuned Liquid Damper – TLD), kütle sönümleyicilerle benzer şekilde kütle ve yay modelinden oluşan, içerisinde kütle olarak sıvı bulunduran, yer değiştirmeye bağlı sistemlerdir. Sönümü sağlayacak enerji, sönümleyici tankında bulunan sıvının çalkalanma enerjisinden elde edilmektedir. Yerleştirildiği yapıya gelebilecek herhangi bir titreşim karşısında, sönümleyici, yapının hareketine zıt yönde sıvının sistemde dolaştırılmasıyla kontrolü sağlamaktadır. Sıvının sistemdeki hareketi, yapının doğal frekansı dikkate alınarak seçilen çalkalanma frekansına bağlıdır. Şekil 14'te yapı hareketine göre yönlendirilen sıvı çalkalanma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.

Şekil 14

Yapı-Sıvı hareketi çalkalanma prensibi

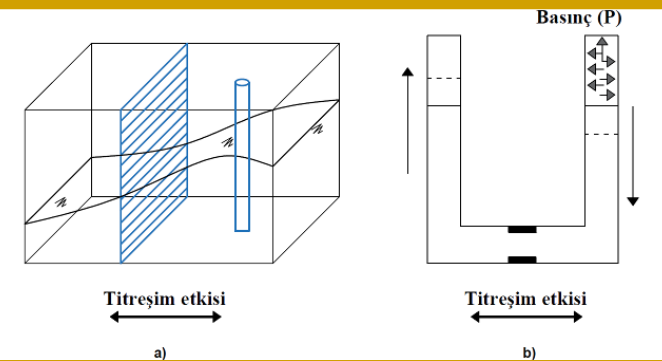


**Açıklama notu.** Tuong, B. P. D., Huynh, P. D., Bui, T. T., & Sarhosis, V. 2019, Numerical analysis of the dynamic responses of multistory structures equipped with tuned liquid dampers considering fluid-structure interactions. Open Construction and Building Technology Journal, 13(1), 289-300 kaynağından alınmıştır.

Pasif ayarlı sıvı cihazlar iki gruba ayrılmaktadır. Birinci grupta klasik salınan sönümleyiciler yer alırken, diğer grupta, u şeklinde ayarlı sıvı kollu sönümleyiciler bulunmaktadır. Salınan sönümleyicilerin içerisine sönüm yeteneğini arttırmak için plak, çubuk ya da ikisi birlikte eklenmektedir. Şekil 15'te Plak ve çubuk eklenmiş salınan sıvı sönümleyici ve ayarlı sıvı kollu sönümleyici (Tuned Liquid Column Damper – TLCD) örneği gösterilmiştir.

Şekil 15

a) Salınan çubuklu ve plaklı sönümleyici, b) Ayarlı sıvı kollu sönümleyici (TLCD)



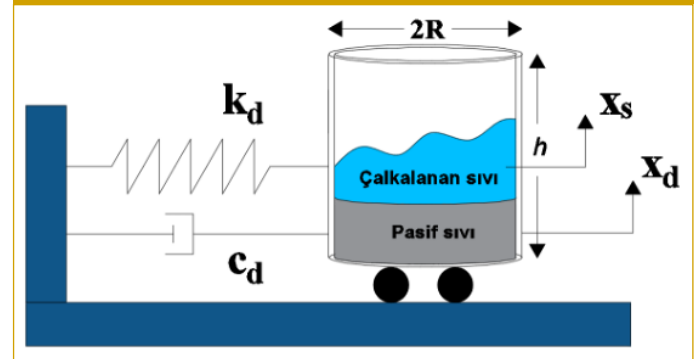
**Açıklama notu.** Soong, T.T. and Constantinou, M.C.,1994. Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering, Springer-Verlag, Vienna kaynağından alınmıştır.

Ayarlı sıvı sönümleyicilerin kontrol performansını, kütle, frekans ve sıvının karakteristik özellikleri belirlemektedir. Sıvı sönümleyicilerde kütle oranı, kütle sönümleyiciler gibi yaklaşık %5'lik bir oran alınabileceği gibi kontrol performansı açısından %1 ile %4 arasında seçilebileceği de önerilmiştir (Sun vd., 1992; Yu vd., 1999). Sıvının karakteristik özellikleri arasında, yoğunluk ve kinematik viskozite, sıvı sönümleyicilerin hesabında kullanılan esas parametrelerdir. Ayarlı sıvı sönümleyicilerin optimum tasarımında, kinematik viskozite ve yoğunluğun seçimi sönümü etkilemektedir. Sönümleyicide optimum çalkalanma enerjisinin elde edilmesi, farklı yoğunluktaki karışımlar oluşturularak elde edilebileceği gibi sönümleyici tankına eklenecek katı bir bilye yardımıyla da sağlanabilmektedir (Tanveer vd., 2020).

Sıvıların çalkalanma prensibinde bir miktar sıvının ölü yük olarak kaldığı, kalan sıvının hareket ettiği bilinmektedir. Ayarlı sıvı sönümleyiciler tasarlanırken, pasif kalan sıvı yükün sönümleyici tankıyla birlikte ve aktif sıvının bunlardan bağımsız bir şekilde hareket ettiği varsayılmaktadır (Abramson, 1966). Aktif ve pasif kütle hareketi şematik olarak Şekil 16'da gösterilmiştir.

Şekil 16

Ayarlı sıvı sönümleyici, aktif ve pasif kütle modeli



**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that there are no competing interests.

## Kaynaklar

1. Abramson, H.N., 1966. The Dynamics of Liquids in Moving Containers. Urbana University of Illinois, Web.
2. Aguirre, M., & Roberto Sanchez, A. (1992). Structural seismic damper. *Journal of Structural Engineering*, 118(5), 1158-1171. [Crossref]
3. Aldemir, Ü., Aydın, E., 2005. Depreme Dayanımlı Yapı Tasarımında Yeni Yaklaşımlar, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 435/1, İstanbul
4. Bagheri, S., Barghian, M., Saieri, F., & Farzinfar, A. (2015, August). U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. In *Structures* (Vol. 3, pp. 163-171). Elsevier. [Crossref]



5. Chan, R. W., & Tang, W. (2022, January). Serviceability conditions of friction dampers for seismic risk mitigations. In *Structures* (Vol. 35, pp. 500-510). Elsevier. [\[Crossref\]](#)
6. Den Hartog, J. P., & Ormondroyd, J. (1928). Theory of the dynamic vibration absorber. *ASME J. Appl. Mech.*, 5(17), 11-22.
7. Dolce, M., Filardi, B., Marnetto, R., & Nigro, D. (1996). Experimental tests and applications of a new biaxial elasto-plastic device for the passive control of structures. *Special Publication*, 164, 651-674.
8. Frahm, H., 1909. "Device for Damping Vibration of Bodies" US Patent 989958.
9. Huang, X. H., He, Z. F., & Xu, Y. S. (2019). A two-step transformation approach for ESS model of viscoelastic material to time domain. *Frontiers in Materials*, 6, 109. [\[Crossref\]](#)
10. Jaisee, S., Yue, F., & Ooi, Y. H. (2021). A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*, 235, 112022. [\[Crossref\]](#)
11. Kaleybar, R. S., & Tehrani, P. (2021, October). Effects of using different arrangements and types of viscous dampers on seismic performance of intermediate steel moment frames in comparison with different passive dampers. In *Structures* (Vol. 33, pp. 3382-3396). Elsevier. [\[Crossref\]](#)
12. Mahmoodi, P. (1969). Structural dampers. *Journal of the Structural Division*, 95(8), 1661-1672. [\[Crossref\]](#)
13. McNamara, R. J., 1977. Tuned mass dampers for buildings. *Journal of the Structural Division*, 103(9), 1785-1798. [\[Crossref\]](#)
14. Modhej, A., & Zahrai, S. M. (2021, February). Numerical study of visco-hyperelastic damper with high axial damping rubber subjected to harmonic loading. In *Structures* (Vol. 29, pp. 1550-1561). Elsevier. [\[Crossref\]](#)
15. Mohammadi, R. K., Nasri, A., & Ghaffary, A. (2017). TADAS dampers in very large deformations. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 515-524. [\[Crossref\]](#)
16. Motamedi, M., & Nateghi-A, F. (2018). Study on mechanical characteristics of accordian metallic damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 142, 68-77. [\[Crossref\]](#)
17. Mualla, I. H., & Belev, B. (2002). Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. *Engineering Structures*, 24(3), 365-371. [\[Crossref\]](#)
18. Nasab, M. S. E., & Kim, J. (2022). Fuzzy analysis of a viscoelastic damper in seismic retrofit of structures. *Engineering Structures*, 250, 113473. [\[Crossref\]](#)
19. Okut, 2006. Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Sismik Etkiler Altındaki Betonarme Yapılarda Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
20. Öztürk, B.K., 2007. Yapısal Kontrol Sistemlerinin Değerlendirilmesi ve Taban İzolatörlerinin Betonarme bir Binaya Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
21. Pall, A., Vezina, S., Proulx, P., & Pall, R. (1993). Friction-dampers for seismic control of Canadian space agency headquarters. *Earthquake Spectra*, 9(3), 547-557. [\[Crossref\]](#)
22. Pasquin, C., Leboeuf, N., Pall, R. T., & Pall, A. (2004, August). Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's building, Montreal. In *13th world conference on earthquake engineering* (pp. 1-2).
23. Rana, R. and Soong, T. T., 1998. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Engineering structures*, 20(3), 193-204. [\[Crossref\]](#)
24. Shirinkam, M. R., & Razzaghi, J. (2020, February). Experimental and analytical investigation on the behavior of metallic Box-Shaped Dampers (BSD). In *Structures* (Vol. 23, pp. 766-778). Elsevier. [\[Crossref\]](#)
25. Soong, T.T. and Constantinou, M.C., 1994. Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering, Springer-Verlag, Vienna. [\[Crossref\]](#)
26. Sun, L.M., Fujino, Y., Pacheco, B.M. and Chaiseri, P., 1992. Modelling of tuned liquid damper (TLD). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 43(1-3), 1883-1894. [\[Crossref\]](#)
27. Tanveer, M., Usman, M., Khan, I.U., Farooq, S.H., Kasim 2020, Material Optimization of Tuned Liquid Column Ball Damper (TLCBD) for The Vibration Control of Multi-storey Structure Using Various Liquid and Ball Densities. [\[Crossref\]](#)
28. Tuong, B. P. D., Huynh, P. D., Bui, T. T., & Sarhosis, V. (2019). Numerical analysis of the dynamic responses of multistory structures equipped with tuned liquid dampers considering fluid-structure interactions. *Open Construction and Building Technology Journal*, 13(1), 289-300. [\[Crossref\]](#)
29. Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P., & Su, Y. F. (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake spectra*, 9(3), 505-528. [\[Crossref\]](#)
30. Vickery, B.J., Isyumov, N. and Davenport, A.G., 1983. The role of dumping, mass and acceleration. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 11(1-3), 285-294. [\[Crossref\]](#)
31. Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Thompson, C. L., & Alonso, L. J. (1991). Seismic testing of steel plate energy dissipation devices. *Earthquake Spectra*, 7(4), 563-604. [\[Crossref\]](#)
32. Wu, B., Zhang, J., Williams, M. S., & Ou, J. (2005). Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers. *Engineering Structures*, 27(8), 1258-1267. [\[Crossref\]](#)
33. Yetişken, A. (2016), Sıvı Sönümleyici Sistemlerin Yapıların Sönüm Kapasitelerine Etkisinin Sarsma Masası Kullanılarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
34. Yu, JK, Wakahara, T. And Reed, D.A., (1999). A non-linear numerical model of the tuned liquid damper. *Earthquake engineering & structural Dynamics*, 28(6), 671-686. [\[Crossref\]](#)
35. Zhang, R., He, H., Weng, D., Zhou, H., & Ding, S. (2012). Theoretical analysis and experimental research on toggle-brace-damper system considering different installation modes. *Scientia Iranica*, 19(6), 1379-1390. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 2**

## **AKTİF KONTROL SİSTEMLERİ**

Serdar ULUSOY  
Gebrail BEKDAŞ  
Sinan Melih NİGDELİ

# Aktif Kontrol Sistemleri

## Active Control Systems

### BÖLÜM HAKKINDA

Pasif kontrol sistemlerinin titreşimleri azaltmada yetersiz kaldığı veya yüksek seviyede konfor ile yapı kullanımının sürekliliğinin istendiği durumlarda aktif kontrol sistemine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu sistemler dış kaynak sonucunda üretilen bir kontrol kuvvetini yapıya uygulamaktadır. Bu kontrol kuvveti bir kontrol algoritmasına göre üretilmektedir. Bu bölümde aktif kontrol sistemleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yapısal kontrol, titreşim, aktif kontrol

### ABOUT the CHAPTER

An active control system may be needed in cases where passive control systems are insufficient to reduce vibrations or where a high level of comfort and continuity of building use is desired. These systems apply a control force produced as a result of an external source to the structure. This control force is produced according to a control algorithm. In this section, brief information about active control systems is given.

**Keywords:** Structural control, vibration, active control

## Giriş

İnsanlar, konaklama ihtiyaçlarını giderebilmek için yüksek yapılara veya ulaşımı daha hızlı ve kolay gerçekleştirebilmek için uzun açıklıklı köprülere ihtiyaç duymaktadır. Gelecekteki teknolojik imkanlar ile birlikte bu tip yapıların inşa edilmeye başlanmıştır. Ancak deprem veya kuvvetli rüzgar gibi yatay yüklerin etkisinde bu tip yapılarda kontrol sistemlerinin eksikliği, konforun azalmasına hatta yıkıcı etkilere ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu etkilerin önüne geçmek için, yapılara daha fazla enerji absorbe edebilme kabiliyeti sunan aktif kontrol sistemleri gibi kontrol sistemlerinin yapı içerisine dahil edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu sistemler yüksek titreşimlere maruz kalan yapılarda yüksek koruma sağlanmasının yanı sıra daha az yer kaplanması ve yapı malzemelerinin uygun kullanımı ile yapı maliyetinin azalmasına da katkı sağlanmaktadır.

Bu bölümde, aktif kontrol tipleri (aktif tendon sistemleri ve aktif kütle sönümleyicisi), kontrol teknikleri ve aktif kontrol sistemlerinin yapısal alanda pratik ve teorik uygulamalarından bahsedilecektir.

## Aktif Kontrol Sistemleri

Literatürde çalışma prensibi dikkate alındığında açık ve kapalı çevrim olmak üzere iki tip kontrol sistemi ile karşılaşmaktadır. Çıkış değişkenlerinin girişe etki etmediği, yalnızca verilen kaynak değişkeni kontrol eden bir kontrol mekanizmasına açık çevrim adı verilirken, tersi durumda yani sistemin çıkışı girişi doğrudan etkiliyorsa bu sistemlere kapalı çevrim denmektedir. Yapı mühendisliğinde kullanım açısından önemli bir yere sahip olan kapalı çevrim kontrol sistemi (geri besleme kontrol sistemi), ivmeölçer gibi ölçü aletleri ile yapısal tepkileri ölçerek, referans değeri (0) ile karşılaştırır ve ardından yapıları aktif olarak kontrol etmek için bir kontrol sinyali üretir. Harici bir güç kaynağı tarafından kontrol edilen aktüatör vasıtasıyla, kontrol sinyali dikkate alınarak binaya uygun kontrol kuvveti uygulanır. Bu kuvvet, binaya enerji eklemek veya enerjisi dağıtmak için kullanılmaktadır. Böylece, çalışma şeması Şekil 1'de gösterilen aktif kontrol sistemleri iç ve dış etkilere gelen tepkileri kontrol edebilmektedirler. Bu sistemlerde güvenlik ve konfor en önemli iki unsurdur.



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.



Serdar Ulusoy<sup>1</sup>

Gebrail Bekdaş<sup>2</sup>

Sinan Melih Niğdeli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Türk- Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

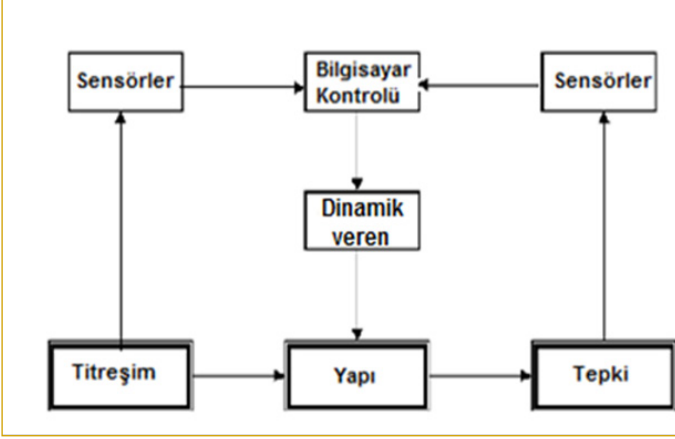
<sup>2</sup>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

E-posta: bekdas@iuc.edu.tr  
serdar.ulusoy@tau.edu.tr  
melihni@iuc.edu.tr

**Bu bölümü alıntıla / Cite this chapter as:**  
Ulusoy, S., Bekdaş, G., & Niğdeli, S. M. (2023). Aktif kontrol sistemleri. G. Bekdaş, & S. M. Niğdeli (Ed.), *Ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum ayarlanması* içinde (s. 9-14). İstanbul: İÜC Yayınevi.

Şekil 1

Aktif kontrollü yapıların çalışma şeması

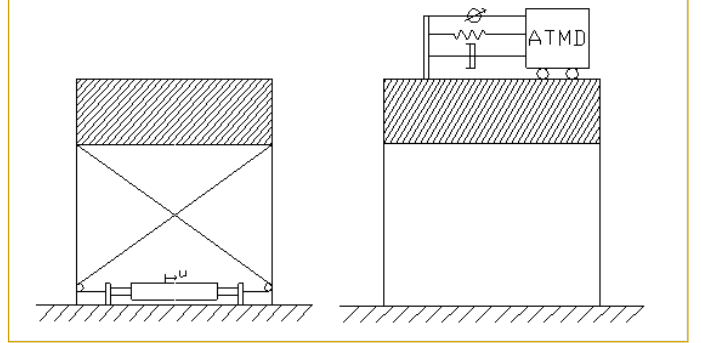


Titreşime maruz kalan yapının yeniden denge konumuna ulaşabilmesi için Şekil 2'de gösterilen iki farklı aktif kontrol sistemi uygulanmaktadır. Bunlardan aktif tendonlu sistemler, bir diğeri ise aktif ayarlı kütle sönümleyicileridir (ATMD). Aktif tendonlu yapı modeli, dört ön gerilimli kablo, iki aktüatör ve kontrol elemanından oluşur. Bu kablolardan ikisi yapı modelinin bir tarafından, aktüatöre çapraz olarak bağlı, diğer ikisi ise diğer tarafında aktüatöre çapraz olarak bağlıdır. Aktüatörün kabloları uyguladığı yer değiştirme ile kablolardeki meydana gelen gerilim değişiklik gösterir ve bu gerilmelerin katlara etkisi ile yapısal aktif kontrol sağlanır. Örnek olarak, eğer yapı modeli her iki yatay yönde de kontrol edilmek isteniyorsa her katta sekiz kablo ve dört aktüatöre ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyicili yapı modeli, bir aktüatör ve kütle sönümleyicisinden oluşur. Fiziksel modelleme sırasında ise Şekil 2'de görüldüğü gibi bir sönümleyici ve bir yay elemanından oluşuyormuş gibi analizler yapılır. Aktif kontrol sistemlerinin yakın fay deprem hareketi gibi yapılarda önemli hasarlara yol açan depremlere karşı yapısal tepkiler üzerindeki performansı, yapısal kontrol mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir. Ancak pratikte bu sistemlerin bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan bazıları yapıya uygulanacak yüksek enerjinin elde edilmesi, kurulum ve bakım maliyetleridir (Forrai ve diğ., 2001). Bunun dışında kontrol tekniği eksiklikleri, modelleme hataları, zaman gecikmesi, yapının doğrusal olmaması, yapı parametrelerinin belirsizliği, sınırlı sensörler ve kontrol elemanları aktif kontrol sistemlerinin dezavantajları arasında gösterilebilir (Soong, 1990). Bu tip dezavantajların önüne geçilebilmesi için yapılan teorik çalışmalarda farklı problemler için farklı kontrol teknikleri uygulamaları mevcuttur. Bu kontrol teknikleri doğrusal ve akıllı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Oransal-integral-türev (PID),  $H_{\infty}$  ve doğrusal optimum kontrolörler (LQR ve LQG), yapıların doğrusal kontrolünde kullanılan kontrolörlerdir. Yapay sinir ağları, bulanık mantık, kayan kipli kontrollör ise akıllı kontrollör olarak gösterilebilir.

PID kontrolör özellikle endüstri alanında yaygın olarak kullanılan bir kontrolördür. Yapısal kontrolde de kullanımının yaygın hale getirilebilmesi için birçok akademik çalışmada kontrollör olarak kullanılmış ve deprem etkisine karşı yapısal tepkimelerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Ulusoy, Bekdas ve Nigdeli, 2020; Kayabekir ve diğ., 2020; Kayabekir, Bekdas ve Nigdeli, 2021) PID kontrolörünün kontrol sinyalinin denklemi Denklem 1'de verilmiştir.

Şekil 2

Aktif tendonlu ve aktif kütle sönümleyicili yapı modeli



$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

Burada yapının denge durumundaki yapısal tepkimesi ile yapının depreme maruz kalması sonucu oluşan zamana bağlı yapısal tepkime hata sinyali  $e(t)$ 'yi vermektedir.  $K_p$ ,  $T_i$  ve  $T_d$  sırasıyla orantı katsayısı, integral zaman katsayısı ve türev zaman katsayısıdır.  $U(t)$  ise zamana bağlı kontrol sinyalini ifade etmektedir.

Lineer ikinci dereceden optimal kontrolör (LQR), Denklem 2'de verilen klasik performans indeksi  $J$ 'nin minimize edilmesi olarak tanımlanır ve yapıları kontrol etmek için en yaygın kontrol algoritmalarından biridir. Ancak LQR kontrolör kullanımının en büyük dezavantajı, geri besleme için tüm yer değiştirme ve hız değerlerine ihtiyaç duymasındır.

$$J = \int_0^{t_f} [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (2)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$u(t) = Fz(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B^T P z(t) \quad (4)$$

$Q$  ve  $R$  kütle matrisini,  $t_f$  dış uyarım süresinden daha uzun bir zaman aralığıdır ve  $z(t)$  yer değiştirme ve hız vektörlerini içeren  $2n$  boyutlu bir durum vektörünü ifade etmektedir. Denklem 4 'de verilen kontrol kuvveti  $u(t)$ 'nin elde edilmesi için Yang ve Akbarpour (1987) çalışmasındaki Ricatti matrisinin kesme yapı modeli için çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, bazı durumlarda lineer ikinci dereceden optimal kontrolöre Kalman filtresinin (yapısal tepkimeler için bir gözlemci) eklenmesiyle oluşturulan lineer ikinci dereceden gauss (LQG) denetleyicisi de yapısal kontrol tekniği olarak kullanılmaktadır.

$H_{\infty}$  kontrolörü, dinamik yükler etkisi altındaki yapıların aktif kontrolünde geniş bir kullanım alanına sahip olan dirençli kontrol tekniklerinden biridir. Öte yandan, yapılarda  $H_{\infty}$  kontrolörünün uygulanması, sayısal zorluklar ve yüksek hesaplama maliyeti gibi bazı sorunlara yol açan yüksek dereceli bir sistem oluşturması nedeniyle pratik değildir (Anderson, 1993; Anderson ve Liu, 1987). Bu kontrolör, deprem yer hareketi gibi dış uyarımlar ile yapısal reaksiyonlar arasındaki ilişkiyi tanımlayan  $H_{\infty}$  norm transfer fonksiyonlarını en aza indirmeyi amaçlar.  $H_{\infty}$  norm transfer fonksiyonu performans indeksi olarak kabul edilir ve Arfiadi ve Hadi'nin (2000) çalışmasındaki aktif kontrollü yapılar için aşağıdaki gibi hesaplanır:

- Denklem 5'te verilen Hamiltonian Matrisi  $H'$ 'yi tanımlayın.
- Pozitif bir sayı seçin  $\gamma$ .

- Çalışmada bahsedilen  $A_{cl}$ ,  $E$  ve  $C_z$  gibi matrisleri içeren Hamiltonian Matrisinin özdeğerini hesaplayınız.
- Hamiltonian Özdeğerini kontrol edin (karmaşık sayı olup olmadığını).
- $\gamma$  sayısını azaltın/arttırın.
- $H_\infty$  normu transfer fonksiyonu olan  $\gamma$  sayısının son değerini bulunuz.

$$H = \begin{bmatrix} A_{cl} & \gamma^2 EE^T \\ -C_z C_z^T & -A_{cl}^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

Kayan kipli kontrolör dirençli kontrolörler arasında yer alır. Bu kontrolör bir anahtarlama sinyali ile yapısal reaksiyonları kayma yüzeyine getirerek yapının titreşim kontrolünü sağlamaktadır. Yapısal reaksiyon kayma yüzeyine getirildiğinde takdirde, aktif kontrollü yapı modeli yapısal belirsizlikler, parametre değişimleri veya dış uyarımlardan bağımsız hale getirilir. Bu davranış, yapıların bu kontrolör ile aktif olarak kontrol edilmesine öncelik verir, ancak anahtarlama sinyali ve diğer faktörler aracılığıyla çatırdama problemi olarak bilinen yüksek frekans ve genlikli istenmeyen bir salınım olayı meydana gelebilir. Çatırdama problemi, kontrol sisteminin ömrünü kısaltan ve gereksiz enerji tüketimine neden olan olumsuz bir etkidir. Denklem 6' da verilen kontrol kuvveti  $U_{eq}(z, t)$  hesabı ise Adhikari ve Drazenovre (1997) ile Yakut ve Allı'nın (2011) çalışmalarından alınmıştır.  $S$  (1x2) boyutlu bir sabit matris,  $a_g(t)$  yer hareketi ve  $\delta$  deprem etki vektörüdür.

$$U_{eq}(z, t) = -(SD_1)^{-1}[SAz(t)] + SD_2 a_g(t) \quad (6)$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H \end{bmatrix}, \quad B = [-1 \ 0 \ 0 \dots n]^T, \quad H = -M\delta \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1} & K - M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (8)$$

Bulanık mantık kontrolü (FLC), hem giriş/çıkış değişkenleri hem de sistemin sezgisel davranışını dikkate alarak yapısal tepkiler üzerindeki yeterli performansı, basitliği ve dirençli kontrol sağlaması nedeniyle yapısal kontrol uygulamalarında tercih edilmektedir. FLC ayrıca diğer klasik kontrol tekniklerine kıyasla daha esneklik. FLC optimal kontrol sağlamaz ve bulanıklaştırmanın yanı sıra durulaştırma da oldukça karmaşıktır. Yapıların FLC ile aktif kontrolü için Aldawod ve diğ. (1999) çalışmalarında aşağıdaki kuralları dikkate almışlardır:

- Verilen verilerin giriş ve çıkış uzayları küçük, orta ve büyük bulanık bölgelere ayrılır.
- Bulanık kurallar, verilen verilerden oluşturulur.
- Oluşturulan kurallar arasındaki çelişkileri çözmek için oluşturulan kuralların her birine bir derece tayin edilir.
- Hem oluşturulan kurallara hem de uzmanlar tarafından atanan ditsel kurallara dayalı olarak birleşik bir bulanık kural tabanı oluşturulur.
- Birleşik bulanık kural tabanında eşleme, durulaştırma işlemi kullanılarak belirlenir.

Özellikle doğrusal olmayan yapıların kontrolü için birçok çalışmada (Kim, Jung ve Lee, 2000; Kim, Seo ve Lee, 2004; Bani-Hani ve Ghaboussi, 1998; Ghaboussi ve Joghataie, 1995) sinir ağları ile kontrol önerilmiştir. Sinir ağlarıyla kontrolde, sensör ölçümleri ile aktüatörün sinyali arasındaki transfer fonksiyonunu deneyimlemek için eğitilmiş emülatör sinir ağının eğitimi ile gerçekleştirilir. Böylece, emülatör sinir ağı, sensör ölçümlerinin gelecekteki değerlerini tahmin edebilir. Yapay sinir ağları ile yapı kontrolünde,

Denklem 9'da verilen  $J$  maliyet fonksiyonu en aza indirgenir. Burada  $k$  örnekleme sayısını,  $N_f$  ise örnekleme zamanının toplam sayısını göstermektedir.

$$J = \sum_{k=0}^{N_f-1} \{z_{k+1}^T Q z_{k+1} + u_k^T R u_k\} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_f-1} J_k \quad (9)$$

## Literatür Araştırması

### Aktif Tendon Sistemleri

Çerçeve ve köprü örnekleri, aktif kontrollü yapının temel teorisini açıklamak için önce çaprazlı pasif bir sistem, daha sonra ise aktif tendon sistem olarak modellenmiştir (Manolis ve Soong, 1987). Aktif tendonlu yapı sistemlerinde, modelin geometrisinde ve malzeme kullanımında optimizasyonun mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır. Analitik ve simülasyon teknikleri ile elde edilen aktif tendon sistemli tek serbest dereceli yapı modelinin yapısal tepkileri ve zaman gecikmesini dikkate alan gerçek bir yapı modelinin yapısal tepkimeleri kıyaslanmıştır (Chung, Reinhorn ve Soong, 1988). Deneysel ve analitik sonuçların yapı üzerinde benzer davranış gösterdiğini ve bunun gerçek sistemlere uygulanabileceğini gösterilmiştir. Daha sonrasında Chung ve diğ. (1989) aktif tendon sistemli yapı modelinin serbestlik derecesini artırarak, analitik ve deneysel olarak yeniden analiz etmişlerdir. İki farklı algoritma (doğrusal ve ani optimum kontrol algoritması) tarafından elde edilen sonuçlara dayanarak, zaman gecikmesi probleminin giderilmesi için algoritmalarda modifikasyonlara ihtiyaç duyulacağını belirtmişlerdir. Tam ölçekli aktif tendonlu sistemlerde hız ve yerdeğiştirme beslemesine kıyasla daha dirençli ve etkili bir geri besleme stratejisi sunan ivme geri beslemesinin kullanımın uygun olduğu görülmüştür (Dyke ve diğ., 1996). Doğrusal olmayan yapılar için bir kontrol teorisi (Wong, Hart, 1997),  $\alpha$  parametresini içeren değiştirilmiş doğrusal ikinci dereceden düzenleyici (MLQR) (Aldemir ve Bakioğlu, 2001), bozulma tahmin filtreli kayan modlu bulanık kontrolör (SMFC) (Kim, Yun ve Spencer, 2004), enerjiye dayalı yeni bir teknik (enerji dengesi denklemi ve LQR'nin birleşimi) (Alavinasab ve Muharrami, 2006), düzensiz bir yapı için  $H_\infty$  doğrudan çıkış geri besleme kontrolör (Lin, Chang ve Wang, 2010), LQR algoritmasında blok darbe fonksiyonu (Ghaffarzadeh ve Younespour, 2014), sinirsel kontrol tekniği (Biğdeli ve Kim, 2014) dalgacık tabanlı kutup atama yöntemi (Amini ve Samani, 2014) ve metasezgisel ayarlı PID kontrolörü (Ulusoy, Nigdeli ve Bekdaş, 2021) aktif tendonlu sistemlerin performansını artırmayı ve yapısal kontrolde ortaya çıkacak problemleri minimize etmeyi hedefleyen çalışmalar olarak örnek verilebilir.

### Aktif Kütle Sönümleyici

Aktif Kütle Sönümleyici, ATMD ve aktif tendonlu sistemlerin karışıklı üstünlükleri bir çok çalışma yapılmıştır (Abdel-Rohman ve Leipholz, 1983; Ulusoy ve diğ., 2021). Rüzgar yüküne maruz kalan ATMD'li yapıları, aktif olarak kontrol etmek için yer değiştirme, hız ve ivme geri beslemesi gibi çeşitli geri besleme stratejileri bu aktif kontrol sistemi içinde uygulanmıştır (Ankireddi ve Yang, 1996). Yine aynı şekilde aktif tendonlu sistemlerde olduğu gibi farklı kontrol teknikleri kullanılarak ATMD yapı modelinin performansının artırılması hedeflenmiştir. Azaltılmış modelleme tekniği (Qu, Shi ve Hua, 2001) LQR ve FLC arasında karşılaştırma (Samali ve Aldawod, 2003) LQG ve FLC kıyaslaması (Pourzeynali, Lavasani ve Modarayi, 2007), Genetik algoritma ve FLC kombinasyonu (Gucu ve Yazıcı, 2009), kendinden ayarlı bulanık mantık kontrolörü (STF-

LC) ve Bulanık Orantılı-İntegral-Türev (FPID) kontrolörü kıyaslaması (Guclu ve Yazıcı, 2009) ve PID kontrolörü ile hibrit sezgisel algoritmaların kullanılması (Kayabekir, Bekdas ve Nigdeli, 2021) gibi birçok çalışma örnek verilebilir.

### Yöntem

Bu bölümde, aktif tendon sistemli ve aktif kütle sönümleyicili yapı modellerinde, aktif kontrolün sağlanabilmesi için uygulanacak kontrol tekniği (optimum parametrelere sahip PID kontrolör) açıklanacaktır. Yapısal modellerinde, seçilen geri besleme tipine göre dış uyarımlar etkisi altında bir hata sinyali oluşur. Bu hata sinyalini minimum değere indirmek için, PID kontrolörün Denklem 1’deki parametrelerinin optimum değerleri, literatürde mevcut olan sezgisel algoritmalarından veya modifiye edilmiş sezgisel algoritmalarından veya yeni bir sezgisel algoritmadan yararlanılarak iteratif olarak hesaplanır. Bu algoritmalara öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon (Rao, Savsani ve Vakharia, 2011), harmoni arama algoritması (Geem, Kim ve Loganathan, 2001) çiçek tozlaşma algoritması (Yang, 2012), Jaya algoritması (Rao, 2016) örnek olarak verilebilir. Bu algoritmalarından örnek olarak Çiçek tozlaşma ve armoni arama algoritması algoritmanın akış diyagramları Şekil 3’te verilmiştir. Farklı doğa olaylarından esinlenerek ortaya çıkan metasezgisel algoritmalar yapısal olarak farklılıklar içermektedir. Fakat elde edilen amaç fonksiyonu benzerlik göstermektedir. Yapısal farklılıkların neticesinde sonuçların hesaplama süreleri, optimum parametre değerleri ve amaç fonksiyonun sayısal değerleri küçük sapmalar dahilinde farklılık gösterebilmektedir. Yapısal tepkimeleri minimize edilmiş aktif tendonlu sistemin tek veya çok serbest dereceli yapı modellerinin hareket denklemleri ise sırasıyla Denklem 10-11’de verilmiştir. Burada  $a_1$  tek serbest dereceli yapı modelinin ivmesini,  $v_1$  hızını,  $x_1$  yer değiştirmesini,  $k_c$  tendon rijitliğini,  $\alpha$  tendonların zeminle yaptığı açığı,  $m_1$  yapı modelinin kütlelerini,  $k_1$  rijitliği,  $c_1$  sönümü ve  $a_g$  yer ivmesi temsil etmektedir. [M], [C] ve [K] sırasıyla kütle sönüm ve rijitlik matrisleridir. [b] birim matrisi temsil etmektedir. Optimizasyon süreci Matlab (2015) ve Matlabın bir alt programı simulinkte gerçekleştirilmiştir. Diferansiyel denklemin çözümü için dördüncü derceden Runge kutta metodundan adım aralığı  $h=0.001$  alınarak yararlanılmıştır. Bu metoda ait eğim denklemleri Denklem 12-16’da verilmiştir.

$$m_1 a_1(t) + c_1 v_1(t) + k_1 x_1(t) = -m_1 a_g(t) - 4k_c u_1(t) \cos \alpha \quad (10)$$

$$[M] \cdot a(t) + [C] \cdot v(t) + [K] \cdot x(t) = -[M] \cdot \{1\} \cdot a_g(t) - (4k_c u_1(t) \cos \alpha) [b] \quad (11)$$

$$k_1 = f(x_2, y_2) \quad (12)$$

$$k_2 = f\left(x_2 + \frac{1}{2}h, y_2 + \frac{1}{2}k_1 h\right) \quad (13)$$

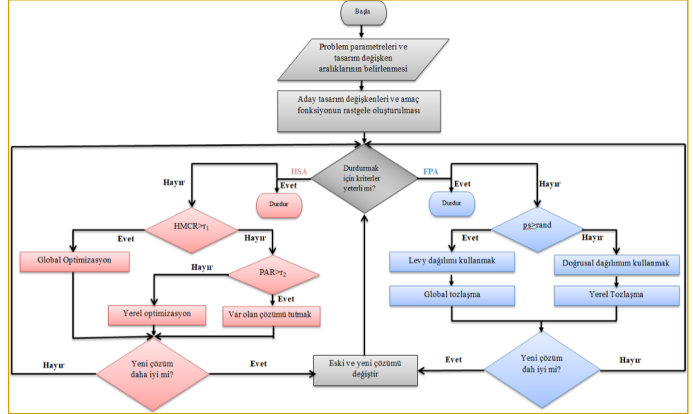
$$k_3 = f\left(x_2 + \frac{1}{2}h, y_2 + \frac{1}{2}k_2 h\right) \quad (14)$$

$$k_4 = f\left(x_2 + \frac{1}{2}h, y_2 + \frac{1}{2}k_3 h\right) \quad (15)$$

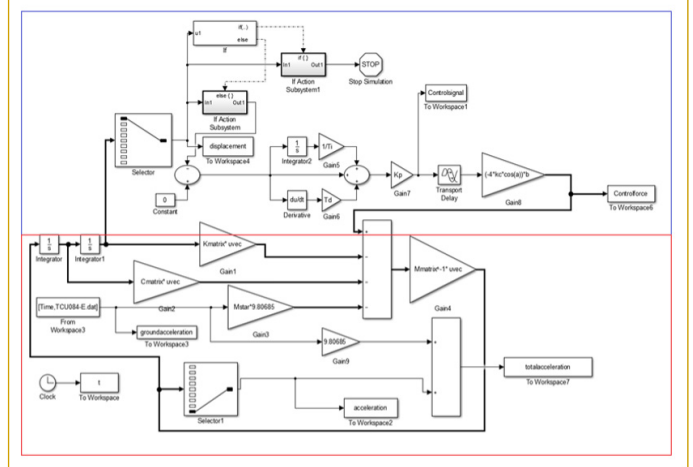
$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (16)$$

Denklem 11 verilen çok serbest dereceli yapı modelinin hareket denkleminin Simulinkteki blok diyagramı Şekil 4’te gösterilmiştir. Mavi alan içerisinde yer alan bölüm kontrollü yapı modelinde kontrol kuvvetinin zaman gecikmesini dikkate alarak eklenmesi gösterirken, mavi bölüm kontrolsüz yapı modelinin hareket denklemini ifade etmektedir. Bu örnekte birinci katın yer değiştirmesi hata sinyali olarak kabul edilmiş TCU084-E.dat deprem kaydı altında PID parametreleri belirlemiştir. Hata sinyalinin kontrolsüz

Şekil 3 İki farklı metasezgisel algoritmanın (çiçek tozlaşma (FPA ve harmoni arama algoritması (HSA)) akış diagramları



Şekil 4 Çok serbest dereceli aktif tendonlu sistemin blok diagramı



durumda fazla çıkmaması için eğer fonksiyonu yerleştirilmiştir. Zaman gecikmesi 0.02 ms olarak kabul edilerek, kontrol sinyali ve buna bağlı olarak yapıya uygulanması gereken kontrol sinyali değerleri deprem datasının her adımı için hesaplanmıştır. Örnek olarak kısaca bahsedilen bu yöntemle kontrol sistemi optimum olarak tasarlanmaktadır.

### Başarım Sonuçları

Bu çalışmada, yapılar aktif kontrol türleri, aktif kontrol teknikleri ve aktif yapısal kontrol ile ilgili çalışmalar gözden geçirilerek özetlenmiştir. Elden edilen sonuçlar ise aşağıdaki gibidir:

Aktif yapı kontrolünde bilinmeyen yer hareketinin tahminine, zaman gecikme etkisine, kontrol kuvveti kapasitesine, geri besleme stratejisine, geometrik ve malzeme doğrusal olmayan davranışa, zemin-yapı etkileşimine, yapıların düzensizliğine, yer hareketi veya rüzgar tipine, yapısal belirsizliklere, hesaplama sürelerine, kurulum maliyetine ve kontrolörlerde optimum parametrelerinin elde edilmesine dikkat edilmelidir.

Aktif yapısal kontrol, yapısal reaksiyonları azaltmada pasif yapısal kontrole kıyasla %30-50 arasında daha iyi performans göster-



mektedir. Bu nedenle yakın fay yer hareketi depremlere karşı aktif kontrol sistemlerin kullanılması gerekmektedir.

Çeşitli kontrol teknikleri, gerçek yapısal uygulamalarda farklı problemlere sahiptir ve her birinin yapısal reaksiyonlar üzerinde farklı bir etkisi vardır. Bu problem gidermek için literatürde yapılan çalışmalar dikkatte alınmalıdır.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that there are no competing interests.

## Kaynaklar

- Abdel-Rohman, M., Leipholz, H.H. (1983). Active Control of Tall Buildings. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 109, 628-645. [\[Crossref\]](#)
- Adhikari, R., & Yamaguchi, H. (1997). Sliding mode control of buildings with ATMD. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 26(4), 409-422. [\[Crossref\]](#)
- Alavinasab, A., Muharrami, H. (2006) Active Control of Structures Using Energy-Based LQR Method. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21, 605-611. [\[Crossref\]](#)
- Aldawod, M., Naghdy, F., Samali, B., & Kwok, K. C. S. (1999, August). Active control of wind excited structures using fuzzy logic. In FUZZ-IEEE'99. 1999 IEEE International Fuzzy Systems. Conference Proceedings (Cat. No. 99CH36315) (Vol. 1, pp. 72-77). IEEE. [\[Crossref\]](#)
- Aldemir, U., Bakioğlu, M., (2001) A new Numerical Algorithm for Sub-optimal Control of Earthquake Excited Linear Structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50, 2601-2616. [\[Crossref\]](#)
- Amini, F., Samani, M.S. (2014). A Wavelet-Based Adaptive Pole Assignment Method for Structural Control. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29, 464-477. [\[Crossref\]](#)
- Anderson, B. D. (1993). Controller design: moving from theory to practice. *IEEE Control Systems Magazine*, 13(4), 16-25. [\[Crossref\]](#)
- Anderson, B. D., & Liu, Y. (1987). Controller reduction: concepts and approaches. In 1987 American Control Conference (pp. 1-9). IEEE.
- Ankireddi, S. and Y. Yang, H. T., (1996) Simple ATMD control methodology for tall buildings subject to wind loads. *Journal of Structural Engineering*, 122(1), 83-91. [\[Crossref\]](#)
- Arfiadi, Y., Hadi, M.N.S., (2000). Passive and Active Control of Three-dimensional Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 377-396. [\[Crossref\]](#)
- Bani-Hani, K., & Ghaboussi, J. (1998). Neural networks for structural control of a benchmark problem. active tendon system. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 27(11), 1225-1245. [\[Crossref\]](#)
- Biğdeli, Y., Kim, D. (2014) Active Control Of 3-D Irregular Building by using Energy Based Neuro- Controller. *Advances in Structural Engineering Vol. 17*, No. 6. [\[Crossref\]](#)
- Chung, L. L., Reinhorn, A. M., & Soong, T. T. (1988). Experiments on active control of seismic structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 114(2), 241-256. [\[Crossref\]](#)
- Chung, L. L., Lin, R. C., Soong, T. T., & Reinhorn, A. M. (1989). Experimental study of active control for MDOF seismic structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(8), 1609-1627. [\[Crossref\]](#)
- Dyke, S. J., Spencer Jr, B. F., Quast, P., Sain, M. K., Kaspari Jr, D. C., & Soong, T. T. (1996). Acceleration feedback control of MDOF structures. *Journal of engineering mechanics*, 122(9), 907-918. [\[Crossref\]](#)
- Forrai, A., Hashimoto, S., Funato, H., & Kamiyama, K. (2001). Structural control technology: system identification and control of flexible structures. *Computing & Control Engineering Journal*, 12(6), 257-262. [\[Crossref\]](#)
- Geem, Z.W; Kim J.H.; Loganathan G.V. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, Simulation. 2001, 76, 60-68. [\[Crossref\]](#)
- Ghaboussi, J., Joghataie, A. (1995). Active Control of Structures Using Neural Networks. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 115, 2897-2913.
- Ghaffarzadeh, H., Younespour, A. (2014). Active Tendons Control of Structures Using Block Pulse Functions. *Structural Control and Health Monitoring*, 21, 1453-1464. [\[Crossref\]](#)
- Guclu, R.; Yazici, H. Seismic-vibration mitigation of a nonlinear structural system with an ATMD through a fuzzy PID controller. *Nonlinear Dynamics*, 2009, 58(3), 553. [\[Crossref\]](#)
- Guclu, R., and Yazici, H. (2009). Self-tuning fuzzy logic control of a non-linear structural system with ATMD against earthquake. *Nonlinear Dynamics*, 56(3), 199. [\[Crossref\]](#)
- Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Geem, Z. W. (2020). Optimum design of PID controlled active tuned mass damper via modified harmony search. *Applied Sciences*, 10(8), 2976. [\[Crossref\]](#)
- Kayabekir, A. E., Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2021). A hybrid metaheuristic method for optimization of active tuned mass dampers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. [\[Crossref\]](#)
- Kim, J. T., Jung, H. J., & Lee, I. W. (2000). Optimal structural control using neural networks. *Journal of engineering Mechanics*, 126(2), 201-205. [\[Crossref\]](#)
- Kim, D. H., Seo, S. N., & Lee, I. W. (2004). Optimal neurocontroller for nonlinear benchmark structure. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4), 424-429. [\[Crossref\]](#)
- Kim, S. B., Yun, C. B., & Spencer Jr, B. F. (2004). Vibration control of wind-excited tall buildings using sliding mode fuzzy control. *Journal of engineering mechanics*, 130(4), 505-510. [\[Crossref\]](#)
- Lin, C. C., Chang, C. C., & Wang, J. F. (2010). Active control of irregular buildings considering soil-structure interaction effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(3), 98-109. [\[Crossref\]](#)
- Manolis, G.D., Soong, T.T. (1987). Active Structures. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 113, 2290-2302. [\[Crossref\]](#)
- MathWorks Inc., 2015, MATLAB R2015b. Natick, MA, USA.
- Pourzeynali, S., Lavasani, H. H., Modarayi, A. H. (2007). Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms. *Engineering Structures*, 29(3), 346-357. [\[Crossref\]](#)
- Qu, Z. Q., Shi, Y., Hua, H. (2001). A reduced-order modeling technique for tall buildings with active tuned mass damper. *Earthquake engineering & structural Dynamics*, 30(3), 349-362. [\[Crossref\]](#)
- Rao, R.V, 2016, Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34. [\[Crossref\]](#)
- Rao, R.V, Savsani, V.J, Vakharia, D.P (2011). Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315. [\[Crossref\]](#)
- Samali, B., Al-Dawod, M. (2003). Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller. *Engineering Structures*, 25(13), 1597-1610. [\[Crossref\]](#)
- Soong, T. T. (1990). Active Structural Control: Theory and Practice. Lorgindra Scieric & Ulusoy, S., Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2020). Active structural control via metaheuristic algorithms considering soil-structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics*, 75(2), 175-191.

36. Ulusoy, S., Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2021). Novel metaheuristic-based tuning of PID controllers for seismic structures and verification of robustness. *Journal of Building Engineering*, 33, 101647. [\[Crossref\]](#)
37. Ulusoy, S., Kayabekir, A. E., Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2021). Metaheuristic-Based Structural Control Methods and Comparison of Applications. In *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms for Engineering Optimization Applications* (pp. 251-276). Springer, Singapore. [\[Crossref\]](#)
38. Wong, K.K.F., Hart, G.C. (1997). Active Control of Inelastic Structural Response During Earthquakes. *The Structural Design of Tall Buildings*, 6, 125-149. [\[Crossref\]](#)
39. Yakut, O., Alli, H. (2011). Neural Based Sliding-Mode Control with Moving Sliding Surface for the Seismic Isolation of Structures. *Journal of Vibration and Control*, 17, 2103-2116. [\[Crossref\]](#)
40. Yang, X.S. Flower Pollination Algorithm for Global Optimization. In: *International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation*, Springer, Berlin, Heidelberg. 2012, 240-249. [\[Crossref\]](#)
41. Yang, J. N., & Akbarpour, A. (1987). Some practical considerations for structural control. National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report No. NCEER-TR-87-0018.



# **BÖLÜM 3**

# **MEKANİK SİSTEMLERİN**

# **HAREKET DENKLEMLERİ**

Mehmet Berat BİLGİN  
Sinan Melih NİGDELİ  
Gebrail BEKDAŞ

# Mekanik Sistemlerin Hareket Denklemleri

## Equations of Motion of Mechanical Systems

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu bölümde kısaca tek ve iki serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemleri verilmiştir. Analiz ve tasarım aşamalarında bu sistemler ile idealleştirilmiş kontrol edilen yapıların içinde olduğu mekanik sistemler ve kontrol sistemleri incelenmektedir. Hareket denklemlerinin çıkarımı hem Newton hem de Lagrange yöntemi kullanılarak sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Hareket denklemleri, Newton metodu, Lagrange yöntemi

### ABOUT the CHAPTER

In this section, the equations of motion of systems with one and two degrees of freedom are briefly given. During the analysis and design stages, mechanical systems and control systems, including these systems and idealized controlled structures, are examined. The derivation of equations of motion is presented using both Newtonian and Lagrange methods.

**Keywords:** Equations of motion, Newton's method, Lagrange's method

## Giriş

Kontrol sistemlerinin tasarımında kontrol edilen sistemin davranışına göre optimum tasarım değişkenleri belirlenmelidir. Bu durumda sistemlerin dinamik analizinde diferansiyel denklem olan hareket denklemi titreşim olduğu zaman boyunca analiz edilmelidir. Bunun için özellikle etkin olan yapı serbestlikleri dikkate alınarak oluşturulan idealleştirilmiş sistemlerin analizi yapılmaktadır.

Günümüzde yüksek yapılara uygulanmış ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımında sistem ve kontrol sisteminin kütle, rijitlik ve sönümüne göre idealleştirilmiş bu sistemler kullanılmıştır (Bekdaş ve Niğdeli, 2011; 2013; 2017; Bekdaş vd. 2018; Kayabekir vd, 2020; 2021, Niğdeli ve Bekdaş, 2017; Yucel vd. 2021).

Bu bölümde tek ve iki serbestlik dereceli mekanik sistemin hareket denklemi Newton ve Lagrange metodlarına göre açıklanmıştır.

## Hareket Denklemleri

Kuvvet (F), kütle (m), uzunluk (u) ve zaman (t) mekanikte kullanılan temel tanımlardır ve Newton'un ikinci yasası gereği birbirleriyle ilişkilidirler:

$$F = \frac{d}{dt} \left( m \frac{du}{dt} \right) = m\ddot{u} \quad (1)$$

Bu denklemde " $\ddot{u}$ ", uygulanan kuvvet yönündeki yerdeğiştirmeyi belirtirken, " $\frac{du}{dt}$ " hızı temsil etmektedir ve " $\dot{u}$ " ile gösterilebilir. Bilindiği üzere hızın zaman göre türevi ise ivmeyi " $\ddot{u}$ " vermektedir. Bu  $u$ ,  $\dot{u}$  ve  $\ddot{u}$  gösterimleri "Newton notasyonu" olarak da sınıflandırılır.

Newton'un ikinci yasasına göre bir cisme etkiyen tüm dış etkiler dengede değilse, bu durum cismin ivme kazanmasına sebep olacaktır. Burada dinamik bir problemi, statik bir problem gibi analiz etmemizi sağlayan "*d'Alembert ilkesi*" devreye girmektedir. Böylece Denklem 1'deki " $m\ddot{u}$ " bileşeni, dış kuvvetlerin sonucu olarak meydana gelen bir atalet kuvveti olarak kabul edilir ve sistemin, her bir zaman aralığında dengede olacağı düşünülebilir. Bu bilgiye istinaden Denklem 1'i tekrar yazacak olursak;

$$F - m\ddot{u} = F - F_m = 0 \quad (2)$$



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.



Mehmet Berat Bilgin

Sinan Melih Niğdeli

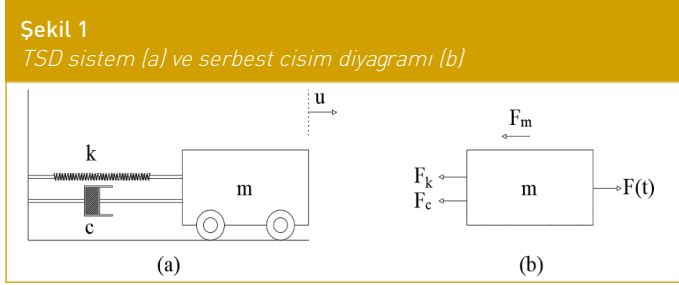
Gebrail Bekdaş

Istanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul,  
Türkiye  
E-posta: bekdas@iuc.edu.tr

**Bu bölümü alıntıla / Cite this chapter as:**  
Bilgin, M. B., Niğdeli, S. M., & Bekdaş,  
G. (2023). Mekanik sistemlerin hareket  
denklemleri. G. Bekdaş, & S. M. Niğdeli (Ed.),  
*Ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum  
ayarlanması* içinde [s. 16-18]. İstanbul: İÜÇ  
Yayınevi.

elde edilebilir. Burada yer alan " $F_m$ ", "*d'Alembert kuvveti*" olarak adlandırılır ve her zaman ivmenin tersi yönde etmektedir. Genel olarak bakıldığında d'Alembert ilkesi, Newton'un ikinci yasasından pek farklı olmasa da sanal iş vb. yöntemlerin dinamiğe uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Yukarıda anlatılanlar ışığında tek serbestlik dereceli (TSD) bir sistemin hareket denklemleri, (d'Alembert ilkesi göz önünde bulundurularak) dinamik sistemin serbest cisim diyagramının çizilmesi ve statik olarak analiz edilmesi ile oluşturulabilir (Şekil 1).



Newton mekaniği kullanılarak " $F_k$ " (sistemi denge pozisyonuna döndürmeye çalışan yay kuvveti) ve " $F_c$ " (sönüm kuvveti) ile birlikte hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$F(t) - F_k - F_c = m\ddot{u} \quad (3)$$

Burada " $F(t)$ ", sisteme etkiyen dinamik kuvveti temsil etmektedir ve istenildiği takdirde deprem yer hareketini simgeleyen atalet kuvveti " $m\ddot{u}_g$ " olarak alınabilir. d'Alembert ilkesi gözetilerek Denklem 3, aşağıdaki gibi revize edilebilir:

$$F(t) - F_k - F_c - F_m = 0 \quad (4)$$

Denklem 4, içerisinde yer alan terimler açılarak ve  $F(t) = -m\ddot{u}_g$  olacak şekilde yazılırsa,

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (5)$$

bağıntısı elde edilebilir. Burada " $k$ " rijitliği, " $c$ " ise sönüm katsayısını temsil etmektedir.

Hareket denklemlerini yazmak için korunumlu ve korunumsuz kuvvetlerin yaptıkları sanal işleri dikkate alan "*Lagrange Denklemleri*"nden de yararlanabilir. Mekanikte önemli bir yere sahip olan bu diferansiyel denklemler (Denklem 6) sistemin kinetik, potansiyel ve sönüm enerjilerinin belirli bir sistematikte yazılarak genelleştirilmiş koordinatlara göre türevlerinin alınmasını öngörür.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial (KE)}{\partial \dot{u}_i} \right) - \frac{\partial (KE)}{\partial u_i} + \frac{\partial (PE)}{\partial u_i} + \frac{\partial (DE)}{\partial \dot{u}_i} = F_i \quad (6)$$

Bu denklemde yer alan KE, PE ve DE sırasıyla kinetik enerji, potansiyel enerji ve sönüm enerjisini belirtmektedir. TSD bir sistemin kinetik enerjisi,

$$KE = \frac{1}{2} m \dot{u}^2 \quad (7)$$

Potansiyel enerjisi,

$$PE = \frac{1}{2} k u^2 \quad (8)$$

Sönüm enerjisi ise,

$$DE = \frac{1}{2} c \dot{u}^2 \quad (9)$$

denklemleriyle ifade edilebilir. Bu ifadeler Denklem 6'da yerlerine konularsa,

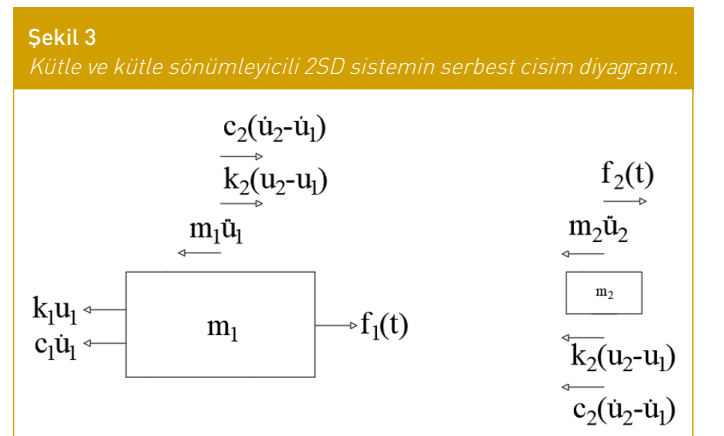
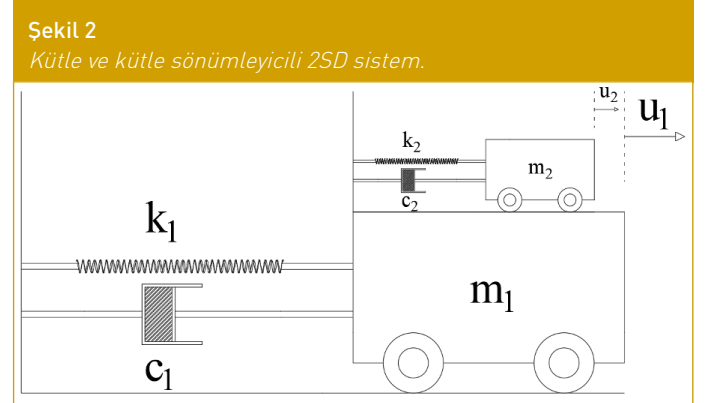
$$\frac{d}{dt} (m\dot{u}) - 0 + ku + c\dot{u} = F_i \quad (10)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklem de düzenlenip, hareket denklemleri olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_i \quad (11)$$

Görüldüğü üzere Newton metodu kullanılarak geliştirilen hareket denklemleri (Denklem 5) ile Lagrange metodu uygulanarak elde edilen hareket denklemleri (Denklem 11) benzerdir.

TSD sistemleri iyi tanımak önem arz etmektedir. Çünkü çok serbestlik dereceli (ÇSD) bir sistemin, birden çok TSD sistemin bir araya gelmesiyle oluştuğu söylenebilir. TSD sistemlerin hareket denklemleri hakkında bilgi verdikten sonra bir kütle ve kütle sönümleyicili iki serbestlik dereceli (2SD) bir sistemi ele alalım. Bu tip bir sistemi Şekil 2'deki gibi idealize edebilir, serbest cisim diyagramını ise Şekil 3'teki gibi gösterebiliriz. Burada ana kütleli ifade ederken kütle sönümleyiciyi temsil etmektedir.



Newton yöntemi ile ilk cisim için hareket denklemleri,

$$f_1 + k_2(u_2 - u_1) + c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) - k_1u_1 - c_1\dot{u}_1 - m_1\ddot{u}_1 = 0 \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifade düzenlenirse,

$$m_1\ddot{u}_1 + (c_1 + c_2)\dot{u}_1 - c_2\dot{u}_2 + (k_1 + k_2)u_1 - k_2u_2 = f_1 \quad (13)$$

elde edilir. Benzer bir şekilde ikinci kütle (kütle sönümleyici) için de hareket denklemi yazılıp düzenlendiğinde elde edilen ifade Denklem 15'te görülebilir:

$$f_2 - k_2(u_2 - u_1) - c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) - m_2\ddot{u}_2 = 0 \quad (14)$$

$$m_2\ddot{u}_2 + c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_2(u_2 - u_1) = f_2 \quad (15)$$

Denklem 13 ve Denklem 15 matrisler yardımıyla,

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada  $\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$  kütle matrisi (M),  $\begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}$  sönüm matrisi (C),  $\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$  rijitlik matrisi (K) olarak tanımlanır ve Denklem 16, matris formunda kısaca Denklem 17'deki gibi gösterilebilir:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f_i \quad (17)$$

Tüm sistemi bir yer ivmesi ( $\ddot{u}_g$ ) etkisi altında düşünürsek Denklem 17, Denklem 5'e benzer şekilde,

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f_i - M\ddot{u}_g \quad (18)$$

halini alacaktır ve açık bir şekilde yazıldığında Denklem 19'daki gibi görünecektir:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 - m_1\ddot{u}_g \\ f_2 - m_2\ddot{u}_g \end{bmatrix} \quad (19)$$

Sistemin hareket denklemini yine Lagrange Denklemleri yardımıyla oluşturacak olursak sistemin kinetik enerjisi,

$$KE = \frac{1}{2}m_1\dot{u}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{u}_2^2 \quad (20)$$

benzer şekilde potansiyel enerjisi,

$$PE = \frac{1}{2}k_1u_1^2 + \frac{1}{2}k_2(u_2 - u_1)^2 \quad (21)$$

ve sönüm enerjisi ise,

$$DE = \frac{1}{2}c_1\dot{u}_1^2 + \frac{1}{2}c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)^2 \quad (22)$$

olacaktır. Bu ifadeler, birinci kütle için ( $u_1$  ve  $\dot{u}_1$ 'e göre) Lagrange denklemine (Denklem 6) uygulanırsa,

$$\frac{d}{dt}(m_1\dot{u}_1) - 0 + k_1u_1 - k_2(u_2 - u_1) + c_1\dot{u}_1 - c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = f_1 \quad (23)$$

ifadesi elde edilirken, ikinci kütle için ( $u_2$  ve  $\dot{u}_2$ 'e göre) uygulanırsa,

$$\frac{d}{dt}(m_2\dot{u}_2) + k_2(u_2 - u_1) + c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = f_2 \quad (24)$$

bağıntısı elde edilir. Görüldüğü üzere Denklem 23, Denklem 13'le ve Denklem 24 ise Denklem 15 ile aynıdır. Matris formda ise Denklem 16 ve Denklem 19'daki gibi yazılabilir.

## Yorumlar

Bu bölüm içerisinde sunulan sistemler geliştirilerek kütle sönümleyici içeren yapılar içinde kullanılabilir. Burada alınan yatay yer değiştirme serbestliğine ek olarak çerçeve yapıların düğüm noktalarının dönemleri dahil tüm serbestlikleri, yapı-zemin etkileşimi için temel zeminin modellenmesi ve burulma düzensizliği bulunan yapı için dış merkezlik sonucunda oluşan dönme eklenebilir.

Sunulan iki serbestlik dereceli sistem, tek serbestlikle alınmış yapı ve üstüne eklenmiş bir kütle sönümleyici sistemin temsil edebilir. Kule türü kütlelerin genel anlamda bir noktada toplandığı varsayılan yapılar veya üst yapı esnekliğinin ihmal edilebileceği sismik izolasyonlu yapılarda bu yaklaşım yaygın olarak kullanılmaktadır.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that there are no competing interests.

## Kaynaklar

1. Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2011). Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search. *Engineering Structures*, 33(9), 2716-2723. [\[Crossref\]](#)
2. Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2013). Mass ratio factor for optimum tuned mass damper strategies. *International Journal of Mechanical Sciences*, 71, 68-84. [\[Crossref\]](#)
3. Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2017). Metaheuristic based optimization of tuned mass dampers under earthquake excitation by considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 443-461. [\[Crossref\]](#)
4. Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Yang, X. S. (2018). A novel bat algorithm based optimum tuning of mass dampers for improving the seismic safety of structures. *Engineering Structures*, 159, 89-98. [\[Crossref\]](#)
5. Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Geem, Z. W. (2020). Optimum design of PID controlled active tuned mass damper via modified harmony search. *Applied Sciences*, 10(8), 2976. [\[Crossref\]](#)
6. Kayabekir, A. E., Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2021). A hybrid metaheuristic method for optimization of active tuned mass dampers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. [\[Crossref\]](#)
7. Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2017). Optimum tuned mass damper design in frequency domain for structures. *KSCSE journal of civil engineering*, 21(3), 912-922.
8. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0829-2>
9. Yucel, M., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Sevgen, S. (2019). Estimation of optimum tuned mass damper parameters via machine learning. *Journal of Building Engineering*, 26, 100847. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 4**

# **AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN**

# **OPTİMİZASYONU**

Oğuz UZDİL  
Gebrail BEKDAŞ  
Sinan Melih NİGDELİ

# Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimizasyonu

## Optimization of Tuned Mass Dampers

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu bölüm ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımı amacıyla optimum parametreler (frekans oranı ve sönüm oranı) için literatürde önerilen denklemler tanıtılmaktadır. Denklemler kronolojik olarak araştırmacıların isimleri referans verilerek açıklanmıştır. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler, basit çalışma prensibi ve pratikte çok sayıda başarılı uygulama sayesinde yaygın olarak kullanılan yapısal kontrol sistemler haline gelmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yapısal kontrol, titreşim, ayarlı kütle sönümleyicileri

### ABOUT the CHAPTER

This section introduces the equations proposed in the literature for the optimum parameters (frequency ratio and damping ratio) for the optimal design of tuned mass dampers. The equations are explained chronologically with reference to the names of the researchers. Tuned Mass Dampers have become widely used structural control systems thanks to their simple operating principle and numerous successful applications in practice.

**Keywords:** Structural control, vibration, tuned mass dampers

## Giriş

Yapı sistemlerinin deprem, rüzgâr gibi dinamik dış etkilere karşı tepkisini azaltmak amacıyla kontrol altına alınması, yapının hedeflenen performans seviyelerine ulaşabilmeleri bakımından büyük önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda, yapılarda pasif, yarı aktif ve aktif olarak kategorize edilen kontrol sistemleri kurulabilir. Bu sistemlerden pasif kontrol sistemleri içerisinde yer alan Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD) hâlihazırda çok sayıda başarılı pratik uygulaması bulunan genellikle yüksek yapılarda tercih edilen kontrol sistemlerinde biridir. Özellikle bina türü yapılarda, dinamik etkilerin oluşturduğu titreşimlerin kontrolünde iyi performans gösterdiği bilinen pasif enerji cihazları kullanımı, diğer kontrol sistemlerine oranla daha yaygındır. Bu pasif enerji cihazlarından olan ayarlı kütle sönümleyici (TMD), dünya çapında çeşitli yapılarda kullanılan en eski titreşim kontrol cihazı olma özelliğine sahiptir. Performansı büyük ölçüde tasarım parametrelerine bağlı olan TMD'nin optimum tasarımında, TMD'nin ekleneceği yapının parametrelerinin doğru belirlenmesi önemlidir. Yapıların deprem etkileri altında performansının TMD parametrelerine bağlı olması sebebiyle en önemli nokta, optimum TMD parametrelerini bulmaktır.

## Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimizasyonu

Den Hartog (1956) tarafından, tek serbestlik dereceli sistemlerde ayarlı kütle sönümleyicilerin parametre optimizasyonu probleminin ilk genel formülasyonu (Denklem 1-2) oluşturulmuştur (Wielgos, P, & Gery o, R. [2021]). Bu formülasyonlar, ayarlı kütle sönümleyicinin ve harmonik uyarıma dayalı sönümsüz tek serbestlik dereceli sisteminin optimum kontrol parametrelerini içermektedir. Bunun yanı sıra belirli bir yapısal mod için titreşimi en aza indirmek amacıyla sönümleyici ve yay katsayılarının nasıl belirlenebileceğini göstermiştir (Soto, M. G., & Adeli, H. [2014]). Denklemlerde  $\mu$  ve  $\xi_s$  sembolleri sırasıyla kütle oranı (TMD kütlesi ve yapının 1. modal kütlesi oranı) ve yapının ilk mod şeklinin genliğini dikkate alan sönüm oranına karşılık gelmektedir.



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.



Oğuz Uzdil

Gebrail Bekdaş

Sinan Melih Niğdeli

Istanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul,  
Türkiye  
E-posta: oguz.uzdil@gmail.com  
bekdas@iuc.edu.tr  
melihni@iuc.edu.tr

**Bu bölümü alıntıla / Cite this chapter as:**  
Uzdil, O., Bekdaş, G., & Niğdeli, S. M. (2023).  
Ayarlı kütle sönümleyicilerin optimizasyonu.  
G. Bekdaş, & S. M. Niğdeli (Ed), *Ayarlı kütle  
sönümleyicilerinin optimum ayarlanması*  
içinde [s. 20-23]. İstanbul: İÜC Yayınevi.

Frekans oranı:

$$f_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (1)$$

Sönüm oranı:

$$\xi_{d,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (2)$$

Warburton (1982), Den Hartog'un önerisine üzerine geniş bant optimizasyonu uygulayarak, tek serbestlik dereceli sistem üzerinde rassal harmonik ve beyaz gürültü uyarılarını dikkate alan denklemleri türetmiştir [Denklem 3-4]. Bu denklemleri elde edilmesinde kontrolsüz yapı ile ayarlı kütle sönümleyici arasındaki rezonans modlarının ortalama sönüm oranlarının yaklaşık olarak eşit olduğu kabulü yapılmıştır [Soto & Adeli; 2014].

Frekans oranı:

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \quad (3)$$

Sönüm oranı:

$$\xi_{d,opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \quad (4)$$

Fujino and Abe (1993), sönümsüz iki serbestlik dereceli sistemler için çeşitli rassal uyarımlar altında denklemler üretmişlerdir (Denklem 5-6). Söz konusu çalışmada, dört farklı durum için kontrol sisteminin optimum parametrelerinin bulunmasında dört denklem seti önerilmiştir. Bu denklemler; pertürbasyon çözümlerinin ortalama kare değerlerini kullanan optimizasyon yöntemine bağlı elde edilen serbest titreşim, harmonik, kendiliğinden uyarılmış ve rastgele uyarımlı kütle ve yapısal sönüm oranlarının 0.02'den az olduğu varsayılan yer değiştirme tepkileridir [Soto & Adeli; 2014, Gutierrez Soto, M. (2012)].

Frekans oranı:

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \quad (5)$$

Sönüm oranı:

$$\xi_{d,opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{(1+\mu)(1+\mu/2)}} \quad (6)$$

Feng ve Mita (1995), iki serbestlik dereceli sisteme ilave edilen ayarlı kütle sönümleyicinin optimum frekans ve sönüm oranlarının bulunmasında yer değiştirme (i) ve ivme (ii) için olmak üzere iki ayrı denklem seti önermişlerdir [Denklem 7-9]. Optimum değerlerin elde edilmesinde beyaz gürültü etkisi altındaki sistemin dinamik tepkisine ait ortalama kare değerlerinin minimizasyonu amaçlamışlardır. Önerilen denklemlerin performansını, sismik etkiler alındaki 0.02 yapısal sönüm oranına sahip 200 m yüksekliğindeki iki boyutlu çerçeve bina üzerinde test etmişlerdir [Soto & Adeli; 2014].

Frekans oranı:

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \quad (7)$$

Sönüm oranı:

$$\xi_{d,opt} = \frac{1}{2} \sqrt{(1+\mu)f_{opt}^4 + f_{opt}^2 + \frac{1-3(1+\mu)^2 f_{opt}^2}{(1+\mu)^3}} \quad (8)$$

$$\xi_{d,opt} = \frac{f_{opt}}{2} \sqrt{(1+\mu)f_{opt}^2 + 1 - \frac{1}{1+\mu}} \quad (9)$$

Sadek ve diğ. (1997) çalışmalarında hem sönümlü hem de sönümsüz otuz serbestlik dereceli sistem için deprem etkisi temel alınmıştır. Çalışmada Villaverde (1985) tarafından önerilen denklemleri geliştirerek ayarlı kütle sönümleyicinin optimum parametrelerini elde etmek amacıyla eğri oluşturma yöntemi kullanılmıştır [Denklem 10-13]. Ele alınan kontrollü yapının ilk iki modu, TMD'nin ve tek başına yapının ortalama sönümleme oranından daha büyük bir değere eşit olarak aynı sönümleme oranına sahip olmuştur. Önerilen denklemler, yapısal sistemin sönüm oranını da içermesi bakımından önceki formüllerden farklıdır. Ayrıca yapının ilk mod şeklinin genliğini dikkate alan bir faktör kullanarak çok serbestlik dereceli sistemler için optimum parametreleri araştırmışlardır [Soto & Adeli; 2014]. Yapının kendi sönüm oranını (dikkate alan veya almayan denklemler önerilmiştir).

Frekans oranı:

$$f_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (10)$$

$$f_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \left[ 1 - \xi_s \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right] \quad (11)$$

Sönüm oranı:

$$\xi_{d,opt} = \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \quad (12)$$

$$\xi_{d,opt} = \frac{\xi_s}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \quad (13)$$

Rudinger (2006), beyaz gürültü etkisi altında sönümlü tek serbestlik dereceli sistem için ayarlı kütle sönümleyicinin optimum parametreleri elde etmek amacıyla istatistiksel doğrusallaştırmayı kullanmıştır [Denklem 14-15]. Çalışmada doğrusal davranan sönümlü ve sönümsüz sistemler için ayarlı kütle sönümleyicinin optimum parametrelerinin aynı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Doğrusal olmayan bir sistem için ayarlı kütle sönümleyicinin optimum parametreleri ise, yapısal sönümlemeye ve titreşim genliğine bağlıdır [Soto & Adeli; 2014].

Frekans oranı:

$$f_{opt} = \sqrt{\frac{(2+\mu)}{2(1+\mu)^2}} \quad (14)$$

Sönüm oranı:

$$\xi_{d,opt} = \sqrt{\frac{\mu(4+3\mu)}{4(1+\mu)^3}} \quad (15)$$

Krenk and Hogsberg (2008), yapısal sönüm oranından bağımsız olarak kuvvet ve beyaz gürültü ivmesi etkileri altındaki sönümlü ve sönümsüz iki serbestlik dereceli sistemler için optimum değerlerin elde edilmesinde kullanılacak denklemleri elde etmek için minimum standart sapma tekniği uygulamışlardır [Denklem 16-17]. Araştırmanın sonucunda ayar ve frekans oranlarının formülasyonunda birincil sistemin yapısal sönümlenmesi dikkate alınmadan optimal performansın elde edilebileceği görülmüştür [Soto & Adeli; 2014].

Frekans oranı:

$$f_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (16)$$

Sönüm oranı:

$$\xi_{d,opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{(1+\mu)^3}} \quad (17)$$

Hoang ve diğ. (2008), doğrusal olmayan programlama tekniği kullanarak, yer hakim frekansının ( $\omega_y$ ) yapısal frekansa ( $\omega_s$ ),  $\delta =$

$\omega_g / \omega_s$  oranının farklı aralıkları için sismik etkiye maruz kalan tek serbestlik dereceli sistemde ayarlı kütle sönümleyicinin optimum parametreleri için denklemler önermişlerdir [Denklem 18-23]. Çalışmada amaç yapının konumuna özel parametreleri elde edilmesi ve böylece bir yapının inşa edildiği zemin tipinin dikkate alınmasıdır. Çalışmada, deprem yüküne maruz kalan bir köprü için ayarlı kütle sönümleyici için büyük kütle oranlarının etkisinin incelediği sayısal bir örnek sunulmuştur. Gerçekleştirilen analizlerde ise optimal ayarlı kütle sönümleyicinin artan kütle oranı ile daha düşük ayar frekansına ve daha yüksek sönümleme oranına sahip olduğunu sonucuna ortaya konmuştur. Ayrıca, büyük bir kütle oranı kullanmanın teorik model ile pratik uygulama arasında meydana gelen parametre belirsizliklerini önleyebileceği sonucuna ulaşılmıştır [Soto; 2012].

$\delta = \omega_g / \omega_s$  yerin frekans oranı aralıkları için sönümlü tek serbestlik dereceli sistemin sismik etkisine dayalıdır:

- (i)  $\delta = 1$
- (ii)  $1 < \delta < 3$
- (iii)  $\delta \geq 3$

Frekans oranı:

$$(i) f_{opt} = \frac{\sqrt{(1-6\mu)(1+\mu^2)}}{1+\mu} - 0.7\xi_s \quad (18)$$

$$(ii) f_{opt} = \frac{\sqrt{(1-\frac{\delta\mu}{6})}}{1+\mu} - \frac{0.7\xi_s}{1-\frac{\mu}{2}} \quad (19)$$

$$(iii) f_{opt} = \frac{\sqrt{(1-\mu/2)}}{1+\mu} - \frac{0.7\xi_s}{1-\mu/2} \quad (20)$$

Sönüm oranı:

$$(i) \xi_{d,opt} = \frac{\sqrt{\mu(1+2.5\mu+2\mu^2)}}{2(1+2.7\mu)} \quad (21)$$

$$(ii) \xi_{d,opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\frac{\mu}{4})}{4(1+\mu)(1-\frac{\mu}{2})}} + 0.25\mu\xi_s \quad (22)$$

$$(iii) \xi_{d,opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} + 0.25\mu\xi_s \quad (23)$$

### Sayısal Örnek

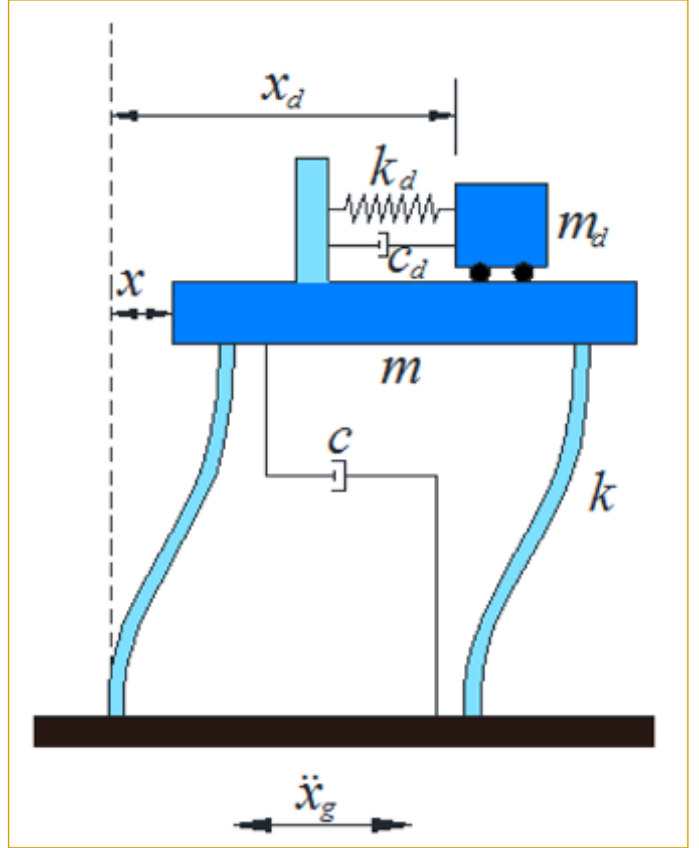
Şekil 1’de gösterilen ve sayısal verileri Tablu 1’de verilen tek serbestlik dereceli yapı sisteminin;

- a) Doğal frekansını bulunuz.
- b) Sönüm oranını bulunuz.
- c) Ayarlı kütle sönümleyicinin %5 kütle oranı için TMD parametrelerini sırasıyla kütle, rijitlik ve sönüm ( $m_d$ ,  $k_d$ ,  $c_d$ ) için bulunuz.
- d) Yapının hareket denklemini ayarlı kütle sönümleyicili sistem için yazınız ve doğal frekanslarını ve mod şekillerini bulunuz.

**Tablo 1**  
Uygulama verileri

Veri	Simge	Değer	Birim
Kütle	m	2924	kg
Rijitlik	k	1390000	N/m
Sönüm katsayısı	c	1581	Ns/m

**Şekil 1**  
Uygulamaya konu olan yapısal sistem



- a) Sistemin doğal frekansının bulunması.

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{1390000}{2924}} = 21.80 \text{ rad/s}$$

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{21.80} = 0.2882 \text{ s}$$

- b) Sistemin sönüm oranının bulunması.

$$\xi_s = \frac{c}{2 \times m \times \omega_s} = \frac{1581}{2 \times 1924 \times 21.80} = 0.012$$

- c) Ayarlı kütle sönümleyicinin %5 kütle oranı için parametrelerini ( $m_d$ ,  $k_d$ ,  $c_d$ ) bulunması.

Den Hartog yöntemi kullanılırsa;

$$f_{opt} = \frac{1}{1+\mu} = \frac{1}{1+0.05} = \frac{1}{1.05} = 0.9524$$

$$\xi_{d,opt} = \sqrt{\frac{3 \times \mu}{8 \times (1+\mu)^3}} = \sqrt{\frac{3 \times (0.05)}{8 \times (1+0.05)^3}} = 0.1273$$

$$m_d = \mu \times m = 0.05 \times 2924 = 146.2 \text{ kg}$$

$$f_{opt} = \frac{\omega_{d,opt}}{\omega_s}$$

$$\omega_{d,opt} = f_{opt} \times \omega_s = 0.9524 \times 21.80 = 20.7623 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{d,opt} = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}$$

$$k_d = \omega_{d,opt}^2 \times m_d = 20.7623^2 \times 146.2 = 62936.8 \text{ N/m}$$

$$c_{d,opt} = 2 \times \xi_{d,opt} \times m_d \times \omega_{d,opt} = 2 \times 0.1273 \times 146.2 \times 20.7623 = 772.825 \text{ Ns/m}$$



d) Yapının hareket denkleminin ayarlı kütle sönümleyicili sistem için yazılması ve doğal frekansların ve mod şekillerinin bulunması.

Yapıya kütle sönümleyici eklendiğinde oluşan matris haldeki hareket denklemi ve sistem vektörleri aşağıdaki gibidir.

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = -[M][1]\ddot{x}_g$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2924 & 0 \\ 0 & 146.2 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1452936.8 & -62936.8 \\ -62936.8 & 62936.8 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c + c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2353.8251 & -772.8251 \\ -772.8251 & 772.8251 \end{bmatrix}$$

Aşağıdaki işlem ile iki serbestlik dereceli sistemin hareket denklemleri bulunabilir.

$$\det(K - \lambda M) = 0$$

$$w_n^2 = \lambda$$

$$\begin{vmatrix} 1452936.8 - 2924\lambda & -62936.8 \\ -62936.8 & 62936.8 - 146.2\lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$[1452936.8 - 2924\lambda][62936.8 - 146.2\lambda] - [-62936.8]^2 = 0$$

$$0.05\lambda^2 - 46.369\lambda + 10232 = 0$$

$$\lambda^2 - 927.38\lambda + 204640 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4 \times a \times c = (927.38)^2 - 4 \times 1 \times 204640$$

$$\Delta = 41473.6644$$

$$\lambda_1 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2 \times a}$$

$$\lambda_1 = \frac{927.38 - \sqrt{41473.6644}}{2 \times 1}$$

$$\lambda_1 = 361.85$$

$$\lambda_2 = \frac{927.38 + \sqrt{41473.6644}}{2 \times 1}$$

$$\lambda_2 = 565.52$$

$$w_1 = \sqrt{\lambda_1} = \sqrt{361.85} = 19.02 \text{ rad/s}$$

$$w_2 = \sqrt{\lambda_2} = \sqrt{565.52} = 23.78 \text{ rad/s}$$

$$T_{n1} = \frac{2\pi}{w_1} = \frac{2\pi}{19.02} = 0.33 \text{ s}$$

$$T_{n2} = \frac{2\pi}{w_2} = \frac{2\pi}{23.78} = 0.26 \text{ s}$$

Bulunan değerler içine konularak mod şekilleri bulunur. Bu işlem her mod değeri için ayrı ayrı yapılır.

$\lambda_2=361.85$  için:

$$\begin{bmatrix} 1452936.8 - 2924 \cdot (361.85) & -62936.8 \\ -62936.8 & 62936.8 - 146.2 \cdot (361.85) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{21} \\ \phi_{22} \end{bmatrix} = 0$$

Yapılan sadeleştirmeler ile;

$$\begin{bmatrix} \phi_{21} \\ \phi_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.16 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Burada iki denklem de aynı çıkmıştır. Burada bilinmeyenlerin birine rasgele bir sayı verilerek diğeri bulunur. Sonrasında maksimum değer 1 olarak şekilde mod şekli normalleştirilir.

Diğer mod için benzer şekilde işlemler yapılarak ikinci mod şekli bulunur:

$$\begin{bmatrix} 1452936.8 - 2924 \cdot (565.52) & -62936.8 \\ -62936.8 & 62936.8 - 146.2 \cdot (565.52) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{21} \\ \phi_{22} \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{bmatrix} 3.19 & 1 \\ 3.19 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{21} \\ \phi_{22} \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{21} \\ \phi_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.31 \\ 1 \end{bmatrix}$$

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that there are no competing interests.

## Kaynaklar

- Den Hartog, J. P. (1956), *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, New York. (Reprinted by Dover, New York, 1985).
- Feng, M., & Mita, A. (1995) Vibration control of tall buildings using Mega SubConfiguration. *Journal of Engineering Mechanics*, 10, 1082-1088. [\[Crossref\]](#)
- Fujino, Y., & Abe, M. (1993), Design formulas for tuned mass dampers based on a perturbation technique. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 833-854. [\[Crossref\]](#)
- Gutierrez Soto, M. (2012). Investigation of passive control of irregular building structures using bidirectional tuned mass damper (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
- Hoang, N., Fujino, Y., & Warnitchai, P. (2008). Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical formulas. *Engineering Structures*, 30, 707-715. [\[Crossref\]](#)
- Krenk, S., & Hogsberg, J. (2008). Tuned mass absorbers on damped structures under random load. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 23, 408-415. [\[Crossref\]](#)
- Rudinger, F. (2006). Optimal Absorber with Nonlinear Viscous Power Law Damping and White Noise excitation. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 132(1), 46-53. [\[Crossref\]](#)
- Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. W. & Chung, R. M., (1997). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic application. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 617-635. [\[Crossref\]](#)
- Soto, M. G., & Adeli, H. (2014). Optimum tuning parameters of tuned mass dampers for vibration control of irregular highrise building structures. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(5), 609-620. [\[Crossref\]](#)
- Warburton, G. (1982). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural*, 10, 381-440. [\[Crossref\]](#)
- Wielgos, P., & Geryo, R. (2021). Optimization of Multiple Tuned Mass Damper (MTMD) Parameters for a Primary System Reduced to a Single Degree of Freedom (SDOF) through the Modal Approach. *Applied Sciences*, 11(4), 1389. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 5**

## **ÇOK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLER İÇİN AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİNİN OPTİMİZASYONU**

Oğuz UZDİL  
Gebrail BEKDAŞ  
Sinan Melih NİGDELI

# Çok Serbestlik Dereceli Sistemler için Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Optimizasyonu

## *Optimization of Tuned Mass Dampers for Multi-Degree of Freedom Systems*

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu bölümde ayarlı kütle sönümleyicili yapıda, sönümleyicinin optimum parametrelerinin bulunmasını süreci tanıtılmaktadır. Çalışmada, simülasyonları Matlab Simulink, optimizasyon sürecinde ise algoritma olarak Jaya Algoritması, Öğretme-Öğrenme-Tabanlı Optimizasyon ve Çiçek Tozlaşma Algoritması açıklanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yapısal kontrol, titreşim, ayarlı kütle sönümleyicileri

### ABOUT the CHAPTER

In this section, the process of finding the optimum parameters in a structure with a tuned mass damper is introduced. In the study, simulations were explained in Matlab Simulink, and in the optimization process, Jaya Algorithm, Teaching-Learning-Based Optimization and Flower Pollination Algorithm were explained.

**Keywords:** Structural control, vibration, tuned mass dampers

## Giriş

Optimizasyon, değişkenlerinin uygun değerler arasından bazı kısıtlarında dikkate alınarak bir çözüm alanı içinden belirlendiği tek veya birden fazla amaç fonksiyonunu maksimize veya minimize etmenin hedeflendiği bir problemin çözümünün bulunması olarak tanımlanabilir. Söz konusu kısıtları yerine getirirken amaç fonksiyon(lar)ını maksimize veya minimize eden farklı değerlerde ve birden fazla değişken kümesi olabilmektedir (Rao, R. V., 2019).

Sezgisel kelimesinin kökeni, sorunları çözmek için yeni stratejiler veya kurallar keşfetme sanatı anlamına gelen eski Yunanca heuriskein kelimesinden gelmektedir. Aynı zamanda bir Yunan öneki olan meta öneki, İngilizce dilinde daha yüksek bir soyutlama düzeyi anlamına gelir. Metasezgisel terimi, Glover tarafından makalede tanıtılmış ve daha yüksek düzeyde soyutlamalar kullanarak bir problemi çözme stratejisini ve çözüm uzayında bu- luşsal bir aramayı yönlendirmeyi ifade etmektedir (Kaveh, A., 2017).

Metasezgisel algoritmalar, uygulamalı matematik, mühendislik, tıp, ekonomi ve diğer bilimlerin farklı alanlarında birçok problemin çözümünde uygulamıştır. Mühendislikte alanında ise söz konusu algoritmaların, başta inşaat, mekanik, elektrik ve endüstriyel projelerin tasarım aşamalarında yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir (Kaveh, A., 2017).




## Optimizasyon Yöntemleri

Rao 2016 yılında, uygulaması basit ve algoritmaya özgü herhangi bir parametre ayarlanması gerektirmeyen Jaya algoritmasını ortaya koymuştur. Jaya algoritmasında diğer algoritmalarda olduğu benzer şekilde ilk çözüm kümeleri, değişkenlerinin üst ve alt sınırları içerisinde kalacak şekilde özel herhangi bir kural veya denkleme bağlı olmaksızın rassal olarak üretilir (Rao, 2016).



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atif 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.



Oğuz Uzdil   
Gebrael Bekdaş   
Sinan Melih Niğdeli 

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul,  
Türkiye  
E-posta: oguz.uzdil@gmail.com  
bekdas@iuc.edu.tr  
melihni@iuc.edu.tr

**Bu bölümü alıntıla / Cite this chapter as:**  
Uzdil, O., Bekdaş, G., & Niğdeli, S. M. (2023).  
Çok serbestlik dereceli sistemler için ayarlı  
kütle sönümleyicilerinin optimizasyonu. G.  
Bekdaş, & S. M. Niğdeli (Ed.), *Ayarlı kütle  
sönümleyicilerinin optimum ayarlanması*  
içinde (s. 25-29). İstanbul: İÜC Yayınevi.

Jaya algoritması temel yaklaşımı her zaman başarıya yaklaşmaya (en iyi çözüme ulaşmayı) ve başarısızlıktan kaçınmayı (en kötü çözümden uzaklaşmaya) şeklindedir. Algoritma en iyi çözüme ulaşarak başarılı olmaya çalışması sebebiyle, Rao tarafından algoritma Jaya (zafer anlamına gelen Sanskritçe bir kelime) olarak adlandırılmıştır. Bu amacın gerçekleştirilmesi için optimizasyon sürecinde kullanılması önerilen bağıntı ise Denklem 1’de görülmektedir. Bu bağıntıdaki simgelerin açıklaması Tablo 1’de verilmiştir. Algoritma, global optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir ve tek veya çoklu veya çok amaçlı sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılabilir (Rao, 2019).

$$x_{i,yeni} = x_{i,j} + rand * (x_{i,g \text{ en iyi}} - x_{i,j}) - rand * (x_{i,g \text{ en kötü}} - x_{i,j}) \quad (1)$$

**Tablo 1**  
Jaya Algoritmasının Terimleri

Optimizasyon Bileşeni	Açıklama
$x_{i,yeni}$	i. yeni değer tasarım değişkeni
$x_{i,j}$	i. tasarım değişkeni j. başlangıç matrisindeki aday çözümün değeri
$x_{i,g \text{ en iyi}}$	Amaç fonksiyonu açısından en iyi çözüm i. tasarım değişken değeri
$x_{i,g \text{ en kötü}}$	Amaç fonksiyonu açısından en kötü çözümü içeren vektörde i. tasarım değişken değeri

Rao ve diğ. (2011), çalışmalarında herhangi bir algoritmaya özgü parametrenin ayarlanmasını gerektirmeyen Öğretme-öğrenme-tabanlı optimizasyon (Teaching-Learning-Based-Optimization; TLBO) algoritmasını da geliştirmişlerdir. Algoritma; (i) öğretmen aracılığıyla ve (ii) diğer öğrencilerle etkileşim yoluyla olmak üzere iki temel öğrenme modu kullanmaktadır. Bu optimizasyon algoritmasında bir grup öğrenci popülasyon olarak kabul edilir ve öğrencilere sunulan farklı konular optimizasyon probleminin farklı tasarım değişkenleri olarak kabul edilir ve bir öğrencinin sonucu optimizasyon probleminin ‘uygunluk’ (amaç fonksiyonu) değerine benzetilir. Tüm popülasyon içerisindeki en iyi olan çözüm öğretmen olarak atanır. En iyi seçimi amaç fonksiyonuna göre yapılır. Algoritma optimizasyon süreci öğretmen ve öğrenci olarak adlandırılan iki aşama uygulanmaktadır:

#### Öğretmen Aşaması:

TLBO algoritmasında ilk aşaması olan öğretmen aşamasında yeni tasarım değişkenlerinin türetilmesinde kullanılan denklem

$$x_{i,yeni} = x_{i,j} + rand * (x_{i,eniye} - T_F * x_{i,ortalama}) \quad (2)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada sınıftaki en yüksek bilgi düzeyine sahip kişidir; yani öğretmeni temsil etmektedir. popülasyonun her bir bireyi için hesaplanan amaç fonksiyonları içerisindeki en iyi değeri tarafından belirlenir. Amaç fonksiyonunun en iyi değeri, minimizasyon problemi için fonksiyonun en düşük, maksimizasyon için en büyük değeridir. Öğretmen, sınıftaki öğrencilerin bilgi düzeylerini artırmaya çalışır. Burada sınıfın ortalama bilgi düzeyi olan devreye girmektedir. , ilk çözüm matrisindeki her tasarım değişkeni için tüm çözümlerin aritmetik ortalamasıdır.

$T_F$  [Denklem 3] öğretim faktörüdür. rand komutu 0 ile 1 arasında bir değer aldığı için:

- $0 \leq rand < 0.5$  aralığında ise  $1 \leq 1 + rand < 1.5$  aralığında olacaktır, yani round komutu bu aralıktaki değerleri en yakın tam sayıya yuvarladığında değeri 1 olacaktır.
- $0.5 \leq rand < 1$  aralığında ise,  $1.5 \leq 1 + rand < 2$  aralığında olacaktır, yani round komutu bu aralıktaki değerleri en yakın tam sayıya yuvarladığında değeri 2 olacaktır.

Çözüm matrisi, yeni çözümler ile mevcut çözümler karşılaştırılarak ve yeni çözümlerden daha iyileri kullanılarak güncellenir.

$$T_F = round(1 + rand) \quad (3)$$

#### Öğrenci Aşaması:

TLBO algoritmasının ikinci aşaması olan öğrenci aşamasında ise yeni tasarım değişkenlerinin elde edilmesi amacıyla

$$x_{i,yeni} = \begin{cases} AF_a < AF_b, x_{i,j} + rand * (X_{i,a} - X_{i,b}) \\ AF_a > AF_b, x_{i,j} + rand * (X_{i,b} - X_{i,a}) \end{cases} \quad (4)$$

ifadesi önerilmiştir. Burada  $X_{i,a} - X_{i,b}$  öğrencileri diğer öğrencilerle etkileşimini (birlikte çalışma durumlarını) simüle eden ifadedir. Söz konusu etkileşimde birlikte çalışmak amacıyla seçilen iki öğrenci; yani, iki çözüm vektörünün amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılır. 1. çözüm vektörünün amaç fonksiyonunun değeri 2’den küçük ise  $X_{i,a} - X_{i,b}$  şeklinde hesaplama yapılır, 1. çözüm vektörünün amaç fonksiyonunun değeri 2.ıden büyük ise hesaplama  $X_{i,a} - X_{i,b}$  olarak yapılır.

Öğrenci aşamasında rastgele gruplar oluşturulur. 2 öğrenci; yani 2 çözüm vektörü  $\{x_i, x_j\}$  rastgele [Denklem 5, 6] seçilir. Burada  $0 \leq rand \leq 1$  olduğu için bu değer çözüm vektörlerinin sayısı ile çarpılır ve ceil komutu ile bir sonraki tam sayıya yuvarlanır.

$$x_i = (ceil(rand * pn)) \quad (5)$$

$$x_j = (ceil(rand * pn)) \quad (6)$$

Yang (2012) çiçekli bitkilerin tozlaşma sürecinden ilham alarak bir metasezgisel algoritma olan Çiçek Tozlaşma Algoritmasını (Flower Pollination Algorithm; FPA) ortaya koymuştur. Algoritmanın geliştirilmesinde, belirli çiçek tozlaşma türleri ve çiçek sabitliği, algoritmanın oluşturulmasındaki temel özelliklerdir. Çiçek sahipliğine göre tozlaşma işleminde belirli türdeki çiçekler kendine özgü tozlaştırıcı canlıyı kendine çekmektedir.

Bilindiği gibi tozlaşma, çiçekli bitkilerin üreme sürecidir. Çiçek sabitliği, özel bir çiçek tozlayıcı ortaklığı içeren bir başarı sürecidir. Bu ortaklıkta, belirli bir çiçek yalnızca belirli tozlayıcıları kendine çeker.

Sabitlik, algoritmanın geliştirilmesinde anahtar özelliktir ve bu fikir, global ve yerel tozlaşma aşamalarını sağlamak için tozlaşma türleri ile birleştirilir. Global ve yerel tozlaşma aşamaları, bir değiştirme olasılığı (sp) kontrol edilerek seçilir. Bu algoritma da iki aşamadan oluşmaktadır:

#### Global Tozlaşma Aşaması:

Çiçek tozlaşma algoritması ilk aşaması olan global tozlaşma için Yang tarafından önerilen ifade Denklem 7’de görülmektedir.

$$x_{i,yeni} = x_{i,j} + L(x_{i,eniye} - x_{i,j}) \quad (7)$$

Denklemden  $X_{i,j}$  mevcut çözüme  $X_{i, en iyi}$  ise tüm çözümler içerisinde amaç fonksiyonu bakımında en iyi çözüme sahip çözüme karşılık gelir.  $L$  ise Levy uçuşu olarak adlandırılan ve rassal değerler üreten bir fonksiyondur (Denklem 8).

$$L = \frac{1}{2\pi} rand^{-1.5} e^{-\frac{1}{2rand}} \quad (8)$$

*Yerel Tozlaşma Aşaması:*

İkinci aşama yerel tozlaşma aşaması için Yang tarafından önerilen denklem ise

$$x_{i,yeni} = x_{i,j} + rand(x_{i,a} - x_{i,b}) \quad (9)$$

olarak ifade edilmiştir. Denklemden ve mevcut çözümler içerisinde rassal olarak seçilen iki çözüme karşılık gelmektedir.

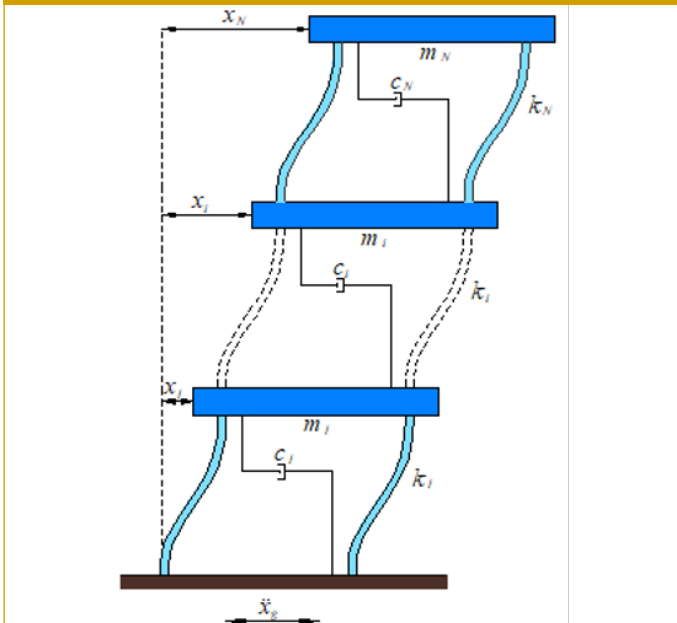
### Kütle Sönümleyicili Yapının Analizleri

Optimizasyon belirlenen koşullar altında en iyi sonuca ulaşabilmeyi hedefleyen süreci içermektedir. Sismik etkiler altında en iyi sonuç ise sistemin yer değiştirmelerin gerekli koşullarına uygun olarak en küçük değerlerde kalmasıdır. Bu hedefin gerçekleştirilebilmesi ise sisteme eklenen kütle sönümleyicinin optimum parameter değerlerinin bulunması ile sağlanabilmektedir.

Şekil 1'de gösterilen çok serbestlik dereceli TMD'siz kesme binasının hareket denklemi Denklem 10'da sunulmuştur. Bu denklemden bir tepki çekilerek Denklem (11)'de görüldüğü gibi Matlab Simulinkte modellenebilir (Şekil 2). Sırasıyla,  $m_i$ ,  $k_i$ ,  $c_i$  ve  $x_i$  i. katın ( $i=1...N$ ) kütle, rijitlik, sönüm ve yer değiştirme değerlerini göstermekte olup, yapı yer ivmesi ( $\ddot{x}_g$ ) etkisi altındadır. N serbestlik dereceli bir sistem için kütle (M), rijitlik (K) ve sönüm (C) matrisleri ile yer değiştirme ( $x$ ), hız ( $\dot{x}$ ) ve ivme ( $\ddot{x}$ ) vektörleri Denklem (10)-(17)'de verilmiştir. TMD sisteminin kütlesi ( $m_d$ ), rijitliği ( $k_d$ ), sönümü ( $c_d$ ) ve yer değişmesi ( $x_d$ ) ilave edilmiş kontrollü yapı (Şekil 3) matris ve vektörleri Denklem (18)-(23)'te gösterilmiştir.

Şekil 1

*Çok Serbestlik Dereceli TMD'siz Kesme Binası*



Hareket denklemi:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M[1]\ddot{x}_g \quad (10)$$

$$\ddot{x}(t) = M^{-1}[-M[1]\ddot{x}_g - C\dot{x}(t) - Kx(t)] \quad (11)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & -k_{N-1} & (k_{N-1} + k_N) & -k_N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & -c_{N-1} & (c_{N-1} + c_N) & -c_N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (14)$$

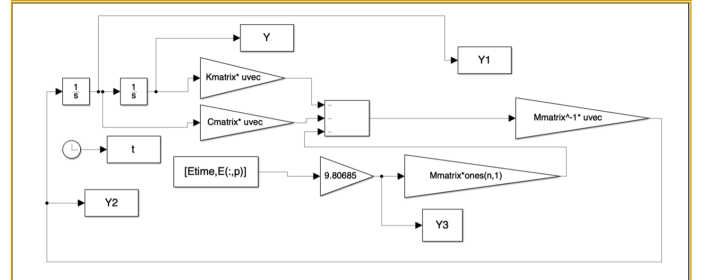
$$x(t) = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T \quad (15)$$

$$\dot{x}(t) = [\dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dots \ \dot{x}_N]^T \quad (16)$$

$$\ddot{x}(t) = [\ddot{x}_1 \ \ddot{x}_2 \ \dots \ \ddot{x}_N]^T \quad (17)$$

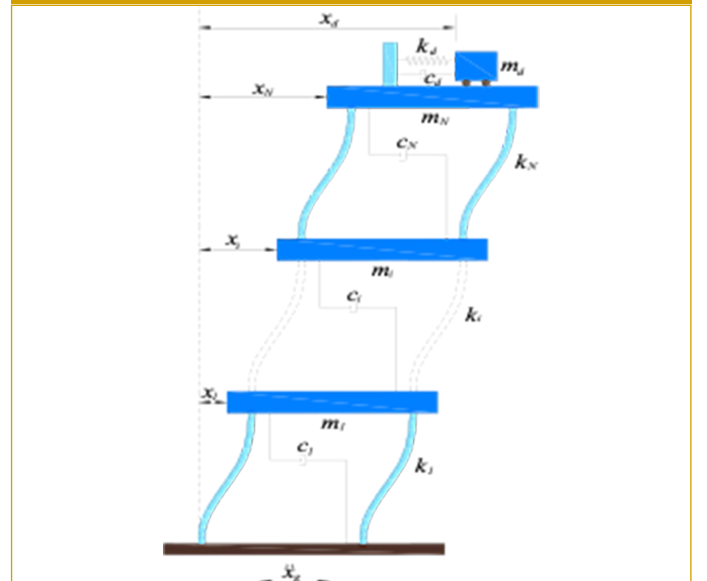
Şekil 2

*Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Hareket Denkleminin Blok Diyagramı*



Şekil 3

*Çok Serbestlik Dereceli TMD'li Kesme Binası*





4. Rao, R. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34. [\[Crossref\]](#)
5. Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-Based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315. [\[Crossref\]](#)
6. MATLAB: The Language of Technical Computing. Math Works Inc.
7. Yang, X. S. (2012, September). Flower pollination algorithm for global optimization. In International conference on unconventional computing and natural computation (pp. 240-249). Springer, Berlin, Heidelberg. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 6**

## **OPTİMUM KÜTLE SÖNÜMLEYİCİSİ TASARIMI İÇİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI BİR TAHMİN MODELİ**

Melda YÜCEL  
Gebrail BEKDAŞ  
Sinan Melih NİGDELİ



# Optimum Kütle Sönümleyicisi Tasarımı için Yapay Sinir Ağları ile Makine Öğrenmesi Tabanlı Bir Tahmin Modeli

## *A Machine Learning-Based Prediction Model with Artificial Neural Networks for Optimal Mass Damper Design*

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu çalışmada, ayarlı kütle sönümleyicilerin (TMD) frekans-tanım alanında optimum olarak modellenmesi ile olası yapısal hasarların minimuma indirilmesi için optimizasyon ve makine öğrenmesi tekniklerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir yaklaşım ele alınmıştır. Bu doğrultuda ilk adım olarak gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde, transfer fonksiyonu için en büyük genlik değerinin minimizasyonuna yönelik olarak metasezgisel yöntemlerden biri olan çiçek tozlaşma algoritması (FPA) kullanılmıştır. İkinci adımda ise optimum TMD tasarımlarına ait bazı mekanik parametreler makine öğrenmesi tabanlı bir model ile eğitilerek hızlı ve etkili bir tahmin sistemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda yapay sinir ağlarından (YSA) yararlanılarak geliştirilen söz konusu sistem sayesinde yeni test modelleri için gerekli olan TMD parametrelerinin doğrudan ve hızlı bir şekilde belirlenmesi ve elde edilen sonuçlar yardımıyla minimize edilmiş transfer fonksiyon değerlerinin de elde edilmesi mümkün olmuştur. Böylece optimum TMD tasarımlarının belirlenmesine yönelik olarak hızlı, etkili ve ek işlemler gerektirmeyen bir sistemin geliştirilmesi ile uzun süreler alan optimizasyon analizlerine eşdeğer olan bir çözümleme yöntemi de sağlanmış olmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Ayarlı kütle sönümleyici, makine öğrenmesi, yapay sinir ağları

### ABOUT the CHAPTER

In this study, a hybrid approach in which optimization and machine learning techniques are used together to minimize possible structural damage by optimally modeling tuned mass dampers (TMD) in the frequency domain is discussed. In the optimization process carried out as the first step in this direction, flower pollination algorithm (FPA), one of the metaheuristic methods, was used to minimize the largest amplitude value for the transfer function. In the second step, some mechanical parameters of optimum TMD designs were trained with a machine learning-based model and a fast and effective prediction system was developed. In this context, thanks to the system developed by using artificial neural networks (ANN), it was possible to directly and quickly determine the TMD parameters required for new test models and to obtain minimized transfer function values with the help of the results obtained. Thus, by developing a system that is fast, effective and does not require additional processes for determining optimum TMD designs, an analysis method that is equivalent to optimization analyzes that take a long time is provided.

**Keywords:** Tuned mass damper, machine learning, artificial neural networks

## Giriş

Yapay zekanın alt disiplinlerinden biri olan makine öğrenmesi, bilgisayarlar tarafından öğrenme faaliyetinin sağlanması için çeşitli yöntemler ve algoritmalara odaklanma sürecidir. Burada makine öğrenmesi sürecinde, herhangi bir sisteme örnek bir veri kümesi verildiğinde söz konusu veri ve veriler arasındaki bağlantılar/ilişkiler hakkında bilgi üretilecek öğrenme gerçekleştirilebilmektedir (Jones, 2008). Bu bağlamda makine öğrenmesi kavramı, sadece gerçek bir zeka ve akla sahip bir insanın yapabildiği birçok faaliyetin makineler, bilgisayarlar, yazılımlar ve hatta robotlar tarafından gerçekleştirilmesini sağlayarak bir konuyu öğrenebilen, hissedebilen ve duruma yönelik tepki/yanıt oluşturabilen sistemlerin geliştirilmesi olarak tanımlanabilir. Bu bağlamda makinelerin öğrenmesi hususu gerekli rotanın bir robot tarafından doğru bir şekilde belirlenmesi, temizlenmesi



Melda Yücel

Gebrail Bekdaş

Sinan Melih Niğdeli

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul,  
Türkiye  
E-posta: melda.yucel@yahoo.com.tr  
bekdas@iu.edu.tr  
melihni@iu.edu.tr

**Bu bölümü alıntıla / Cite this chapter as:**  
Yücel, M., Bekdaş, G., & Niğdeli, S. M. (2023).  
Optimum kütle sönümleyicisi tasarımı için  
yapay sinir ağları ile makine öğrenmesi  
tabanlı bir tahmin modeli. G. Bekdaş, & S. M.  
Niğdeli (Ed.), *Ayarlı kütle sönümleyicilerinin  
optimum ayarlanması* içinde (s. 31-36).  
İstanbul: İÜC Yayınları.



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.

gereken alanların tespiti veya bir yazılımın otonom olarak (kendi kendine) istenmeyen e-postaları ayıklaması gibi bilgi ve deneyim gerektiren bazı işlevleri dışarıdan herhangi bir gözetmen olmaksızın yapay olan bir zekayı kullanarak yerine getirebilmesi olarak değerlendirilebilir. Sözü edilen öğrenme, elde edilen herhangi bir bilginin var olan zeka yoluyla kademeli olarak hissedilmesi, anlaşılması ve reaksiyon oluşturularak cevap verilmesi (bilgi çıkarımı) ile birlikte deneyim kazanılması anlamına gelir.

Daha önce de değinildiği üzere yapay zekanın alt dallarından biri olan makine öğrenmesi özellikle son yıllarda çok sayıda çalışma disiplini içinde önemli bir hale gelmiş olup bu kapsamda çeşitli öğrenme teknikleri ve algoritmalarından yararlanılarak akıllı sistemler, yazılımlar ve araçlar geliştirilmiştir. Bu anlamda söz konusu makine öğrenmesi teknolojisi gerekli bazı çıktılarının elde edilmesi veya parametrelerin/bilgilerin bulunması esnasında araştırmacı, tasarımcı, mühendis vb. veya bu alanla ilgilenen herhangi bir kişi açısından kullanım kolaylığı sunmasının yanı sıra maliyet ile zaman tasarrufu ve emeğin verimli olarak harcanması bağlamında birçok avantaj sağlamaktadır.

Gerçekleştirilen makine öğrenmesi süreçleri sayesinde günlük hayatın pek çok alanında olduğu gibi bilimsel alanda da gerekli faaliyetlerin daha hızlı yürütülmesine öncülük edilerek zamandan ve emekten tasarruf sağlanmaktadır. Bu bağlamda sağlık ve ilaç endüstrisi, bilim ve eğitim, sosyal medya, alışveriş ve e-ticaret, güvenlik vb. çeşitli alanlarda yapay zeka teknolojileri ile birlikte özellikle makine öğrenmesi yöntemleri ile gerçekleştirilen farklı uygulamaların olduğu bilinmektedir. Örneğin, davranış durumlarının değerlendirilmesiyle ruhsal (mental) sağlığın belirlenmesi (Abou-Warda ve diğ., 2016; Bone ve diğ., 2017; Srividya ve diğ., 2018); bazı hastalıkların meydana gelme olasılıklarının tahmini ve bu hastalıkların gruplandırılması (Chen ve diğ., 2017; Sahoo ve diğ., 2020; Koh ve diğ., 2021); organizmalardaki kanserli/tümörlü hücrelerin tespiti (Sawant ve diğ., 2018; Fujisawa ve diğ., 2019; Chand, 2020), vb. uygulamaların sağlık hizmetleri kapsamında en çok dikkat çeken alt-çalışma modelleri olduğu söylenebilir. Bununla birlikte sosyal medya kullanıcılarının cinsiyet, yaş, gelir durumu vb. demografik (nüfus) özelliklerinin tahmini (Preotiuc-Pietro ve diğ., 2015; Volkova ve diğ., 2015; Gu ve diğ., 2018), sahte haberlerin veya içeriklerin belirlenmesi (Braşoveanu ve Andonie, 2019; Ahmad ve diğ., 2020; Hakak ve diğ., 2021) ve aynı zamanda siber saldırganlık faaliyetlerinin tespiti (Chavan ve Shylaja, 2015; Altay ve Alatas, 2018; Hani ve diğ., 2019) özellikle son yıllarda daha yaygın ve sosyal medya uygulamalarına yönelik olarak daha sık kullanılan teknolojiler haline gelmiştir.

Öte yandan, mühendislik disiplini de makine öğrenmesi uygulamalarının hâlihazırda kullanılmakta olduğu ve her geçen gün daha da yaygınlaştığı alanlardan biridir. Bu bağlamda mevcut kullanıcılar için su talebinin tahmin edilmesi (Shabani ve diğ., 2017; Lopez Farias ve diğ., 2018), verimliliğin sağlanması amacıyla enerji planlaması (Yücel ve Namli, 2018; Yang ve diğ., 2020), trafik akışının modellenmesi ile akıllı yol sistemlerinin oluşturulması (Ata ve diğ., 2019; Brincat ve diğ., 2019), vb. bazı uygulamalar farklı mühendislik disiplinlerinde gerçekleştirilmiş faaliyetlere örnek olarak gösterilebilir. Söz konusu disiplinin alt alanlarından biri olan inşaat mühendisliğindeki temel alanlardan yapı mühendisliği kapsamında akıllı enerji sistemleri, otomatik hale getirilmiş hesaplama modülleri veya formülleri, inşaat alanlarının planlanması için hız-

lı yönetim araçları vb. gibi bazı uygulamalar, klasik yaklaşımların daha çok tercih edildiği geçmiş zamanlara kıyasla günümüzde artmaya başlamıştır. Bu uygulamalara örnek olarak yapı projeleri için maliyet planlamasının oluşturulması (Arage ve Dharwadkar, 2017; Shayboun ve diğ., 2019; Sharma ve diğ., 2021), en uygun beton içeriğinin belirlenmesi (Ziolkowski ve Niedostatkiwicz, 2019; Naseri ve diğ., 2021; Ke ve Duan, 2021), giriş kolon, istinat duvarı, temel vb. gibi yapısal elemanların optimal (en uygun) model parametrelerinin tahmin edilmesi (Yücel ve diğ., 2020; Yücel ve diğ., 2021) ve yapı elemanlarının yanı sıra yapısal malzemelerin bazı mekanik özelliklerinin elde edilmesi (Chen ve diğ., 2018; Hoang ve diğ., 2020; Yücel ve Namli, 2020; Liu ve diğ., 2021) gösterilebilir. Ayrıca, yapı mühendisliği alanındaki problemlerden bir diğeri ise yeterli sismik güçlendirmenin sağlanması ve bu anlamda dayanıklı ve iyi tasarlanmış titreşim sönümleme cihazlarının oluşturulmasıdır. Bu kapsamda ayarlı kütle sönümleyicileri (TMD) için optimize/en uygun mekanik parametrelerin tahmin edilmesi (Yücel ve diğ., 2019; Lara-Valencia ve diğ., 2020; Etedali ve diğ., 2021), bazı sönümleme sistemleri (taban izolasyonu, PID kontrolörü vb.) için gerekli parametrelerin hızlıca belirlenmesi ile tasarımlarının gerçekleştirilmesi (Gu ve diğ., 2019; Lu ve diğ., 2021;), sismik tepkilerin tahmin edilmesiyle dinamik davranışların gözlemlenmesi (Yücel ve diğ., 2018; Kim ve Park, 2020; Smarra ve diğ., 2020) gibi uygulamalar verilebilecek bazı örnek uygulamalar arasındadır.

Bu bölümde çalışmada yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak geliştirilmiş olan bir tahmin modeli (Yücel ve diğ., 2019) aracılığıyla önerilmiş olan sayısal ifadelerle dayalı analizler sunulmuştur. Söz konusu yaklaşımda optimizasyon süreci kapsamında çiçek tozlaşma algoritması (FPA) kullanılmış olup detaylı bilgi aşağıda verilmektedir. Çalışma içerisinde yer alan bölümlerde hem YSA yapısı ve özelliklerinden hem de optimum TMD özelliklerinin tahmin edilmesi için geliştirilen YSA modelinden bahsedilmiş olup bu kapsamda geliştirilen sayısal formülasyonların detayına da yer verilmiştir. Son olarak örnek olarak bazı sayısal modeller için analizler gerçekleştirilmiş ve ilgili sonuçlar sunulmuştur.

### Optimizasyon Yöntemi: Çiçek Tozlaşma Algoritması

Optimizasyon olarak bilinen süreç, önceden tanımlanmış kısıtlamalar altında ve esas olarak hedeflenen bir amaç doğrultusunda herhangi bir probleme yönelik en uygun yani kullanışlı sonuçların bulunmasını sağlama yollarından biri olarak kabul görmektedir. Bu anlamda, doğanın çeşitli etmenleri (canlıların avlanma, yiyecek arama gibi yaşamsal faaliyetleri, evrenin oluşumu, yer çekimi, cisimlerin çarpışması gibi bazı fiziksel olaylar vb.), genetiğe dayalı süreçler, insan hafızasının nitelikleri vb. gibi durumlardan ilham alınarak geliştirilen ve birçok türü bulunan metasezgisel algoritmaların kullanımı optimizasyon problemlerinin çözümlenebilmesi açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Burada, ilgili algoritmaların optimizasyon süreçlerinde fayda sağlayabilmesi söz konusu her bir durumun sayısal olarak ifade edilmesi gerekmekte ve bu doğrultuda en uygun çözümlerle birlikte hedefe de ulaşılması mümkün hale gelmektedir.

Bu çalışmada kullanılan ve bir metasezgisel yöntem olan çiçek tozlaşma algoritması (FPA) ise Yang (2012) tarafından, çiçekli bitkilerin türlerinin devamlılığını sağlama doğrultusunda gerçekleştirildiği ve tozlaşma olarak bilinen doğal bir süreçten yararlanılarak geliştirilmiş olup ilk defa 2012 yılında önerilmiştir.

Öte yandan söz konusu tozlaşma olayı bu süreçte iki farklı şekilde gerçekleşebilmektedir. Bunlar biyotik (çapraz) ve abiyotik (kendi kendine) tozlaşma olup sayısal olarak hesaplanabilmeleri bakımından oluşturulan ifadeler sırasıyla Denklem (1) ve (2) olarak gösterilmektedir:

$$X_{yeni,i} = X_{eski,i} + Lèvy(X_{eniyi,i} - X_{eski,i}) \quad (1)$$

$$X_{yeni,i} = X_{eski,i} + rand(0,1)(X_{n,i} - X_{m,i}) \quad (2)$$

Denklemlerde yer alan  $X_{yeni,i}$  ve  $X_{eski,i}$  ifadeleri  $n^{th}$  tasarım değişkenine yönelik olarak her bir aday çözüm için sırasıyla yeni ve mevcut yani eski değerleri temsil etmektedir. Diğer yandan  $X_{eniyi,i}$  söz konusu değişkene yönelik olarak amaç fonksiyonu bakımından en uygun sonuca sahip aday çözümü sembolize etmektedir.  $X_{n,i}$  ve  $X_{m,i}$  ise rassal olarak seçilmiş  $m^{th}$  ve  $n^{th}$  çözümleri göstermektedir. Burada, dağılım fonksiyonları olarak bilinmekte olan  $Lèvy$  ve  $rand(0,1)$  sırasıyla rassal uçuş ve  $[0,1]$  aralığında gerçekleşen lineer uçuşu temsil edecek şekilde hesaplanmaktadır.

### Optimizasyon Amacı

Tüm optimizasyon problemlerinin tasarım değişkenleri, bir amaç fonksiyonunu azaltacak şekilde bulunmaktadır. Frekans tanım alanında yapılan optimizasyonda, bu fonksiyon en üst katın ivme transfer fonksiyonunun maksimum genliğidir. Transfer fonksiyonu, bir yanıtın (bu çalışmada ele alınan en üst kat ivmesi,  $\ddot{x}$ ) ve dış uyarımın Laplace dönüşümlerinin oranı ile tanımlanır. Transfer fonksiyonu (TF) Denklem (3)'de verilmiştir. Bu fonksiyon birimsizdir ancak fonksiyonun 20 ile çarpımının 10 tabanlı logaritması desibel (dB) olarak kabul edilir. Denklem (4),  $w_j$ 'ye eşit olan s-bölgesindeki fonksiyonun formudur. Frekansa ( $\omega$ ) bağlı fonksiyon ve optimizasyonda kullanılan amaç fonksiyonu Denklem (4) olarak verilmiştir. Kompleks sayı (j) kısmını ortadan kaldırmak ve genliği elde etmek için fonksiyonun mutlak değeri alınır. Dış uyarım yer ivmesidir ( $\ddot{x}_g$ ) ve M, C ve K sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. {1} ise birim vektördür.

$$TF(s) = 20 \log_{10} \left[ \frac{\ddot{x}(s)}{\ddot{x}_g(s)} \right] = 20 \log_{10} \left[ \frac{-Ms^2 \{1\}}{Ms^2 + Cs + K} \right] \quad (3)$$

$$TF(\omega) = \left| 20 \log_{10} \left[ \frac{M\omega^2 \{1\}}{-M\omega^2 + C\omega j + K} \right] \right| \quad (4)$$

### YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)

Yapay sinir ağlarının (YSA) çalışma mekanizması merkezi sinir sistemi ve sahip olduğu çeşitli yapısal elemanların birlikte gerçekleştirdiği çeşitli faaliyetlerden yola çıkılarak tasarlanmış olup gerçek bir sinir sisteminde yer alan her bir üye YSA' da da simüle edilmiştir.

Klasik YSA' lar temel anlamda giriş ve çıkış olmak üzere iki ayrı katman içerirse de çok katmanlı YSA' larda ek olarak gizli düğümlerin bulunduğu bir katman daha bulunmaktadır. Bu doğrultuda sinir hücresi olarak bilinen nöronlar, YSA'nda giriş, gizli ve çıkış olacak şekilde ayrılan katman düğümlerinin; söz konusu nöronların arasında bilgi alışverişinin gerçekleştirilmesinde rol oynayan aksonlar ise bahsi geçen düğümleri birleştiren bağlantı elemanlarının görevini üstlenmektedir (Şekil 1). Bununla birlikte YSA' na verilen bilgilerin yer aldığı veri kümesindeki her bir parametre de söz konusu giriş/çıkış düğümleri aracılığıyla eğitim sürecine

dahil olmaktadır. Bu süreçte verilerin düğümler arasındaki aktarımını ve model tarafından işlenmesini sağlayan YSA elemanı ise bağlantı ağırlıkları olup  $w$  olarak sembolize edilmiştir. Bu sürecin sonunda çıkış parametresine ait değer belirlenebilmesi içinse tüm ağırlık değerlerinin de ilgili giriş verisi ile işleme girmesi ve elde edilen tüm toplam değerlerinin birleştirilmesi sonucunda ikinci bir dönüşüme tabi tutulması gerekmektedir. Burada ise aktivasyon fonksiyonu olarak bilinen farklı bir birim göz önüne alınmaktadır. Bu bağlamda sistem tarafından hesaplanmış olan nihai çıkış değerinin ikinci bir işlem ile güncellenmesi sağlanarak çıktı değerinin tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. Söz konusu fonksiyonun işletilebilmesi için kullanılacak çeşitli sayıda ve farklı yapılarda önerilmiş ifadeler bulunmaktadır. Bu anlamda Denklem (5)-(11)' de örnek olarak lineer, sigmoid/lojistik, softsign, ikili, softplus, üstel ve Swish fonksiyonlarına ait formülasyonlar görülebilmektedir (Al-Jaberi, 2018; Nwankpa ve diğ., 2018):

$$f(x) = x \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (6)$$

$$f(x) = \left( \frac{x}{|x|+1} \right) - 1.13 \quad (7)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

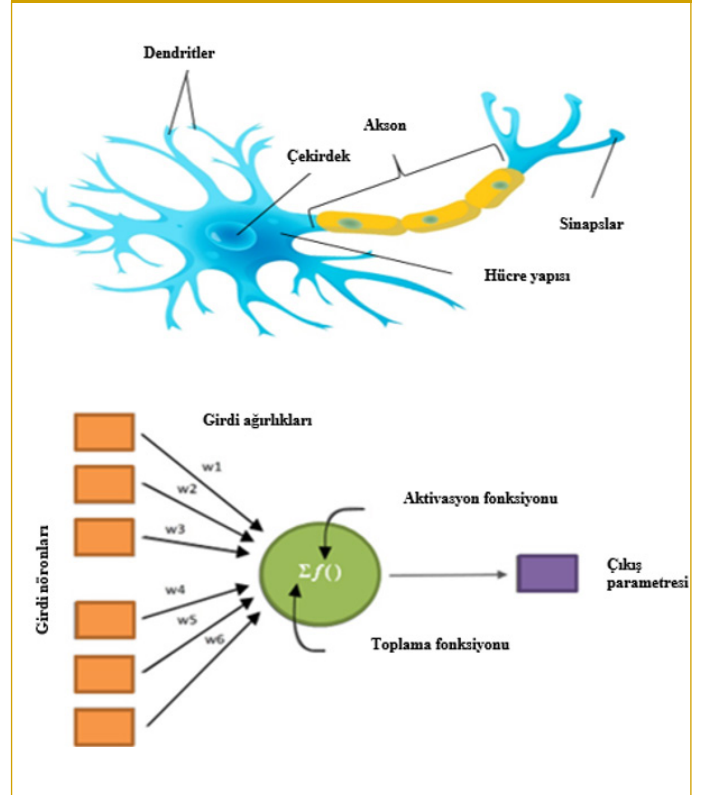
$$f(x) = \log(1 + e^x) - 1.21 \quad (9)$$

$$f(x) = e^{-x} \quad (10)$$

$$f(x) = \frac{x}{1+e^{-x}} - 1.29 \quad (11)$$

Şekil 1

Yapay sinir ağlarının (YSA) temel mekanizması ve çalışma prensibi



### Optimum Tmd Tasarımı İçin YSA Modeli

Yucel ve diğ. (2019) tarafından gerçekleştirilen referans çalışmada tek serbstlik dereceli (SDOF) yapılara ait ivme transfer fonksiyonunun (TF) minimum değeri ile birlikte optimum TMD periyodu ( $T_d$ ) ve sönüm oranını ( $\xi_{d,opt}$ ) da içeren tasarım parametrelerinin YSA yoluyla tahmin edilmesi sağlanmıştır. Bu süreçte kütle oranı ( $\mu$ ) ve yapı periyodu ( $T_s$ ) ise girdi parametreleri olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda SDOF yapılar için gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde kullanılmak üzere 100 farklı tasarım kombinasyonu üretilmiş olup elde edilen tüm çıktılar YSA'nın eğitimi doğrultusunda bir veri seti haline getirilmiş ve gerekli dönüşümler yapılarak işlenmesi sağlanmıştır. Bu süreçte gerekli olan tasarım girdileri 10 farklı yapı periyodu (0.1-5 s aralığında değişen) ve 10 farklı kütle oranı değerinin (0.01-0.40 aralığında değişen) kombinasyonu yoluyla elde edilmiştir. Söz konusu uygulamalar sonucunda ise bir test modelinin oluşturulması amacıyla,  $T_s$  ve  $\mu$  için tanımlanan değer aralıklarına bağlı kalınarak 400 farklı tasarım opsiyonu üretilmiştir. Burada, test modelinde yer alan tüm yapısal tasarımlar için de gerekli optimum parametreler geliştirilen YSA tahmin modeli kullanılarak belirlenmiş olup elde edilen çıktılar vasıtasıyla da parametreler için optimum değerlerin doğrudan elde edilmesini sağlayacak bazı formülasyonlar önerilmiştir. Bu formülasyonlar üç farklı eğri uydurma versiyonunun elde edilen optimum sonuçlar ile uyumlu hale getirilmesi yoluyla elde edil-

miş olup mevcut literatürde bilinen ve kullanımı olan çeşitli denklemlerle de karşılaştırılmıştır. ve için optimum değerlerin belirlenmesine yönelik YSA tabanlı formülasyonlar lineer, polinom ve üstel denklemler olmak üzere sırasıyla Denklem (12)-(14)'de görülebilmektedir.

$$\text{Lineer denklem : } \begin{cases} f_{opt} = -0.6438\mu + 0.9966 \\ \xi_{d,opt} = 0.5673\mu + 0.1235 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Polinom denklem : } \begin{cases} f_{opt} = -249.91\mu^5 + 400.09\mu^4 - 208.03\mu^3 + 43.801\mu^2 - 4.1453\mu + 1.0675 \\ \xi_{d,opt} = -54.673\mu^4 + 54.639\mu^3 - 19.274\mu^2 + 3.2302\mu + 0.0237 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{Üstel denklem : } \begin{cases} f_{opt} = 1.0038e^{-0.747\mu} \\ \xi_{d,opt} = 0.1258e^{2.8573\mu} \end{cases} \quad (14)$$

### Sayısal Örnekler

Farklı yapısal tasarım kombinasyonları için TMD tasarımlarına yönelik elde edilen optimum sönüm oranı ( $\xi$ ) ve frekans oranı ( $f$ ) değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 2'de ise test modelleri olarak verilen söz konusu farklı yapı tasarımları için Tablo 1'de ifade edilmiş optimum parametrelerin kullanılmasıyla ulaşılmış olan minimum ivme transfer fonksiyonu değerleri yer almaktadır. Optimum parametrelerin belirlenmesi için geliştirilen formülasyonlar ile hesaplanan tüm sonuçlar sunulmuş olup daha önceden önerilen ve tasarımcılar tarafından da iyi bilinen bazı literatür çalışmaları ile de kıyaslanmıştır (Yucel ve diğ., 2019). Burada  $x$  ile sembolize edilen ve SDOF yapıya ait içsel sönüm oranını ifade eden değer ise 0.05 olarak alınmıştır.

**Tablo 1**

*Önerilen formülasyonların ve literatür denklemlerinin SDOF yapı modelleri açısından karşılaştırılması (optimum parametreler)*

Model (Ts)	Kütle oranı ( $\mu$ )	Yapı periyodu	Den Hartog (1947)		Warburton (1982)		Sadek ve diğ. (1997)		Leung ve Zhang (2008)		Lineer denklem		Polinom denklem		Üstel denklem	
			$x_{d,opt}$	$f_{opt}$	$x_{d,opt}$	$f_{opt}$	$x_{d,opt}$	$f_{opt}$	$x_{d,opt}$	$f_{opt}$	$x_{d,opt}$	$f_{opt}$	$x_{d,opt}$	$f_{opt}$	$x_{d,opt}$	$f_{opt}$
1	0.05	0.5	0.1336	0.9524	0.1098	0.9404	0.2658	0.9420	0.1091	0.8249	0.1519	0.9644	0.1435	0.9462	0.1451	0.9670
2	0.1	1	0.1846	0.9091	0.1527	0.8861	0.3470	0.8817	0.1514	0.7229	0.1802	0.9322	0.2032	0.9205	0.1674	0.9315
3	0.1	0.5	0.1846	0.9091	0.1527	0.8861	0.3470	0.8817	0.1514	0.7229	0.1802	0.9322	0.2032	0.9205	0.1674	0.9315
4	0.05	2	0.1336	0.9524	0.1098	0.9404	0.2658	0.9420	0.1091	0.8249	0.1519	0.9644	0.1435	0.9462	0.1451	0.9670
5	0.05	1	0.1336	0.9524	0.1098	0.9404	0.2658	0.9420	0.1091	0.8249	0.1519	0.9644	0.1435	0.9462	0.1451	0.9670
6	0.1	1.5	0.1846	0.9091	0.1527	0.8861	0.3470	0.8817	0.1514	0.7229	0.1802	0.9322	0.2032	0.9205	0.1674	0.9315
7	0.05	1.5	0.1336	0.9524	0.1098	0.9404	0.2658	0.9420	0.1091	0.8249	0.1519	0.9644	0.1435	0.9462	0.1451	0.9670
8	0.1	2	0.1846	0.9091	0.1527	0.8861	0.3470	0.8817	0.1514	0.7229	0.1802	0.9322	0.2032	0.9205	0.1674	0.9315

**Tablo 2**

*Önerilen formülasyonların ve literatür denklemlerinin SDOF yapı modelleri açısından karşılaştırılması (TF).*

Model	Kütle oranı ( $\mu$ )	Yapı periyodu (Ts)	Den Hartog (1947)	Warburton (1982)	Sadek ve diğ. (1997)	Leung ve Zhang (2008)	Lineer denklem	Polinom denklem	Üstel denklem
			TF (dB)						
1	0.05	0.5	12.6227	13.2203	14.4301	16.0810	12.3659	12.7447	12.4275
2	0.1	1	10.8639	11.6922	12.6210	15.2255	10.4481	10.5831	10.4882
3	0.1	0.5	10.8692	11.6990	12.6278	15.2055	10.4568	10.5860	10.4890
4	0.05	2	12.6227	13.1830	14.4301	16.0810	12.3235	12.7389	12.3207
5	0.05	1	12.6227	13.2003	14.4301	16.0810	12.3659	12.7389	12.4275
6	0.1	1.5	10.8639	11.6707	12.6278	15.2055	10.4481	10.5831	10.4890
7	0.05	1.5	12.5871	13.2003	14.4102	16.0810	12.3659	12.7447	12.4275
8	0.1	2	10.8534	11.6922	12.6210	15.2055	10.4481	10.5740	10.4678

Tablo 1 ve 2'den de anlaşılacağı üzere YSA tabanlı tahmin modeli aracılığıyla geliştirilen tüm formülasyonlar, ivme transfer fonksiyonu değerlerinin düşürülmesi bakımından bahsi geçen literatür denklemlerine kıyasla son derece etkili, kullanışlı ve farklı tasarımlar için de geçerlidir. Ek olarak, ele alınan yapı modelleri açısından önerilen formülasyonlar arasındaki en başarılı olan denklem çiftinin, TF değerlerinin minimizasyonu anlamındaki en iyi performansa sahip olmasından dolayı lineer denklemler olduğu kabul edilebilir.

## Sonuçlar

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon ile YSA tahminleme süreçleriyle etkili denklem takımlarının geliştirilmesi neticesinde istenmeyen yapısal titreşimlerin kontrol edilebilmesi ve ivme transfer fonksiyonu genliğinin düşürülmesi kapsamında en uygun/optimum TMD tasarımları elde edilmiştir. Burada TMD'nin optimum parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan Leung ve Zhang (2008) ile Warburton (1982) tarafından önerilen denklemlerin benzer değerlere ulaştığı, ancak Leung ve Zhang (2008) denklemleri yoluyla ulaşılan optimum değerler ile TF'nin minimizasyonu anlamında en düşük başarıya sahip olduğu da görülebilmektedir. Bununla birlikte mevcut çalışmada önerilen formülasyonlar ile Den Hartog (1947) denklemlerinin de optimum değerler açısından yakın bir davranışa sahip olduğu söylenebilir. Ancak, TF minimizasyonu kapsamında, geliştirilen üç farklı formülasyonun söz konusu literatür denklemlerinden daha başarılı olmasının yanında bu formülasyonlardan da en etkilisinin lineer denklemler olduğu söylenebilir. Bu durumun temel sebebi ise lineer denklemlerin, ele alınan tüm yapısal tasarım modelleri için de transfer fonksiyonu genlik değerlerini etkili bir şekilde minimize edebilmiş olmasıdır.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that there are no competing interests.

## Kaynaklar

1. Abou-Warda, H., Belal, N.A., El-Sonbaty, Y., & Darwish, S. (2016). A random forest model for mental disorders diagnostic systems. In *International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics* (pp. 670-680). Springer, Cham. [\[Crossref\]](#)
2. Ahmad, I., Yousaf, M., Yousaf, S., & Ahmad, M. O. (2020). Fake news detection using machine learning ensemble methods. *Complexity*. [\[Crossref\]](#)
3. Al-Jaberi, A.L. (2018). *Artificial neural networks*. Artificial neural networks in construction materials, 35-55.
4. Altay, E.V., & Alatas, B. (2018, December). Detection of cyberbullying in social networks using machine learning methods. In *2018 International Congress on Big Data, Deep Learning and Fighting Cyber Terrorism (IBIGDELFT)* (pp. 87-91). IEEE. [\[Crossref\]](#)
5. Arage, S.S., & Dharwadkar, N.V. (2017, February). Cost estimation of civil construction projects using machine learning paradigm. In *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)* (pp. 594-599). IEEE. [\[Crossref\]](#)
6. Ata, A., Khan, M.A., Abbas, S., Ahmad, G., & Fatima, A. (2019). Modelling smart road traffic congestion control system using machine learning techniques. *Neural Network World*, 29(2), 99-110. [\[Crossref\]](#)
7. Bone, D., Lee, C.C., Chaspari, T., Gibson, J., & Narayanan, S. (2017). Signal processing and machine learning for mental health research and clinical applications [perspectives]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(5), 196-195. [\[Crossref\]](#)
8. Braşoveanu, A.M., & Andonie, R. (2019, June). Semantic fake news detection: a machine learning perspective. In *International Work-Conference on Artificial Neural Networks* (pp. 656-667). Springer, Cham. [\[Crossref\]](#)
9. Brincat, A.A., Pacifici, F., Martinaglia, S., & Mazzola, F. (2019, April). The internet of things for intelligent transportation systems in real smart cities scenarios. In *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 128-132). IEEE. [\[Crossref\]](#)
10. Chand, S. (2020). A comparative study of breast cancer tumor classification by classical machine learning methods and deep learning method. *Machine Vision and Applications*, 31(6), 1-10. [\[Crossref\]](#)
11. Chavan, V.S., & Shylaja, S.S. (2015, August). Machine learning approach for detection of cyber-aggressive comments by peers on social media network. In *2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)* (pp. 2354-2358). IEEE. [\[Crossref\]](#)
12. Chen, M., Hao, Y., Hwang, K., Wang, L., & Wang, L. (2017). Disease prediction by machine learning over big data from healthcare communities. *IEEE Access*, 5, 8869-8879. [\[Crossref\]](#)
13. Chen, X.L., Fu, J.P., Yao, J.L., & Gan, J.F. (2018). Prediction of shear strength for squat RC walls using a hybrid ANN-PSO model. *Engineering with Computers*, 34(2), 367-383. [\[Crossref\]](#)
14. Den Hartog, J.P. (1947). *Mechanical Vibrations*. 3rd ed., McGraw-Hill, New York, USA.
15. Etedali, S., Bijaem, Z.K., Mollayi, N., & Babaiyan, V. (2021). Artificial intelligence-based prediction models for optimal design of tuned mass dampers in damped structures subjected to different excitations. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2150120. [\[Crossref\]](#)
16. Fujisawa, Y., Inoue, S., & Nakamura, Y. (2019). The possibility of deep learning-based, computer-aided skin tumor classifiers. *Frontiers in Medicine*, 6, 191. [\[Crossref\]](#)
17. Gu, H., Wang, J., Wang, Z., Zhuang, B., & Su, F. (2018, July). Modeling of user portrait through social media. In *2018 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)* (pp. 1-6). IEEE. [\[Crossref\]](#)
18. Gu, X., Yu, Y., Li, Y., Li, J., Askari, M., & Samali, B. (2019). Experimental study of semi-active magnetorheological elastomer base isolation system using optimal neuro fuzzy logic control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 119, 380-398. [\[Crossref\]](#)
19. Hakak, S., Alazab, M., Khan, S., Gadekallu, T.R., Maddikunta, P.K.R., & Khan, W.Z. (2021). An ensemble machine learning approach through effective feature extraction to classify fake news. *Future Generation Computer Systems*, 117, 47-58. [\[Crossref\]](#)
20. Hani, J., Nashaat, M., Ahmed, M., Emad, Z., Amer, E., & Mohammed, A. (2019). Social media cyberbullying detection using machine learning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(5), 703-707. [\[Crossref\]](#)
21. Hoang, N.D., Tran, X.L., & Nguyen, H. (2020). Predicting ultimate bond strength of corroded reinforcement and surrounding concrete using a metaheuristic optimized least squares support vector regression model. *Neural Computing and Applications*, 32(11), 7289-7309. [\[Crossref\]](#)
22. <https://www.ee.co.za/article/application-of-machine-learning-algorithms-in-boiler-plant-root-cause-analysis.html>
23. Jones, M.T. (2008). *Artificial Intelligence: A Systems Approach*. Infinity Science Press LLC, ISBN: 978-0-9778582-3-1.
24. Ke, X., & Duan, Y. (2021). A Bayesian machine learning approach for inverse prediction of high-performance concrete ingredients with



- targeted performance. *Construction and Building Materials*, 270, 121424. [\[Crossref\]](#)
25. Kim, H.S., & Park, K.S. (2020). Research on hyperparameter of RNN for seismic response prediction of a structure with vibration control system. *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, 20(2), 51-58. [\[Crossref\]](#)
  26. Koh, J.E.W., De Michele, S., Sudarshan, V.K., Jahmunah, V., Ciaccio, E.J., Ooi, C.P., Grurajan, R., Grurajan, R., Oh, S.L., Lewis, S.K., Green, P.H., Bhagat, G. & Acharya, U.R. (2021). Automated interpretation of biopsy images for the detection of celiac disease using a machine learning approach. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 203, 106010. [\[Crossref\]](#)
  27. Lara-Valencia, L.A., Farbiarz-Farbiarz, Y., & Valencia-González, Y. (2020). Design of a tuned mass damper inerter (tmdil) based on an exhaustive search optimization for structural control of buildings under seismic excitations. *Shock and Vibration*, 2020. [\[Crossref\]](#)
  28. Leung, A.Y.T, & Zhang, H. (2008). Particle swarm optimization of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, 31(3), 715-728. [\[Crossref\]](#)
  29. Liu, W., Moayedi, H., Nguyen, H., Lyu, Z., & Bui, D.T. (2021). Proposing two new metaheuristic algorithms of ALO-MLP and SHO-MLP in predicting bearing capacity of circular footing located on horizontal multilayer soil. *Engineering with Computers*, 37(2), 1537-1547. [\[Crossref\]](#)
  30. Lopez Farias, R., Puig, V., Rodriguez Rangel, H., & Flores, J.J. (2018). Multi-model prediction for demand forecast in water distribution networks. *Energies*, 11(3), 660. [\[Crossref\]](#)
  31. Lu, G., Wang, K., & Guo, W. (2021). Vibration characteristic analyses of medium-and small-span girder bridge groups in highway systems based on machine learning models. *Advances in Structural Engineering*, 1369433221997722. [\[Crossref\]](#)
  32. Naseri, H., Jahanbakhsh, H., Khezri, K., & Javid, A.A.S. (2021). Toward sustainability in optimizing the fly ash concrete mixture ingredients by introducing a new prediction algorithm. *Environment, Development and Sustainability*, 1-37. [\[Crossref\]](#)
  33. Nwankpa, C., Ijomah, W., Gachagan, A., & Marshall, S. (2018). Activation functions: Comparison of trends in practice and research for deep learning. arXiv preprint arXiv:1811.03378.
  34. Preotjuc-Pietro, D., Volkova, S., Lampos, V., Bachrach, Y., & Aletras, N. (2015). Studying user income through language, behaviour and affect in social media. *PLoS One*, 10(9), e0138717. [\[Crossref\]](#)
  35. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., & Chung, R.M. (1997). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 617-635. [\[Crossref\]](#)
  36. Sahoo, A.K., Pradhan, C., & Das, H. (2020). Performance evaluation of different machine learning methods and deep-learning based convolutional neural network for health decision making. In *Nature Inspired Computing for Data Science* (pp. 201-212). Springer, Cham. [\[Crossref\]](#)
  37. Sawant, A., Bhandari, M., Yadav, R., Yele, R., & Bendale, M.S. (2018). Brain cancer detection from mri: A machine learning approach (ten-sorflow). *Brain*, 5(04).
  38. Shabani, S., Yousefi, P., & Naser, G. (2017). Support vector machines in urban water demand forecasting using phase space reconstruction. *Procedia Engineering*, 186, 537-543. [\[Crossref\]](#)
  39. Sharma, V., Zaki, M., Jha, K.N., & Krishnan, N.A. (2021). Machine learning-aided cost prediction and optimization in construction operations. *Engineering, Construction and Architectural Management*. [\[Crossref\]](#)
  40. Shayboun, M., Kifokeris, D., & Koch, C. (2019, September). Construction planning with machine learning. In *Thirty-fifth Annual Conference* (Vol. 699, p. 699).
  41. Smarra, F., Di Girolamo, G.D., Gattulli, V., Graziosi, F., & D'Innocenzo, A. (2020). Learning models for seismic-induced vibrations optimal control in structures via random forests. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 187(3), 855-874. [\[Crossref\]](#)
  42. Srividya, M., Mohanavalli, S., & Bhalaji, N. (2018). Behavioral modeling for mental health using machine learning algorithms. *Journal of Medical Systems*, 42(5), 1-12. [\[Crossref\]](#)
  43. Volkova, S., Bachrach, Y., Armstrong, M., & Sharma, V. (2015, March). Inferring latent user properties from texts published in social media. In *Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. [\[Crossref\]](#)
  44. Warburton, G.B. (1982). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 381-401. [\[Crossref\]](#)
  45. Yang, S., Wan, M.P., Chen, W., Ng, B.F., & Dubey, S. (2020). Model predictive control with adaptive machine-learning-based model for building energy efficiency and comfort optimization. *Applied Energy*, 271, 115147. [\[Crossref\]](#)
  46. Yang, X.S. (2012). Flower pollination algorithm for global optimization. In *International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation* (pp. 240-249). Springer, Berlin, Heidelberg. [\[Crossref\]](#)
  47. Yucel, M., & Namlı, E. (2020). High performance concrete (HPC) compressive strength prediction with advanced machine learning methods: combinations of machine learning algorithms with bagging, rotation forest, and additive regression. In *Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Civil, Mechanical, and Industrial Engineering* (pp. 118-140). IGI Global. [\[Crossref\]](#)
  48. Yucel, M., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., & Sevgen, S. (2019). Estimation of optimum tuned mass damper parameters via machine learning. *Journal of Building Engineering*, 26, 100847. [\[Crossref\]](#)
  49. Yucel, M., Öncü-Davas, S., Nigdeli, S.M., Bekdas, G., & Sevgen, S. (2018). Estimating of analysis results for structures with linear base isolation systems using artificial neural network model. *International Journal of Control Systems and Robotics*, 3, 50-56.
  50. Yücel, M., & Namlı E. (2018). Yapay zekâ modelleri ile betonarme yapılaraya ait enerji performans siniflarının tahmini. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 22(3), 325-346. [\[Crossref\]](#)
  51. Yücel, M., Bekdaş, G., & Nigdeli, S.M. (2020, April). Prediction of optimum 3-bar truss model parameters with an ANN model. In *International Conference on Harmony Search Algorithm* (pp. 317-324). Springer, Singapore. [\[Crossref\]](#)
  52. Yücel, M., Nigdeli, S.M., Kayabekir, A.E., & Bekdaş, G. (2021). Optimization and artificial neural network models for reinforced concrete members. In *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms for Engineering Optimization Applications* (pp. 181-199). Springer, Singapore. [\[Crossref\]](#)
  53. Ziolkowski, P., & Niedostatkiewicz, M. (2019). Machine learning techniques in concrete mix design. *Materials*, 12(8), 1256. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 7**

# **AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLERİN**

# **OPTİMİZASYONU**

Ayla OCAK  
Sinan Melih NİGDELİ  
Gebrail BEKDAŞ

# Ayarlı Sıvı Sönümleyicilerin Optimizasyonu

## Optimization of Tuned Liquid Dampers

### BÖLÜM HAKKINDA

Kütle sönümleyicileri olarak içinde sıvı bulunan tanklar da kullanılmaktadır. Böylelikle sıvının çalkalanması sonucunda oluşan kuvvetler titreşimlerin azalmasına ve sönümlemede etkili olmaktadır. Bu tür sönümleyici sistemlerde optimum olarak ayarlanmalıdır. Bu bölümde sıvının çalkalanma hareketinin eşdeğer olarak doğrusallaştırılmış durum için armoni arama ve çiçek tozlaşma algoritması için optimizasyonu sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Ayarlı sıvı sönümleyiciler, optimizasyon, çalkalanma hareketi

### ABOUT the CHAPTER

Tanks containing liquid are also used as mass dampers. Thus, the forces resulting from the shaking of the liquid are effective in reducing and damping vibrations. In such damping systems, it must be optimally adjusted. In this section, optimization considering the sloshing motion of the liquid for equivalently linearized case is presented for harmony search and flower pollination algorithm.

**Keywords:** Tuned liquid dampers, optimization, sloshing motion

## Giriş

Pasif kontrol sistemleri, Newton'un enerjinin korunumu yasasını kullanarak, yapıya dışardan gelebilecek her türlü dış etkenin enerjisini bir yay ve kütle yardımıyla sistemde depolayan sistemlerdir. Buradaki temel prensip gelen kinetik enerjiyi bir kayıp yaşamadan mekanik enerjiye çevirmek ve hareketin sönümlenmesinde ek bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan kendi enerjisiyle hareketi istenilen seviyede tutmaktır. Pasif kontrol sistemleri, sönümlemede, sisteme gelen yüklerin enerjisini kullandıkları için kendi kendine yetebilen sistemler olarak görülmektedir.

Ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD), kütle olarak içerisinde çeşitli sıvıların kullanıldığı, dış etkenlerin enerjisiyle bu sıvının çalkalanmasının sağlanıp, yaratılan çalkalanma enerjisiyle sistemin hareketinin sönümlendiği pasif bir kontrol sistemidir. Bu sönümleyicileri, pasif bir kontrol sistemi olan ayarlı kütle sönümleyicilerin, kütlelerin sıvı seçildiği bir çeşidi olarak da ifade etmek mümkündür. İçerisinde buldukları sıvının çalkalanma enerjisini kullandıkları için sıvının karakteristik özellikleri kontrolün sağlanmasında önemli rol oynamaktadır. Sönümü etkileyen parametreler arasında sıvı özellikleri olduğu gibi tankın geometrik özellikleri de etkili olmaktadır.

Ayarlı sıvı sönümleyici cihazların ilk uygulaması, gemilerdeki titreşimin kontrolü için tasarlanmıştır (Hüsem, M. ve Yozgat, E., 2005). Gemi makinelerindeki titreşimi önlemedeki performansı, uydu kontrolünde de kullanılmış, titreşim kontrolündeki etkileri düşünüldükçe, Bauer'in çalışmalarıyla yapı hareketinin kontrolünde nasıl etki edebileceği üzerine araştırmalar yapılmıştır (Moiseyev, 1952; Jamalabadi, 2020; Abramson, 1963; Bauer, 1984). 1987'de Modi ve Welt iki ve üç boyutlu yapısal modellerde sıvı bulunduran sönümleyicilerin düşük frekanslı titreşimlerin kontrolü üzerine araştırma yapmasıyla, titreşimlerin kontrolünde etkili olduğunu anlaşılmıştır (Modi ve Welt, 1987). Sıvı sönümleyicilerin yapı kontrolü üzerindeki etkinliği, bina, kule vb. çeşitli yapılar üzerinde yapılan araştırmalar konu olmuştur (Won ve diğ., 1997; Yamamoto ve Kawahara, 1999; Xue ve diğ., 2000). Genellikle rüzgâr titreşimlerinin bastırılması üzerindeki olumlu etkileri sebebiyle rüzgâr testlerine maruz bırakılmış yapılarda yoğun araştırmalar yapılmıştır (Lee



Ayla Ocak 

Sinan Melih Niğdeli 

Gebrail Bekdaş 

Istanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul,  
Türkiye  
E-posta: aylaocak@outlook.com  
melihni@iuc.edu.tr  
bekdas@iuc.edu.tr

**Bu bölümü alıntıla / Cite this chapter as:**  
Ocak, A., Niğdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2023).  
Ayarlı sıvı sönümleyicilerin optimizasyonu.  
G. Bekdaş, & S. M. Niğdeli (Ed.), *Ayarlı kütle  
sönümleyicilerinin optimum ayarlanması*  
içinde [s. 38-43]. İstanbul: İÜC Yayınevi.



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.



ve Min, 2011; Suthar ve Jangid, 2021). Deprem gibi sismik uyarılar karşısında gösterdiği tepkiler üzerinde de etkili olabileceği çeşitli çalışmalarla desteklenmiştir (Ong vd., 2017; Fu vd., 2019; Pandit ve Biswal, 2020).

Gelişen teknoloji ile farklı kontrol sistemlerinin türetilmesiyle tasarım alternatifleri artmış, tasarımdaki bu çeşitlilik optimum tasarım seçeneklerinin elde edilmesini gerekli hale getirmiştir. Optimizasyon işlemi, problemin amacına yönelik sınıflandırmalar yaparak optimum tasarımın oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu süreç çeşitli algoritmalarla uygulanarak en iyi çözümlerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Sönümleyicilerin optimizasyonu da yapısal kontrolün iyileştirilmesinin bir parçası olarak kabul edilmelidir.

Ayarlı sıvı sönümleyicilerin tasarımında, TLD parametrelerinin optimizasyonu, yapı hareketinin azaltılmasındaki performansı oldukça etkilemektedir. 90'lı yıllardan günümüze kadar TLD'lere gerek parametrik gerekse malzemeye yönelik optimizasyon işlemi uygulanmıştır (Gao vd., 1997; Wu vd., 2005; Debarma vd., 2010; Hu ve Xu, 2020; Mehrkian ve Altay, 2020; Tanveer vd., 2020; Bozer, 2021).

Optimizasyon, çeşitli algoritmalar ile yapılan bir işlemdir. Meta-sezgisel algoritmalar, doğa ve canlı davranışlarından esinlenerek türetilmiş bir optimizasyon yöntemleridir. Bu algoritmalar kimi zaman canlıların yiyecek arama, korunma gibi temel içgüdüsel davranışından türetildikleri gibi insan doğasındaki öğrenme yetisinden yola çıkarak da üretilebilmektedir. Metasezgisel algoritmalara örnek olarak Genetik Algoritma (Holland, 1975), Tavla Benzeşimi (Kirkpatrick, 1983), Parçacık Sürü Optimizasyonu (Kennedy vd., 1995), Armoni Arama Algoritması (Geem vd., 2001), Yapay Arı Kolonisi (Karaboğa, 2005), Guguk Kuşu Arama (Yang ve Deb, 2009), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Rao vd., 2011), Çiçek Tozlaşma Algoritması (Yang vd., 2012), Gri Kurt Optimizasyonu (Mirjalili vd., 2014) ve Jaya Algoritması (Rao vd., 2016) gösterilebilir.

Bu bölümde, deprem yükü altındaki ayarlı sıvı sönümleyici cihazın tasarım parametrelerinin optimizasyonu için Armoni Arama Algoritması (HS) ve Çiçek Tozlaşma Algoritmaları (FPA) kullanılarak yapı hareketini minimum düzeye indirecek optimum tasarım parametrelerinin optimizasyonu anlatılmaktadır.

### Ayarlı Sıvı Sönümleyicilerin Optimum Tasarımı

Bu bölümde ayarlı sıvı sönümleyicilerin metasezgisel algoritmalarla optimum tasarımı için kullanılan armoni arama algoritması ve çiçek tozlaşma algoritmaları anlatılarak, sönümleyicinin parametre ve temel hareket denklemleri gösterilmektedir.

Armoni arama algoritması Geem vd.'nin geliştirdiği, müzisyenin insanların beğenisi kazanacak melodiyi aramaya yönelik sürecinden esinlenerek geliştirilmiş bir metasezgisel algoritmadır (Geem vd., 2001). İlham alınan süreçte bir orkestranın çaldığı notalarla çeşitli nota dizileri oluşturularak optimum armoniyi elde eder.

Mühendislik alanındaki problemlerin çözüm uygulamalarındaki etkinliği, bu alanda tercih edilen bir algoritma olmasını sağlamıştır. Algoritmanın inşaat mühendisliği alanında özellikle yapı

kontrol sistemlerinin optimizasyonunda dikkate değer katkıları olduğu görülmüştür. Zhang vd.'nin yaptıkları bir çalışmada yüksek bir kulenin optimizasyonunda armoni arama algoritması, sönüm oranı değeri için diğer algoritmalarından daha etkili sonuç vermiştir (Zhang vd., 2017). Armoni arama algoritmasının etkisi farklı mühendislik problemlerinde de kullanılarak araştırılmıştır (Li vd., 2009; Bekdaş ve Niğdeli, 2011; Niğdeli vd., 2014; Yoo vd., 2014; Loor vd., 2021).

Optimum armoninin elde edilmesinde 3 doğaçlama düşünülebilir (Koziel ve Yang, 2011).

- i. Daha önce dinleyicilerin bildiği ve sevdiği bir melodi hafızadan alınabilir
- ii. Daha önce bilinen bir parçaya benzeyen bir müzik değiştirilerek yapılabilir
- iii. Bu iki seçeneğe uymayan yeni bir müzik bestelenebilir

*Bu algoritma için izlenilecek 4 adım vardır.*

**Adım 1:** Herhangi seçilen bir armoni önce hafızaya alınır.

**Adım 2:** Hafızadaki armoniden yeni armoniler türetilir.

**Adım 3:** Yeni oluşturulan armoni uyumu, armoni uyumunun minimum değerinden fazlaysa, hafızadaki armoni, bir önceki adımda elde ettiği yeni armoniyi kabul eder.

**Adım 4:** Yeni türetilen armoni hafızadaki eski armoniden daha uyumlu olana kadar arama süreci tekrarlanır. Her uyum yakalanmadığı durumda 2.adıma geri dönlür.

Armoni arama algoritmasında 3 temel tasarım faktörü, problemin cinsine göre başlangıçta sisteme tanımlanmaktadır. Bunlar; armoni hafıza boyutu (Harmony Memory Size, HMS), armoni hafıza dikkate alma oranı (Harmony Memory Considering Rate, HMCR) ve ton ayarlama oranıdır (Pitch Adjusting Rate, PAR).

Optimizasyon sürecine, yukarıda belirtilen 1. Adımdaki armoninin hafızaya alınması işlemiyle başlanır. Bunun için tasarım değışkenleri, alt ve üst tasarım limitleri tanımlandıktan sonra rassal armoni vektörleri oluşturularak çözüm matrisi içerisinde depolanır. Her bir armoni vektörü Denklem 1'deki gibi oluşturulmaktadır. Bu vektörü elde etmenin bir diğer yolu da ton ayarlama oranıdır. Burada mevcutlar içerisinde rasgele seçilen n. armoni için -1/2 ve +1/2 arasında yapılan rassal seçim ile Denklem 2'deki gibi yeni armoni vektörü elde edilebilmektedir.

$$X_{new} = X_{min} + rand(0,1)(X_{max} - X_{min}) \quad (1)$$

$$X_{new} = X_n + rand(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2})PAR(X_{max} - X_{min}) \quad (2)$$

Yeni armoni vektörü için hangi denklemin seçileceği konusunda armoni hafızası dikkate alma oranı (HMCR) etkili olur. Yeni çözüm değerlerinin HMCR değerinden büyük ya da küçük olması durumuna göre Denklem 1 ya da 2'nin seçilmesine karar verilir.

Bu işlemler iterasyon sayısı kadar tekrarlanır. Yeni armoni vektörlerinin, amaç fonksiyonunda yerine yazılmasıyla elde edilen değerler eski çözümlerle karşılaştırılarak güncellenir ve yeni çözüm matrisi elde edilmiş olur.

Çiçek tozlaşma algoritması ise tozlaşma sürecinden esinlenerek Yang vd., tarafından geliştirilmiş bir metasezgisel algoritmadır (Yang vd., 2012). Çiçeklerin tozlaşma sürecini kendiliğinden ya da bir tozlayıcı yardımıyla tamamladıkları bilinmektedir. Tozlaşma, arılar ya da kuşların çiçeklerde bulunan polenleri toplamak için gerçekleştirdikleri Lévy olarak isimlendirilen uçma davranışıyla taşınmaları sürecidir (Pavlyukevich, 2007). Bu taşıma esnasında tozlayıcılar taşıdıkları polenlerin yayılımını sağlamış, tozlaşma sürecine katkıda bulunmuş olurlar.

Çiçek tozlaşma algoritması, sönümleyici optimizasyonu başta olmak üzere pek çok farklı mühendislik alanında optimizasyon süreci için tercih edilen algoritmalar arasındadır (Niğdeli ve diğ., 2011; Yucel ve diğ., 2019; Da Silva vd., 2020; Mergos, 2021; Ulusoy vd., 2021). Çeşitli algoritmalarla hibrit hale getirilerek de kullanıldığı uygulamalar mevcuttur (Bekdaş, 2019; Kayabekir vd., 2021).

Çiçek tozlaşma algoritmasıyla optimizasyon işlemi için diğer algoritmalarda olduğu gibi tasarım sabitleri ve alt ve üst tasarım limitlerinin sisteme tanıtılmasıyla başlanır. Probleme yönelik sınır değerler içerisinde kalacak şekilde rassal değerler atanır ve Denklem 3'te gösterildiği gibi bir çözüm matrisinde depolanır.

$$X_{i,j} = X_{min} + rand(X_{max} - X_{min}) \quad (3)$$

Çözüm matrisi elde edildikten sonra global ve lokal arama süreci olarak adlandırılan bir süreç başlar. Bu süreçte, tozlaşmanın kendiliğinden ya da bir tozlayıcı yardımıyla gerçekleşmesi durumuna göre arama değişimi olarak adlandırılan sp anahtar olasılığı değerine göre karar verilir. Arama değişiminin lokal olması durumunda tozlaşma kendiliğinden gerçekleşmiş demektir. Lokal arama sürecinde, halihazırda var olan rassal atanmış çözüm matrisi değerlerinden olmak üzere iki çözüm seçilir. Denklem 4'teki gibi yeni çözümler bu iki değer üzerinden türetilir.

$$X_{new} = X_{i,j} + rand(0,1)(X_k - X_t) \quad (4)$$

Arama değişiminin global olması, tozlaşmanın bir tozlayıcı yardımıyla gerçekleştiği anlamına gelir. Bu durumda, tozlayıcıların Lévy uçuşu davranışı, yeni çözümlerin türetilmesinde devreye girer. Lévy denklemi ve yeni çözümlerin oluşturulduğu denklemler sırasıyla Denklem 5 ve 6'da gösterilmektedir.

$$L = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \varepsilon^{-1.5} e^{\frac{1}{2\varepsilon}} \quad (5)$$

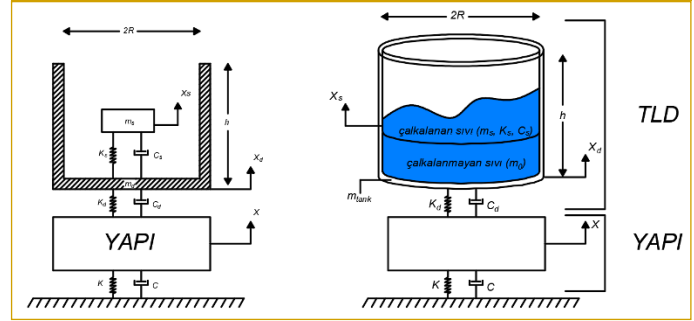
$$X_{new} = X_{i,j} + L(X_{best} - X_{i,j}) \quad (6)$$

Bu matrislerde elde edilen çözümler ile amaç fonksiyonu hesaplanarak, eski çözümlerden daha iyi olup olmadığına dair karşılaştırmalar yapılır ve çözümler iterasyon miktarınca tekrarlanıp güncellenerek son haline gelmiş olur.

Ayarlı sıvı sönümleyiciler, bünyesinde bulundurdukları sıvının karakteristik özelliklerinden faydalanarak çalkalanma enerjisi oluşturup, bu enerjiyi yapı hareketini sönümlemede kullanan cihazlardır. Çalkalanmanın özelliklerinin oluşmasında TLD sıvı katkısının yanında, geometrisi de önemli rol oynamaktadır. Tasarım için seçilen modelde TLD geometrisi için silindirik bir tank tasarımı belirlenmiştir. Optimize edilecek modelde silindirik bir TLD cihazı, tek katlı bir yapının üzerine yerleştirilmiştir. Sıvıların temel çalkalanma prensibine göre bir miktar sıvının çalkalanmayıp pasif hareket ettiği kabul edilmektedir. Bu çalışmada, çalkalanmaya

dahil olmayan sıvı, TLD tankıyla bir bütünlük gibi kabul edilip, çalkalanmayan sıvı, TLD+ çalkalanmayan sıvı ve yapı olmak üzere üç serbestlik dereceli (3DOF) bir sistem modeli düşünülmüştür. Şekil 1'de TLD + Yapı modeli verilmektedir.

Şekil 1  
Yapı + TLD modeli



Üç kısımdan oluşan sistemin parametreleri ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Alt indisinde "s" yazanlar çalkalanma sıvısının, "d" yazılı olan terimler TLD'nin ve indissiz terimler yapının özelliklerini belirtmektedir.

Denklem 7 ve 8'de çalkalanma sıvı kütlesi  $m_s$  ve çalkalanmayan sıvı + boş tankın kütlesi  $m_d$  değerinin hesaplanması gösterilmektedir. Denklemlerde verilen R ve h TLD tank yarıçapı ve yüksekliğini, toplam sıvı kütlesini ifade etmektedir. TLD'nin toplam kütlesidir.

$$m_s = m_{st} \times R \times \frac{\tanh(\frac{1.84h}{R})}{2.2h} \quad (7)$$

$$m_d = m_{tld} - m_s \quad (8)$$

TLD ve çalkalanma sıvısının rijitlik ve sönüm katsayıları TLD için Denklem 9 ve 10'da, çalkalanma için Denklem 11 ve 12'de verilmektedir:

$$k_d = m_d \times (\frac{2\pi}{T_d})^2 \quad (9)$$

$$k_s = m_{st} \times \frac{g(\tanh(\frac{1.84h}{R}))^2}{1.19h} \quad (10)$$

$$c_d = 2 \times \zeta_d \times \sqrt{m_d \times k_d} \quad (11)$$

$$c_s = \zeta_s \times 2\sqrt{m_s K_s} \quad (12)$$

TLD eklenmesiyle elde edilecek sönüm oranı hesabı Denklem 13'te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. Sıvı çalkalanmasına ait sönüm oranı denklemi Denklem 14'te gösterilmektedir.

$$\zeta_d = \frac{c_d}{2m_d \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}} \quad (13)$$

$$\zeta_s = 4.98v^{2R} g^{-\frac{1}{4}} \left[ 1 + \frac{0.318}{\sinh(\frac{1.84h}{R}) \cosh(\frac{1.84h}{R})} \right] \quad (14)$$

Sistemin hareket denklemini oluşturmak için kütle rijitlik ve sönüm katsayısı matrislerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu matrislerin gösterimi sırasıyla Denklem 15-17'de gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m_d & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} K + K_d & -K_d & 0 \\ -K_d & K_d + K_s & -K_s \\ 0 & -K_s & K_s \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} C + C_d & -C_d & 0 \\ -C_d & C_d + C_s & -C_s \\ 0 & -C_s & C_s \end{bmatrix} \quad (17)$$

Matrisler elde edildikten sonra hareket denklemi Denklem 18'deki gibi oluşturulmaktadır.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -[M]1\{\ddot{x}_g\} \quad (18)$$

Optimizasyon işlemi uygulanacak 3DOF sistem modelinde yapının periyodu 1.5 s seçilmiş, FEMA P695'de verilen deprem kayıtları ile Simulink aracılığıyla Matlab üzerinde analiz edilmiştir (FEMA P695; Matlab, 2019). 100 tonluk bir yapı kütlesi için %5'lik kütle oranı alınarak TLD kütlesi belirlenmiştir. TLD içerisinde sıvı olarak su kullanılmıştır. Silindirik TLD tankı için Fujino'nun 1992'deki çalışmasından yola çıkarak tank yüksekliği ve çapı arasındaki oran uygunluğu kontrol edilmiştir (Fujino, 1992). Tablo 1'de TLD optimizasyonu için seçilen tasarım kısıtları verilmektedir.

**Tablo 1**  
Tasarım kısıtları

Açıklama	Tasarım limiti
TLD kütlesi	Yapı kütlesinin %5'i
Maksimum Yükseklik	10 m
Minimum Yükseklik	0.1 m
Maksimum Yarıçap	10 m
Minimum Yarıçap	0.1 m
TLD Periyodu	Yapı Periyodunun 0.5 ~ 1.5'i
Yüksekliğin çapa oranı	$h/2R > 0.15$
Sönüm Oranı	%1 ~ %50

Tablo 2'de TLD parametreleri gösterilmektedir. TLD parametrelerinde, tank yarıçapı yüksekliği, periyodu ve sönüm oranı yukarıda yer verilen iki algoritma ile optimize edilmiştir.

**Tablo 2**  
Tasarım parametreleri

Tanımlama	Parametre
Aktif sıvı kütlesi	$m_s$
Toplam sıvı kütlesi	$m_{st}$
TLD kütlesi	$m_{TLD}$
Boş tank + pasif sıvı kütlesi	$m_d$
Yerçekimi ivmesi	$g$
Kinematik viskozite	$\nu$
Sıvı yoğunluğu	$\rho$
Çalkalanan sıvı rijitliği	$k_s$
TLD rijitliği	$k_d$
Çalkalanmanın Sönüm Katsayısı	$c_s$
TLD Sönüm Katsayısı	$c_d$
Tanktaki sıvı yüksekliği	$h$
Tank yarıçapı	$R$
TLD Sönüm Oranı	$\zeta_d$

Armoni arama algoritması ve çiçek tozlaşma algoritmalarıyla TLD optimizasyonundan elde edilen değerler Tablo 3'te verilmiştir. Deprem kayıtları içerisinde, kritik depremde gerçekleşen deplas-

man ve toplam ivme değerleri her iki algoritma için Tablo 4'te gösterilmektedir. Algoritmaların kritik depremde deplasman ve toplam ivme değerlerini düşürme yüzdeleri Tablo 5'te verilmektedir.

**Tablo 3**  
HS ve FPA optimizasyonu ile elde edilen optimum TLD parametreleri

Değişkenler	Optimize edilmiş değerler	
	HS	FPA
$T_d$ (s)	1.3386	1.5691
$\zeta$	0.1800	0.1722
$R$ (m)	0.7524	0.5257
$h$ (m)	2.5352	5.1149

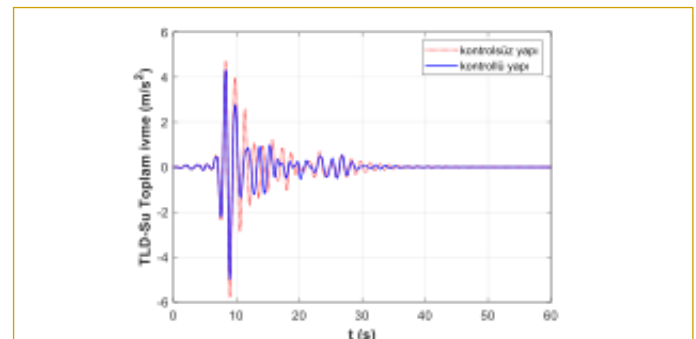
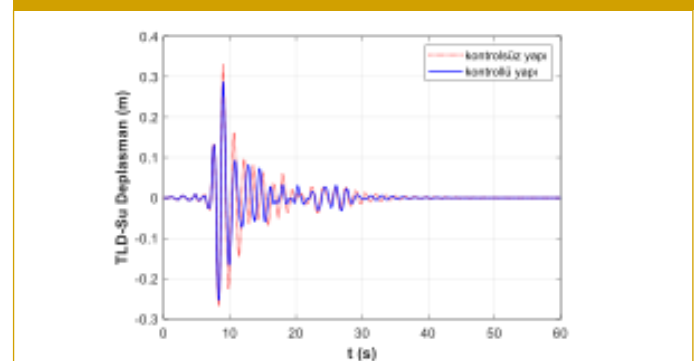
**Tablo 4**  
Kritik deprem TLD analizi sonuçları

ALGORİTMA	TLD'siz Yapı		TLD'li Yapı	
	Deplasman (m)	Toplam ivme (m <sup>2</sup> /s)	Deplasman (m)	Toplam ivme (m <sup>2</sup> /s)
HS	0.3288294	5.8124456	0.2871079	4.9930534
FPA			0.2850272	5.0018847

**Tablo 5**  
Kritik deprem TLD deplasman ve toplam ivme düşürme yüzdeleri

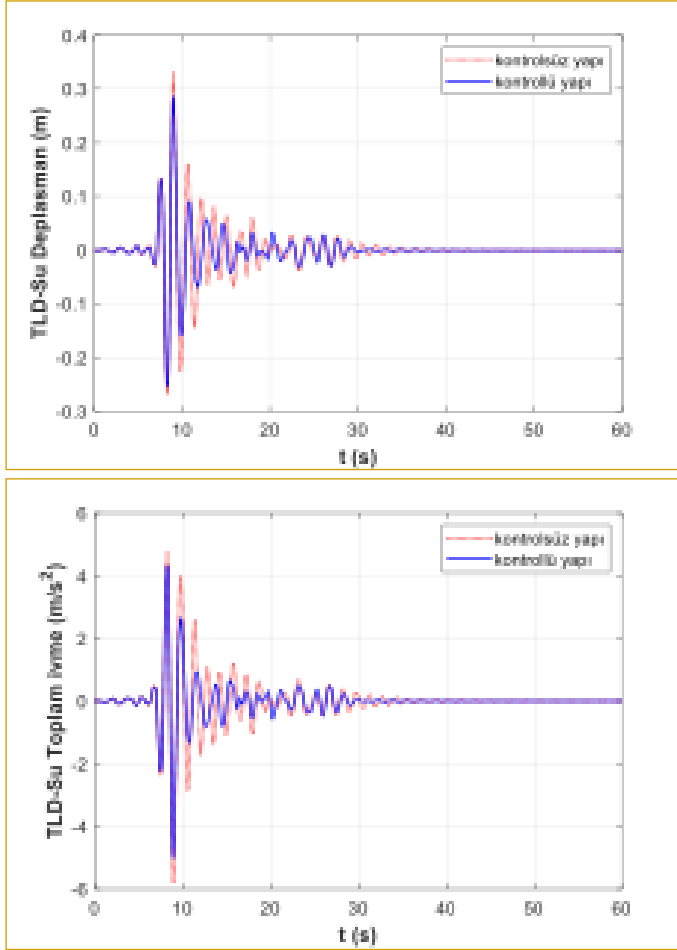
Algoritma	TLD'li Yapı	
	Deplasman (%)	Toplam ivme (%)
HS	12.69	14.10
FPA	13.32	13.95

**Şekil 2**  
Kritik depremde HS algoritmasıyla elde edilen deplasman ve toplam ivme grafikleri



Şekil 3

Kritik depremde FPA algoritmasıyla elde edilen deplasman ve toplam ivme grafikleri



KontROLSÜZ yapı ve TLD eklenmiş kontrollü yapının kritik deprem deplasman ve toplam ivme grafikleri, armoni arama algoritması optimizasyonu için Şekil 2’de çiçek tozlaşma algoritması optimizasyonu için Şekil 3’te gösterilmektedir.

Optimizasyon sonuçlarına bakıldığında kritik deprem için deplasmanı FPA %13.32 lük bir oranda düşürme sağlarken HS %12.69’luk bir düşüş sağlamıştır. Tasarladığımız model için FPA algoritması optimizasyonu deplasman düşürmede daha etkili performans göstermiştir. İki optimizasyon arasında yaklaşık 2 milimetrelük bir fark tespit edilmiştir. İvme düşürme yüzdeleri, her iki algoritmada da dikkate değer miktarlarda düşüş göstermiştir. Bu durum göz önüne alınarak, yapıya eklenen ayarlı sıvı sönümleyicilerin optimize edilmesinin, ivme düşürmede de olumlu etkileri olduğu görülmektedir.

Tüm bu sonuçlara göre sıvı sönümleyicilerin metasezgisel algoritmalarla optimizasyonunun, yapı kontrolünü daha verimli bir hale getirdiği anlaşılmaktadır. Bu da optimizasyonun tasarımda önemli bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that there are no competing interests.

## Kaynaklar

1. Abramson, H. N., Chu, W. H. & Garza, L. R. (1963). Liquid sloshing in spherical tanks, *AIAA Journal*, *1*(2), 384-389. [\[Crossref\]](#)
2. Bauer, H. F. (1984). Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: a new damper for excited structures, *Journal of Sound and Vibration*, *93*(1), 117-133. [\[Crossref\]](#)
3. Bekdas, G. (2019). Optimum design of post-tensioned axially symmetric cylindrical walls using novel hybrid metaheuristic methods. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, *28*(1), e1550. [\[Crossref\]](#)
4. Bozer, A. (2021). Seismic performance of shallow depth tuned liquid damper. *Research on Engineering Structures & Materials*, *7*(3) 431-444. [\[Crossref\]](#)
5. Da Silva, C. A. X., Taketa, E., Koroishi, E. H., Lara-Molina, F. A., Faria, A. W., & Lobato, F. S. (2020). Determining the Parameters of Active Modal Control in a Composite Beam Using Multi-objective Optimization Flower Pollination. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, *8*(2), 307-317. [\[Crossref\]](#)
6. Debbarma, R., Chakraborty, S., & Ghosh, S.K. (2010). Optimum design of tuned liquid column dampers under stochastic earthquake load considering uncertain bounded system parameters. *International journal of mechanical sciences*, *52*(10), 1385-1393. [\[Crossref\]](#)
7. FEMA P-695. Quantification of Building Seismic Performance Factors. Washington.
8. Fu, B., Jiang, H., & Wu, T. (2019). Comparative studies of vibration control effects between structures with particle dampers and tuned liquid dampers using substructure shake table testing methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *121*, 421-435. [\[Crossref\]](#)
9. Fujino, Y., Sun, L.M., Pacheco, B.M., & Chaiseri, P. (1992). Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, *118*(10), 2017-2030. [\[Crossref\]](#)
10. Gao, H., Kwok, K.C.S., & Samali, B. (1997). Optimization of tuned liquid column dampers. *Engineering structures*, *19*(6), 476-486. [\[Crossref\]](#)
11. Geem, Z. W., Kim, J. H., Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *Simulation*, *76*(2), 60-68. [\[Crossref\]](#)
12. Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
13. Hu, J., & Xu, J. (2020). Parameter Optimization and Control Characteristics Analysis of TLMD System Based on Phase Deviation. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, *25*(3), 372-383. [\[Crossref\]](#)
14. Hüsem, M. Ve Yozgat, E. (2005). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Kullanılabilen Yapı Kontrol Sistemleri, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, 20, 121.
15. Jamalabadi, M. Y. A. (2020). Frequency analysis and control of sloshing coupled by elastic walls and foundation with smoothed particle hydrodynamics method. *Journal of Sound and Vibration*, 115310. [\[Crossref\]](#)
16. Karaboğa, D., 2005. *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization* (Vol. 200, pp. 1-10). Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department.
17. Kayabekir, A. E., Nigdeli, S. M., & Bekdas, G., 2021. A hybrid metaheuristic method for optimization of active tuned mass dampers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. [\[Crossref\]](#)
18. Kennedy, J., Eberhart, R.C. (1995). Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks No. IV*, 27 November–1 December Perth, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1942–1948.
19. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing, *Science*, *220* (4598), 671-680. [\[Crossref\]](#)

20. Koziel, S. And Yang, X.S. (eds), 2011. Computational optimization, methods and algorithms (vol. 356), Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, ISBN: 978-3-642-20858-4.
21. Lee, H.H. and Min, K.W. (2011). Reducing acceleration response of a SDOF Structure with a bi-directional liquid damper. *Procedia Engineering*, 14, 1237-1244. [\[Crossref\]](#)
22. Li, L., Yu, G. M., Lu, S. B., Hong, Y., & Chu, X. S. (2009). Harmony search algorithm with dynamic adaptation for the determination of minimum factor of safety of soil slopes. In *2009 Second International Symposium on Computational Intelligence and Design* (Vol. 2, pp. 3-5). IEEE. [\[Crossref\]](#)
23. Looi, A. S., Bidgoli, M. R., & Hamid, M. (2021). Optimization and buckling of rupture building beams reinforced by steel fibers on the basis of adaptive improved harmony search-harmonic differential quadrature methods. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00647. [\[Crossref\]](#)
24. The MathWorks, Matlab R2019a. (2019)., Natick, MA.
25. Mehrkian, B. & Altay, O. (2020). Mathematical modelling and optimization scheme for omnidirectional tuned liquid column dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 484, 115523. [\[Crossref\]](#)
26. Mergos, P. E. (2021). Optimum design of 3D reinforced concrete building frames with the flower pollination algorithm. *Journal of Building Engineering*, 44, 102935. [\[Crossref\]](#)
27. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61. [\[Crossref\]](#)
28. Modi, V. J., Welt, F. (1987). Vibration control using nutation dampers. In *Proceedings of the international conference on flow induced vibration* (pp. 369-376).
29. Moiseyev, N.N. (1952). Dynamics of a ship having a liquid load. *Izv Akad Nauk SSSR Old Tekhn Naud*, 7, 27-45.
30. Nigdeli, S.M., Bekdaş, G. & Alhan, C. (2014). Optimization of seismic isolation systems via harmony search. *Engineering optimization*, 46(11), 1553-1569. [\[Crossref\]](#)
31. Ong, P.P., Adnan, A., Kwork, K.C., Ma, C.K., Tiong, P.L.Y. & Behbahani, H.P. (2017). Dynamic simulation of unrestrained interlocking Tuned Liquid Damper blocks. *Construction and Building Materials*, 144, 586-597. [\[Crossref\]](#)
32. Pandit, A.R. & Biswal, K.C. (2020). Seismic control of multi degree of freedom structure outfitted with sloped bottom tuned liquid damper. In *Structures* (Vol. 25, pp. 229-240). [\[Crossref\]](#)
33. Pavlyukevich, I. (2007). Levy flights, non-local search and simulated annealing. *Journal of Computational Physics*, 226(2), 1830-1844. [\[Crossref\]](#)
34. Rao, R., 2016, Jaya: a simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, *International journal of industrial engineering computations*, 7(1), 19-34. [\[Crossref\]](#)
35. Rao, R.V., Savsani, V.J., Vakharia, D.P. (2011). Teaching-Learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Comput Aided Des*, 43, 303-15. [\[Crossref\]](#)
36. Suthar, S. J., & Jangid, R. S. (2021). Design of tuned liquid sloshing dampers using nonlinear constraint optimization for across-wind response control of benchmark tall building. In *Structures* (Vol. 33, pp. 2675-2688). Elsevier. [\[Crossref\]](#)
37. Tanveer, M., Usman, M., Khan, I.U., Farooq, S.H., 2020. Material Optimization of Tuned Liquid Column Ball Damper (TLCBD) for The Vibration Control of Multi-storey Structure Using Various Liquid and Ball Densities. [\[Crossref\]](#)
38. Ulusoy, S., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Kim, S., & Geem, Z. W. (2021). Performance of optimum tuned PID controller with different feedback strategies on active-controlled structures. *Applied Sciences*, 11(4), 1682. [\[Crossref\]](#)
39. Xue, S.D., Ko, J.M., & Xu, Y.L., (2000). Optimum parameters of tuned liquid column damper for suppressing pitching vibration of an undamped structure. *Journal of sound and vibration*, 235(4), 639-653. [\[Crossref\]](#)
40. Won, A.Y., Pires, J.A. and Haroun, M.A., (1997). Performance assessment of tuned liquid column dampers under random seismic loading. *International journal of non-linear mechanics*, 32(4), 745-758. [\[Crossref\]](#)
41. Wu, J. C., Shih, M. H., Lin, Y. Y., & Shen, Y. C. (2005). Design guidelines for tuned liquid column damper for structures responding to wind. *Engineering structures*, 27(13), 1893-1905. [\[Crossref\]](#)
42. Yamamoto, K. and Kawahara, M., (1999). Structural oscillation control using tuned liquid damper. *Computers & structures*, 71(4), 435-446. [\[Crossref\]](#)
43. Yang, X. S., 2012, *Flower pollination algorithm for global optimization*, Lecture Notes in Computer Science, In: Durand-Lose, J., Jonoska, N., 27, Springer, London, 7445, 240-249. [\[Crossref\]](#)
44. Yang, X. S., & Deb, S. (2009). Cuckoo search via Lévy flights. In *2009 World congress on nature & biologically inspired computing (Na-BIC)* (pp. 210-214). IEEE. [\[Crossref\]](#)
45. Yao, J.T.P., Concept of structural control. *J. of Struct. Div*, ASCE, 98(ST7), pp. 1567-1 574, 1972. [\[Crossref\]](#)
46. Yoo, D. G., Kim, J. H., & Geem, Z. W. (2014). Overview of harmony search algorithm and its applications in civil engineering. *Evolutionary Intelligence*, 7(1), 3-16. [\[Crossref\]](#)
47. Zhang, H.Y. and Zhang, L.J. (2017). Tuned mass damper system of high-rise intake towers optimized by improved harmony search algorithm. *Engineering Structures*, 138, 270-282. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 8**

## **AKTİF AYARLI KÜTLE**

### **SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMİZASYONU**

Aylin Ece KAYABEKİR  
Gebrail BEKDAŞ  
Sinan Melih NİGDELİ



# Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimizasyonu

## Optimization of Active Tuned Mass Dampers

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu bölümde aktif ayarlı kütle sönümleyicilerinin (ATMD) optimum tasarımını sunulmuştur. Oransal-integral-türev (PID) tipi kontrolcü kullanan bir ATMD sistemi yapısal titreşimleri azaltmak için yapının üstüne yerleştirilmiştir. Bu durum için gerekli hareket denklemleri formülasyonu ve optimizasyonda kullanılan armoni arama yönteminin geliştirilmiş türü açıklanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Aktif ayarlı kütle sönümleyicileri, oransal-integral-türev, armoni araştırma yöntemi

### ABOUT the CHAPTER

In this section, the optimum design of active tuned mass dampers (ATMD) is presented. An ATMD system using a proportional-integral-derivative (PID) type controller is placed on top of the structure to reduce structural vibrations. The necessary equation of motion formulation for this situation and the improved type of harmony search method used in optimization are explained.

**Keywords:** Active tuned mass dampers, proportional-integral-derivative, harmony search

## Giriş

Deprem, rüzgâr, trafik vb. dinamik etkiler nedeniyle oluşan yapısal tepkilerdeki artış, hem yapı güvenliğinin sağlanması açısından tehlike oluşturabilir hem de yapı konforunu bozabilir. Bu nedenlerden dolayı, son yıllarda yapılarda söz konusu dinamik etkiler nedeniyle oluşacak yapısal tepkilerin ve titreşimlerin azaltılmasına yönelik araştırmalara verilen önem artmıştır.

Bu çalışmalar sonucunda geliştirilen kontrol sistemlerinin genel çalışma prensibi göze önüne alındığında, bu sistemlerin yapıya ilave bir sönümleme sağlayarak yapıya giren enerjiyi tükettiği görülmektedir. Bu sistemler mevcut yapılara uygulanabileceği gibi amaç uygun olarak binanın inşası sırasında da uygulanabilmektedir.

Tasarım ve donanımına göre farklı türleri bulunan kontrol sistemleri genel olarak aktif ve pasif olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Bu sistemlere ek olarak yarı aktif ve hibrit kontrol sistemlerini ayrı bir başlık altında toplamak mümkündür. Ayarlı kütle sönümleyicileri (TMD'ler), Taipei'deki Taipei 101 (Şekil 1) ve Los Angeles'taki LAX Tema Binası [1] gibi birçok ünlü yapıda uygulanan pasif kontrol sistemleridir.

Aktif sistemlerin bir türü olan aktif ayarlı kütle sönümleyicileri (ATMD'ler), değişken frekanslarda TMD sistemlerinin uygulanabilirliğini artırmak için TMD sistemine bir aktif kontrol mekanizması (sensör, kontrolör ve aktüatör) eklenerek elde edilen sistem olarak tanımlanabilir (Şekil 2). Şekil 2'de görüldüğü gibi, üst katın yanıtı, zamanla değişen kontrol kuvveti doğrusal dinamik aktüatörleri oluşturmak için kontrolörün geri beslemesi olarak kullanılır. Uygulamalarda sensörler ve farklı aktüatörler için farklı ve çoklu geri beslemeler de kullanılabilir. ATMD'lerin pratik uygulamalarının arasında Tokyo, Japonya'daki Shinjuku Park Tower (227m), Incheon, Kore'de Incheon Uluslararası Havaalanı Kontrol Kulesi (100.4m); Edinburgh, İngiltere'deki Hava Trafik Kontrol Kulesi (57m) ve Şanghay, Çin'deki Şanghay Dünya Finans Merkezi (492m) gösterilebilir.



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atif 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.



Aylin Ece Kayabekir<sup>1</sup>

Gebrail Bekdaş<sup>2</sup>

Sinan Melih Niğdeli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye  
<sup>2</sup>Istanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye  
E-posta: aekayabekir@gelisim.edu.tr  
bekdas@iuuc.edu.tr  
melihni@iuuc.edu.tr

**Bu bölümü alıntıla / Cite this chapter as:**  
Kayabekir, A. E., Bekdas, G., & Niğdeli, S. M. (2023). Aktif ayarlı kütle sönümleyicilerin optimizasyonu. G. Bekdas, & S. M. Niğdeli (Ed.), *Ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum ayarlanması* içinde (s. 45-50). İstanbul: İÜC Yayinevi.

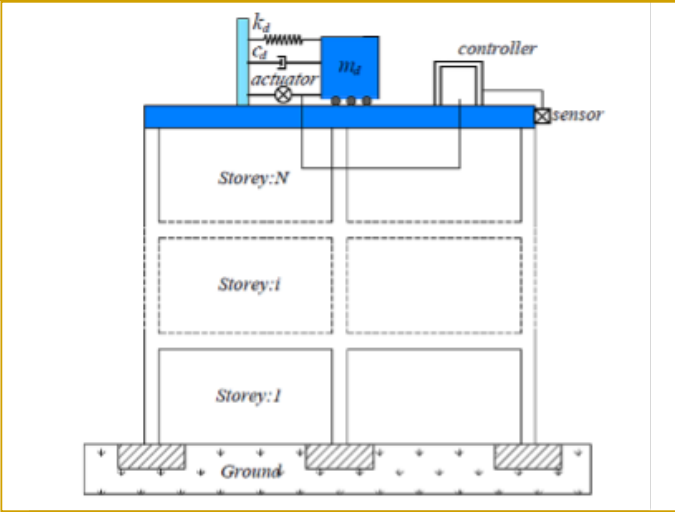
Şekil 1

Taipei 101 (sol), Şanghay Dünya Finans merkezi (sağ)



Şekil 2

ATMD sistemli yapının genel bileşeni



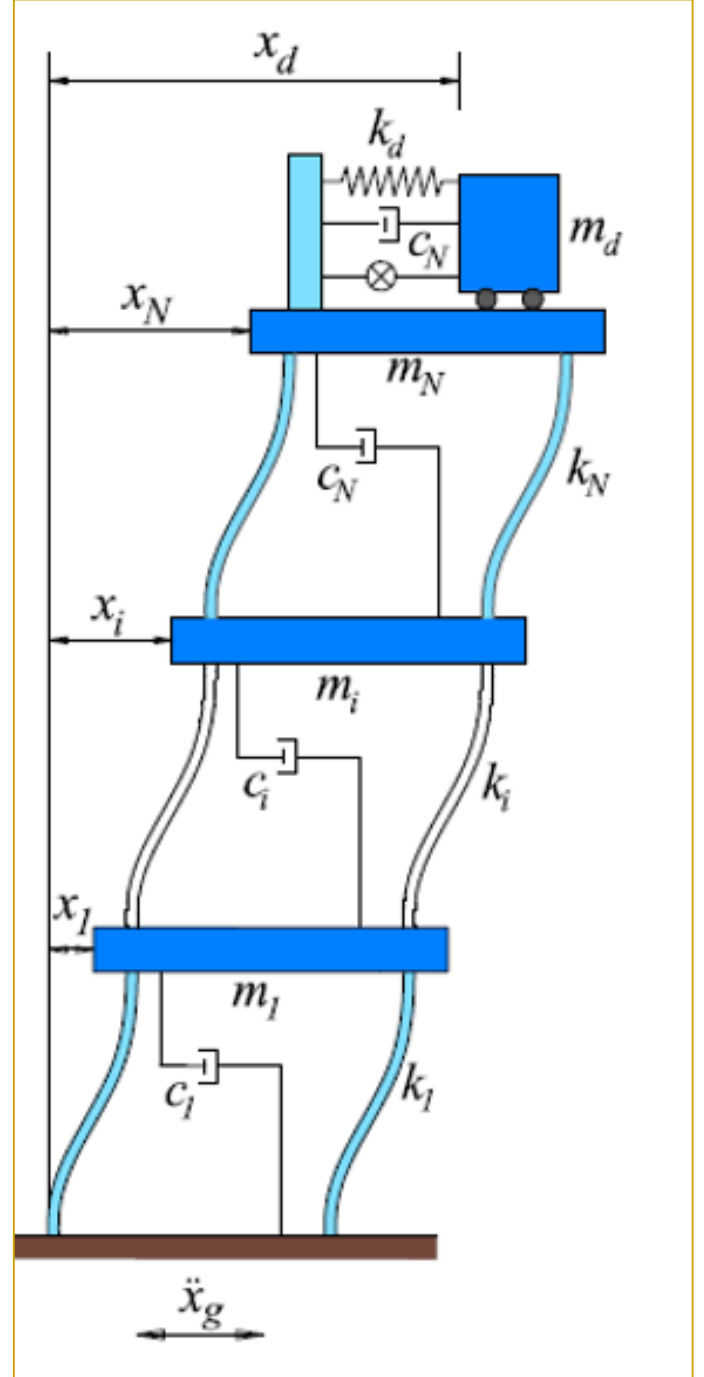
Kontrol sistemlerinin bileşenleri yapının davranışına ve sismik uyarılara göre mükemmel ayara ihtiyaç duyar. Bu durum yapısal kontrol sistemlerinin tasarımında optimizasyon işlemi zorunluluk olmasını sağlar. Bu çalışmada, ATMD'lerin optimum tasarımı yapılması amacıyla müzikten ilham alarak geliştirilen armoni arama algoritmasına (Geem vd. 2001) çeşitli modifikasyonlar yapılarak geliştirilen bir yöntem kullanılmıştır. Bu yaklaşımı kullanan metodoloji, farklı uyarılar altında sistemin etkinliğini doğrulamak için yer ivmesi kayıtlarının zaman tanım alanı yanıtlarını kullanır. Önerilen metasezgisel yaklaşım hem mekanik hem de kontrol algoritması parametrelerini kapsayan tasarım değişkenlerinin optimum değerlerini bulmak için etkilidir. Önerilen ATMD sistemi, ATMD'nin kütle, rijitlik ve sönüm katsayıları gibi fiziksel parametrelerine ek olarak optimize etmek için üç kazancı olan Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolörlerini kullanır.

## Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyicili Yapıların Analizi

Sismik yer hareketi etkisine maruz yapısal sistemlerin çözümlenmesi için yapıların dinamik analizlerinin yapılması gerekir. Dinamik analizlerin yapılması için ise, yapısal modelin hareket denklemlerinin yazılması ve bu denklemlerin çözümlenmesi gerekmektedir. Şekil 3'te son katına aktif ayarlı kütle sönümleyicisi (ATMD) yerleştirilmiş kontrollü yapı modeli görülmektedir. Bu bölümde şekilde gösterilen kesme binası modeli üzerinden söz konusu hareket denklemleri sunulmuştur.

Şekil 3

ATMD kontrollü N katlı bina modeli





Şekil 3'te  $m_i$ ,  $c_i$ ,  $k_i$  ve  $x_i$  sırasıyla N katlı bir binanın  $i$ . katına ait kütle, sönüm katsayısı, rijitlik katsayısı ile  $i$ . katın yere göre göreli deplasmanını sembolize etmektedir. Benzer şekilde kontrol sistemlerine ait kütle, rijitlik katsayısı, sönüm katsayısı ve kontrol sisteminin yere göre göreli deplasman değerleri de sırasıyla  $m_d$ ,  $c_d$ ,  $k_d$  ve  $x_d$  ile ifadelerine karşılık gelmektedir. Şekildeki  $\ddot{x}_g$  ise yer ivmesini göstermektedir.

ATMD sistemi iliştirilen kesme binasının hareket denklemini kontrolsüz ve TMD pasif kontrollü sistemden farklı olarak kontrol kuvveti denkleme eklenmesi gerekir. Buna göre, ATMD sistemi için yapının hareket denklemi,

$$[M] \cdot \ddot{x}(t) + [C] \cdot \dot{x}(t) + [K] \cdot x(t) = -[M] \cdot \{1\} \cdot \ddot{x}_g(t) + F(t) \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir.

Denklemdaki  $[M]$ ,  $[C]$  ve  $[K]$  ifadeleri sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik katsayısı matrislerini göstermektedir. ATMD içeren yapısal model için söz konusu matrisler Denklem (2)-(4) verilmiştir. Bu matrisler zamana bağlı değişen  $\ddot{x}(t)$  (ivme),  $\dot{x}(t)$  (hız) ve  $x(t)$  (deplasman) yapısal tepki vektörleri ile çarpılmaktadır. Söz konusu kuvvet yapının kütle matrisi, birim sütun vektör  $\{1\}$  ile zamana bağlı değişen yer ivmesinin ( $\ddot{x}_g(t)$ ) çarpımına eşittir. Boyutu  $1 \times N$  olan birim sütun vektörün çarpımdaki rolü çarpım matris boyut uyumluluğunun sağlamaktır. Denklem 2-4'ten görüleceği üzere, TMD kontrol sistemi parametreleri olan, rijitlik, sönüm ve kütleli ek kat şeklinde matrislere ilave edilerek göz önüne alınır.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_N & c_N + c_d & -c_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_N & k_N + k_d & -k_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

Benzer şekilde yapısal tepki vektörlerine de ATMD tepkilerinin eklenmesi gerekmektedir. Bu durumda hareket denklemindeki deplasman vektörü

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \\ x_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

olur. Hareket denkleminde yer alan ATMD sisteminin kontrol kuvveti  $F(t)$  ise  $N+1$  elemanlı bir vektör olup ifade olarak;

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ F_u \\ -F_u \end{bmatrix} \quad (6)$$

şeklinde gösterilebilir.  $F$  vektöründeki  $F_u$ , ATMD tarafından üretilen aktif kontrol kuvvetini temsil etmektedir ve kuvvet sabiti (trust constant  $\{K_f\}$ ) ile bobin üzerindeki akımın (current of armature coil ( $i_{ATMD}$ )) çarpılmasıyla elde edilebilir (Denklem 7).

$$F_u = K_f \cdot i_{ATMD} \quad (7)$$

Bobin üzerindeki akım  $i_{ATMD}$

$$R \cdot i_{ATMD} + K_e \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_N) = u \quad (8)$$

ile bulunabilir. Burada  $R$  bobin direncini (resistance value),  $K_e$  bobinin voltaj sabitini (the induced voltage constant of armature coil),  $u$  kontrol algoritmasına göre üretilen kontrol sinyalinin başka bir ifade ile doğrusal motorun akımını göstermektedir.  $\dot{x}_d$  ve  $\dot{x}_N$  ise sırasıyla ATMD ve binanın üst katının hız değerlerini göstermektedir.

Bu bölüm kapsamında tanımlan sistemde kontrol sinyalinin elde edilmesinde PID kontrolcünden yararlanılmıştır. PID; orantı (P), integral (I) ve türev (D) olmak üzere üç ayrı parametreyi kontrol ederek hata sinyallerini kontrol sinyallerine dönüştüren geri beslemeli bir kontrolcüdür. PID kontrolcü denklemine göre kontrol sinyali

$$u = K_p \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}) \quad (9)$$

ile hesaplanmaktadır. Denklemdaki  $K_p$  orantı kazancı veya orantı sabitini,  $T_i$  integral zamanını,  $T_d$  ise türev zamanını gösteren kontrolcü katsayılarıdır.  $e(t)$  ise ölçülmüş mevcut sistem durumu ile amaçlanan sistem durumu arasında farkı gösteren hata sinyalidir. Bu çalışma kapsamında üst kat hız değerlerinin mümkün mertebe sifıra yakınsaması hedeflendiğinden hata sinyali direkt olarak üst kat hızı ( $\dot{x}_N$ ) olarak tanımlanmıştır.

Denklem (9)'daki " $K_p \cdot e(t)$ " kontrolcünün ilk parametresi olan orantıya (P), " $K_p \cdot \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt$ " ikinci kontrol parametresi olan integrale (I), " $K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$ " ise üçüncü kontrol parametresi olan türeve (D) denk gelmektedir. Kontrolcünün her üç parametresinin farklı işlevleri bulunmaktadır. Buna göre orantı işlemi oluşan dış etkiye kontrol sisteminin hızlı cevap vermesini sağlar, ancak parametrenin büyük değerleri salınım oluşmasına neden olmaktadır. İkinci parametre integral işlemi ise istenen sabit durumlu cevabı elde etmeye yardımcı olmasına karşın, uzun periyotlu salınım cevabı oluşmasına sebep olabilir. Son parametre türev işlemi ise, sönümleme kararlılığını sağlanması açısından olumlu katkı sağlar fakat uygun olmayan değerler neticesinde yer hareketlerinde yüksek frekanslı salınımlar daha olasıdır.

Sonuç olarak, bu üç farklı parametre ve işlevlerinin her birinin yapısal sistemin kontrolüne olumlu veya olumsuz etkileri olduğu anlaşılmaktadır. Bir başka ifadeyle parametreler arasında hassas bir denge bulunmakta ve bu dengenin sağlanmasında direkt olarak kontrolcü katsayıları etkili olmaktadır. Dolayısıyla bu katsayıların en uygun değerlerinin bulunmasında optimizasyon işleminin yapılması gereklidir.

PID kontrolcülü ATMD optimizasyon problemindeki tasarım değişkenleri ATMD sisteme ait kütle ( $m_d$ ), periyot ( $T_{atmd}$ ) ve sönüm oranı ( $\xi_d$ ) ile sistemdeki PID kontrolcüye ait katsayılar olan oranti sabiti ( $K_p$ ), integral zamanı ( $T_i$ ) ve türev zamanı ( $T_d$ )'dır. ATMD sistemin ait periyot ( $T_{atmd}$ ) ve sönüm oranı ( $\xi_d$ ) değerleri

$$T_{atmd} = 2\pi \sqrt{\frac{m_d}{k_d}} \quad (10)$$

$$\xi_d = \frac{c_d}{2m_d \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}} \quad (11)$$

ifadeleri kullanılarak hesap edilebilir. Problemin tasarım sabitleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1**  
Tasarım sabitleri

Sembol	Tanım
$m_i$	Kat kütleli
$k_i$	Kat rijitlik katsayısı
$c_i$	Kat sönüm katsayısı
$stmax$	ATMD kol uzaması limiti
$R$	Bobin direnci
$K_f$	Kuvvet sabiti
$K_e$	Bobinin voltaj sabiti

Hareket denklemleri Matlab Simulink (Mathworks, 2010) yardımıyla yapının sismik etkiler altında çözümünü gerçekleştirilir. Bu çözümlenme sonucunda, dinamik etkilere altındaki yapının zaman tanım alanında deplasmanları (yapının dinamik yüklere cevabı) elde edilir. Kontrol sisteminin amacı söz konusu yapısal deplasmanların azaltılması (kontrol altına alınmasını) sağlamaktır. Bu sebeple optimizasyon sürecine ait amaç fonksiyonu

$$f(x) = \max(|x_N|) \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir.

Amaç fonksiyonun hesaplanmasının ardından problem için tanımlanan tasarım kısıt veya kısıtları kontrol edilir. ATMD optimizasyon problemi için tanımlanan tasarımı kısıtı kontrol sisteminin kollarının maksimum uzama oranı olarak belirlenmiştir (Denklem 13).

$$g_1 = \frac{\max(|x_d - x_N|)_{ATMD'li\ durum}}{\max(|x_N|)_{ATMD'siz\ durum}} \quad (13)$$

## Optimizasyon Metodu

Armoni Arama (HS) algoritması, müzisyenin eseri oluştururken en iyi nota kombinasyonunu (armoni) aradığı bu süreçten esinlenerek geliştirilmiş bir bellek tabanlı rastgele arama yöntemidir (Geem vd. 2001). HS algoritmasında bu işlemin optimizasyon problemine uygulanması beş adımda özetlenebilir. İlk adımda problemin tasarım sabiti, tasarım değişkenlerinin üst ve alt limitleri ve algoritmaya özel parametrelerin değerleri ve maksimum iterasyon sayısı tanımlanır. HS algoritması, armoni belleği boyutu (HMS), armoni belleği dikkate alma oranı (HMCR) ve ton ayarlama oranı (PAR) olmak üzere üç parametre kullanır.

İkinci adımda, her bir tasarım değişkeni ( $X_i$ ) için tanımlanan üst ( $X_{i,max}$ ) ve alt limitler ( $X_{i,min}$ ) arasında rassal değerler üreten bir fonksiyon yardımıyla ( $\text{rnd}(0,1)$ ) üretilerek çözüm (armoni) vektörü

olarak adlandırılan bir vektör oluşturulur. (Denklem 14). Daha sonra çözüm vektöründe yer alan tasarım değişkenleri ve problem sabitleri kullanılarak hareket denklemi çözülür ve amaç fonksiyonu hesaplanır. Bu amaç fonksiyonunun değeri de ilgili armoni vektöründe saklanır. Bu işlem armoni belleğinin boyutu kadar tekrarlanır ve her bir armoni vektörü başlangıç çözüm matrisi adı verilen bir matriste saklanır.

$$X_i = X_{i,min} + \text{rnd}(0,1) \cdot (X_{i,max} - X_{i,min}) \quad (14)$$

Üçüncü adım, yineleme sürecini içerir. Bu adımda yeni armoni vektörü oluşturulur. Algoritma kurallarına göre yeni vektör iki şekilde oluşturulabilir. İlk seçenek, ikinci adıma benzer şekilde, tanımlanan üst ve alt limitler arasında tasarım değişkenlerini rastgele oluşturmaktır.

İkinci seçenek ise çözüm matrisinden (Denklem 15) seçilen ( $X_{i,old}$ ) bir vektör kullanılarak yeni bir vektör oluşturmaktır. Bu oluşturma işlemi sırasında, tasarım değişken limitlerinin farkı ile PAR çarpılarak rastgele yeni değerler ( $X_{i,new}$ ) elde edilir.

$$X_{i,new} = X_{i,old} + \text{rnd}(0,1) \cdot \text{PAR} \cdot (X_{i,max} - X_{i,min}) \quad (15)$$

Yeni çözüm vektörünün üretilirken iki seçenekten hangisinin uygulanacağına ise armoni belleği dikkate alma oranı (HMCR) değerine göre karar verilir. Buna göre rastgele bir değer üretilir ve bu değer HMCR'den küçükse birinci seçenek (Denklem (14)) aksi takdirde ikinci seçenek (Denklem (15)) uygulanır.

Bu çalışma kapsamında önerilen optimizasyon yönteminde klasik HS algoritmasının performansının artırılması amacıyla çeşitli modifikasyonlar yapılmıştır. ATMD'nin optimal ayarı için HS'nin modifikasyonu olarak, seçilen mevcut çözüm ( $X_{i,old}$ ) iki şekilde belirlenmektedir. İlk yol olarak, mevcut çözüm en iyi çözüm olarak seçilmesidir. En iyi çözümün kullanım olasılığı, en iyi çözüm dikkate alma oranı (BSCR) adı verilen bir parametre ile belirlenir. HMCR ile gerçekleştirilen işleme benzer şekilde, karar için BSCR değeri rastgele bir sayı ile de karşılaştırılır. İkinci yol ise, mevcut çözümlerden biri rassal olarak belirlenir.

Algoritmanın yapısında yapılan ikinci modifikasyon ise, orijinal HS algoritmasında optimizasyon süreci boyunca sabit olan HMCR ve PAR değerlerinin süreç içerisinde değiştirilmesidir. Bu çalışmada HMCR ve PAR parametreleri söz konusu değişim Denklem 16-17'de verildiği gibi iterasyona bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Denklemlerden de anlaşılacağı üzere bu değişiklik ile PAR ve HMCR parametreleri iterasyonlar ilerledikçe küçülmektedir. Bu durumda, optimum sonuçlar, PAR'ın azaltılmasıyla mevcut bir çözüm etrafında daha küçük bir aralıkta aranır. HMCR'nin azaltılması ile ikinci seçenek daha fazla imkana sahip olacaktır. HMCR'nin bu değişimi ikinci seçenek olan yerel bir arama aşamasının olasılığını artırarak ve optimum çözüme yakınsamayı sürecini hızlandırır. Küçük bir sabit PAR ve HMCR değerleri değişiklik yapılmadan kullanılırsa, işlem genellikle başlangıçta küçük bir aralıkla yerel aramaya yönlendirmeyi gerektirdiğinden, optimizasyon işlemi yerel bir optimum sonuca takılabilir. Optimizasyon süreci global optimuma yakın iyi bir çözüm bulduktan sonra küçük parametreler bir avantaj olabilir.

$$\text{PAR} = \text{PAR}_{in} \left(1 - \frac{IN}{MI}\right) \quad (16)$$

$$HMCR = HMCR_{in} \left(1 - \frac{IN}{MI}\right) \quad (17)$$

MI ve IN sırasıyla maksimum ve mevcut iterasyon sayılarına karşılık gelir. Optimizasyon sürecinin başlangıcında algoritma parametrelerinin başlangıç değerleri PAR<sub>in</sub> ve HMCR<sub>in</sub> olarak gösterilmiştir.

Bir sonraki adımda, yeni vektör, çözüm matrisinde depolanan vektörlerle karşılaştırılır. Amaç fonksiyonu açısından, yeni vektör matristeki mevcut vektörden daha iyiye, mevcut vektör yenisiyle değiştirilir. Aksi takdirde, çözüm matrisi mevcut haliyle korunur.

Karşılaştırma, ihlal olmayan çözümler karşılaştırılırken amaç fonksiyonunun değerine göre yapılır ve en küçük olanı daha iyi bir çözüm olarak seçilir. Tasarım kısıtlaması da karşılaştırılır. Tasarım kısıtlarının ihlali varsa, ihlal miktarları kontrol edilir ve en az ihlale sahip olan daha iyi olan çözüm seçilir. İhlal olmayan çözüm her zaman ihlal olandan daha iyi olarak kabul edilir.

Son adımda ise durdurma kriteri kontrol edilir. Durdurma kriteri sağlanana kadar iterasyon süreci devam eder. Farklı şekillerde tanımlanabilen durdurma kriteri bu çalışmada maksimum iterasyon sayısı olarak belirlenmiştir.

## Sayısal Örnek

Önerilen yöntem etkinliği araştırılması amacıyla üzerinde ATMD bulunan 10 katlı bir kesme binasına uygulanmıştır (Singh vd. 2002). Kesme binasının her kat aynı özelliklere sahiptir (Tablo 2). Tasarım sabitleri (yapısal özellikler), tasarım değişkenlerinin aralıkları ve algoritma parametreleri Tablo 2'de listelenmiştir. Ayrıca, sabit ATMD parametreleri de Tablo 2'de verilmiştir (Kayabekir vd. 2020).

**Tablo 2**

*Problem için sayısal veriler*

Tanım	Değer	Birim
$m_i$	360	ton
$k_i$	650	MN/m
$c_i$	6.2	MNs/m
$m_d$	36-180	ton
$T_{atmd}$	0.495-1.484	s
$\xi_d$	1-50	%
$K_p$	(-10000)-(10000)	Ns/m
$T_d$	(-10000)-(10000)	s
$T_i$	(-10000)-(10000)	s
st_max	4	-
HMS	10	-
HMCR <sub>in</sub>	0.5	-
PAR <sub>in</sub>	0.05	-
BSCR	0.3	-
MI	5000	-
R	4.2	Ω
$K_r$	2	N/A
$K_e$	2	V

Optimizasyon sürecinde TMD'nin kütlesi, yapının toplam kütlelerinin minimum %1'i ve maksimum %5'i aralığında taranmıştır.  $T_{atmd}$  aralığı ise kontrolsüz yapının kritik periyodunun 0.5 ve 1.5 katına göre tanımlanmıştır. Optimizasyon işlemi sırasında 22 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Bu kayıtların 44 uyarısı vardır (her kayıt için 2 doğrultu) ve bu kayıtlar FEMA P-695'te uzak alan yer hareketi kayıtları olarak gruplandırılmıştır.

Tasarım değişkenleri, amaç fonksiyonu ve tasarım kısıtlarının optimum değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te pasif TMD'nin optimum sonuçları da verilmiştir.

**Tablo 3**

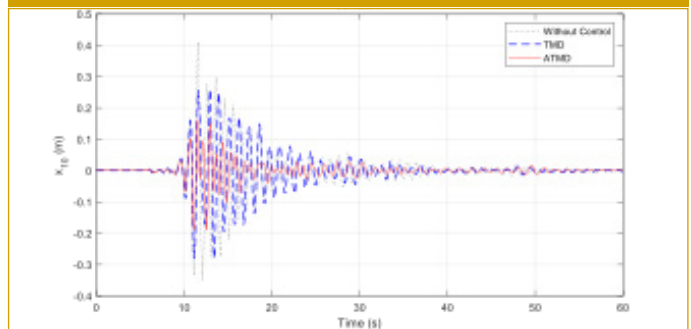
*Optimum sonuçlar*

	TMD	ATMD
$m_d$ (t)	180	180
$T_{atmd}$ (s)	0.9434	1.0797
$\xi_d$ (%)	4.69	10.15
$K_p$ (Ns/m)	-	8762.9
$T_d$ (s)	-	-79.12
$T_i$ (s)	-	-2748.1
$f(x)$ (m)	0.2802	0.1897
$g_1$	2.0755	3.2983

Amaç fonksiyonu değeri için dikkate alınan kritik uyarım, Düzce depremi Bolu kaydının BOL090 bileşenidir. Bu uyarım altında yapının üst katının maksimum yer değiştirmesi kontrolsüz yapı için 0.41 m'dir. Bu değeri, üstyapı kütlelerinin maksimum %5'i olan bir TMD kullanılarak 0.2802 m'ye düşürülebilirken, ATMD kullanılması durumunda 0.1897 m'ye kadar azaltmak mümkündür. Bu durum, kritik uyarımın zaman geçmişi grafiklerinden de açıkça görülebilir (Şekil 4).

**Şekil 4**

*Kritik kayıt altında yapının en üst katının zaman alanı yer değiştirmesi*



*Açıklama notu.* Kayabekir, A. E., Bekdas, G., Nigdeli, S. M., & Geem, Z. W. 2020, Optimum design of PID controlled active tuned mass damper via modified harmony search. *Applied Sciences*, 10(8), 2976 kaynağından alınmıştır.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that there are no competing interests.

### Kaynaklar

1. FEMA P-695. Quantification of Building Seismic Performance Factors. Washington
2. Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan GV. (2001) A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simul*, 76(2), 60-68. [\[Crossref\]](#)
3. Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Geem, Z. W. (2020). Optimum design of PID controlled active tuned mass damper via modified harmony search. *Applied Sciences*, 10(8), 2976. [\[Crossref\]](#)
4. Singh M.P, Singh S., Moreschi L.M. (2002) Tuned mass dampers for response control of torsional buildings. *Earthq. Eng. Struct. D*. 31, 749-769. [\[Crossref\]](#)
5. The MathWorks Inc MATLAB R2010a. Natick, MA; USA, 2010.



