

SARKAÇ TİPİ AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN HARMONİK ETKİLERİ ALTINDAKİ DAVRANIYI: DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

E. Aydın¹, B. Öztürk², H.M. Gökdemir³ ve H. Çetin⁴

¹Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Niğde Üniversitesi, Niğde

²Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara

³İnşaat Müh., İnşaat Müh. Bölümü, Niğde Üniversitesi, Niğde

⁴Yüksek İnceleme Müh., İnşaat Müh. Bölümü, Niğde Üniversitesi, Niğde
Email: bakiozturk@hacettepe.edu.tr

ÖZET

Özellikle yüksek yapılarda, dünyada rüzgâr yüklerine karşı titreşimlerin azaltılması için kullanılan ayarlı kütle sönümleyicilerin kullanımı son yıllarda artmaktadır. Ayarlı kütle sönümleyicilerin rüzgâr etkileri altındaki davranışları, deprem etkisindeki davranışları ile karşılaştırıldığında daha iyi olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada; yapıların harmonik etkiler altındaki davranışını kontrol etmek için ayarlı kütle sönümleyicilerin kullanımı deneysel olarak araştırılmıştır. Üç katlı boyutları indirgenmiş bir kayma çerçevesi modeli tasarlanmış ve yapının en üst katının döemesine sarkaç tipi bir ayarlı kütle sönümleyici tasarlanarak imal edilmiştir. Sarsma tablası üzerine sabitlenen yapı modeline sarkaçın olduğu ve olmadığı durumlarda harmonik yükler verilerek, bu yükler altındaki kat seviyelerindeki ivme değerleri ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayarlı kütle sönümleyicisi olarak tasarlanan sarkaç ucuna balanan kütlelerin iki farklı değeri ve sarkaç boyunun iki farklı değeri için deneyler yapılmıştır. Ayarlı kütle sönümleyici tasarımlarının farklı olduğu modeller kendi aralarında ve sönümleyicisiz durumlarda karşılaştırılarak, içlerindeki en uygun sönümleyici modeli belirlenmiştir. Deneysel çalışmada ölçülen ivme değerlerine göre, sarkaç tipi ayarlı kütle sönümleyicilerin yapıların harmonik etkiler altındaki davranışlarını iyileştirdiği gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Ayarlı Kütle Sönümleyici (AKS), Pasif Sönümleyici, Harmonik Yük, Titreşim Zolasyonu.

1.GİRİŞ

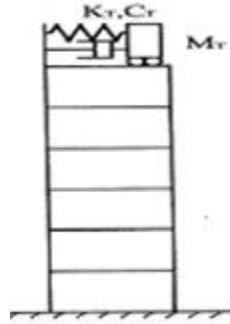
Yapı tasarım tarihi üç döneme bölünebilir. Sadece statik yüklere göre tasarım yapılan dönem klasik dönem olarak adlandırılır. İkinci dönem modern dönem olarak isimlendirilir. Bu dönem, yapıdaki dinamik etkilerin de göz önüne alınarak tasarımların yapıldığı dönemdir. Statik yükler yapı ömrü boyunca çok fazla değişmez. Fakat dinamik yükler gerek büyüklükleri gerekse yönleri açısından değişimlidir. Dinamik yüklerdeki bu değişimi telafi etmek için yeni düzenlemeler ortaya çıkmıştır. Üçüncü dönem olarak ortaya çıkan post modern dönem bu bakımdan önemli bir dönemdir.

Yapılara gelebilecek yükleri önceden belirlemek çok zordur. Bilgisayar, elektro-hidrolik sistemler ve sensör teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda, yapılara gelen dinamik kuvvetler ölçülerek önceden belirlenen bir algoritmaya göre kontrol bilgisayarın da gerekli kontrol kuvvetleri hesaplanabilmekte ve bu kuvvetler yapıya yerleştirilen aktif kuvvet mekanizmaları ile uygulanabilmektedir. Post modern dönemde hedeflenen yapı, deprem ve rüzgâr gibi dinamik çevre etkilerine karşı öngörülen güvenlik, dayanım ve konforu sağlayacak şekilde kendini adapte edebilen bir yapıdır. Kontrol kuvvetleri bazen tendonlar ile uygulanmaktadır. Bu tendonlar ön gerilmeli ve elektrik ile çalışan hidrolik bir mekanizma ile kontrol edilmektedirler. Pasif AKS'ler yapının genelde birinci mod hareketini azaltacak şekilde ayarlanırlar. Diğer modları da kontrol edebilmek aktif AKS'ler ile mümkün

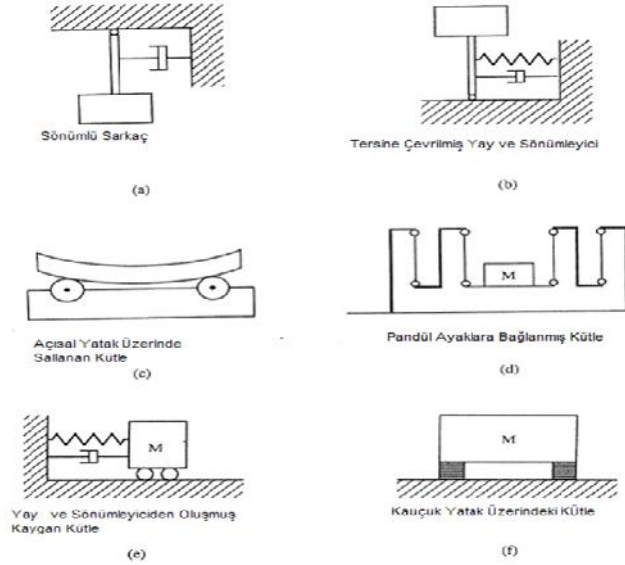
olabilmektedir. Bu prensibe dayanarak ilk olarak Japonya’da Kyobashi Seiwa binasına yerleştirilen aktif kütleli bir sistem tasarlanmıştır. Diğer bir örnek 1992’de tamamlanan Applause kulesidir. Bu yapıda aktif kütle olarak binadaki mevcut helikopter platformu kullanılmıştır.

Ayarlı kütle sönümleyici kavramı ilk olarak Hermann Frahm tarafından gemi makinelerinin gemi omurgasında yarattığı titreşim tehlikesini ortadan kaldırmaya yönelik olarak 1909 yılında ortaya atılmıştır. Frahm 1911 yılında patentini aldığı bu sisteme o yıllarda ayarlı titreşim sönümleyici adını vermiştir. Frahm tarafından ortaya konan bu titreşim kontrol aleti hiçbir doğal sönüme sahip değildir, ayarlı kütlelerin doğal frekansı ile dış etki frekansı birbirine çok yakın olduğunda etkili olmaktadır (Rana ve Soong, 1997). Ayarlı kütle sönümleyiciler ile ilgili ilk teorik çalışmaları 1928 yılında Ormondroyd ve Den Hartog tarafından ortaya konmuştur (Ormondroyd ve Den Hartog, 1928). Bishop ve Welbourn (1952) sönüm içeren bir ana kütleli model üzerinde çeşitli analizler yapmışlar ve çalışmalarını geliştirmişlerdir. Falcon (1967) esas modele belli miktar sönümleyici ekleyerek sistemi optimize etmeyi planlamıştır. Ioi ve Ikeda (1978) sönüm parametrelerinin fonksiyonları için çeşitli düzeltme faktörleri geliştirmişlerdir. Warburton ve Ayorinde (1980) sönümleyici kütle ile ana kütle oranı ve ana kütleli sönüm oranlarının optimum değerlerini bulmuşlardır. Vickery vd. (1983) ana kütle için %5 sönüm oranı olarak çalışmalar yapmıştır. Ayrıca AKS’ye eklenmesi için gerekli optimum sönüm oranını hesaplamıştır. Tsai ve Lin (1993) harmonik etki altındaki sistemin optimum parametrelerini geliştirmiştir. Villaverde ve Koyama (1993) 1985 Mexico Depremi STG ivme kaydını kullanarak, 10 katlı bina üzerinde AKS’nin etkilerini incelemiştir. İddetli depremlerin meydana getirdiği etkiler dikkate alındığında, AKS’nin yüksek yerlerdeki depremlerdeki davranışını da incelenmiştir (Soto-Brito ve Ruiz 1999). 22 katlı bir binaya AKS yerleştirilerek orta yerlerdeki ivme kayıtları kullanılarak nonlineer analizler yapılmıştır. Onların bu çalışmalarını AKS’nin yapılar üzerindeki pik tepkilerinin azaltılmasında etkili olduğunu göstermiştir. Nonlineer etkinin ise çok iddetli depremlerde açığa çıktığını ortaya koymuştur.

Esnek olan yapıların periyodu büyüktür. Dünyada özellikle yüksek yapılarda rüzgar etkileri altında AKS’ler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ayarlı kütle sönümleyici, bir kütle, bir yay ve bir sönümden oluşur ve dış dinamik etkileri azaltmak için genellikle yapının tepesine ilave edilen bir sistemdir. Bu sistemin uygulandığı yapılarda titreşimlerin azaltıldığı bilinmektedir. Ana kütle ile üzerine eklenen AKS kütleli titreşim arasında bir faz farkı oluşturularak, AKS kütleli ana kütle ile ters yönde hareket ederek atalet kuvveti ile sönümleme gerçekleştirilmektedir. Burada önemli olan AKS parametrelerinin optimum değerlerinin seçimidir. Şekil 1’de AKS’li bir yapının basit modeli gösterilmiştir. Şekil 2’de çeşitli AKS tipleri görülmektedir.



Şekil 1. Bina tepesine yerleştirilen AKS modeli (Soong ve Constantinou, 1994)



ekil 2.Çe itli AKS tipleri (Soong ve Constantinou, 1994)

AKS'nin deprem etkisini sönmölemek için uygulanması ile ilgili çalı malar göstermiştir ki, tek bir AKS genellikle deprem etkisinde çok etkili değildir (Wu, 2000). Bunun sebeplerinden biri, deprem hareketi rastgele ve kısa sürede de i ken hareketler içerir. Bundan dolayı deprem hareketi kararsız ve de i ken bir davranıştır. Ayrıca pik de erlere çok çabuk ulaşabilir. Tek bir AKS, binada kısa sürede meydana gelen deprem etkisine karşı kendini adapte edip hemen harekete geçmez. İkinci olarak deprem hareketleri geniş frekans bantları içerir. Özellikle yüksek yapıların davranışlarında yüksek dereceden modlarda etkin olmaya başlar. Yapının hakim frekansına ayarlı tek AKS'li sistemlerde yüksek modların dikkate alınması zor olabilmektedir. Hatta tek AKS'li sistemlerin yüksek mod tepkilerini yükselttiği de görülmüştür. Deprem hareketi rüzgar gibi dar bant frekans içerisine sahip olmadığından daha karmaşıktır ve daha çok belirsizlik içerir. Birçok durumda yer hareketinin ivmesinin en yüksek değeri ilk birkaç saniye içinde gerçekleşir. Son zamanlardaki araştırmalar AKS'lerin sismik performansı ile ilgili tartışılmalı sonuçlar ortaya koymuştur. Bazı çalışmalarda AKS'lerin kuvvetli depremlerin etkilerini azalttığı belirtilirken, diğerleri bu duruma şüphe ile yaklaşmaktadır. Bu çelişkinin en önemli sebebi, genellikle çalışmalarda kullanılan deprem girdilerinin frekans içeriklerinin farklılıklarındanadır.

AKS'lerin sadece bir adet kullanılması sadece tek bir modun kontrol edildiği anlamına gelmektedir. Bu eksikliği fark eden birçok araştırmacı farklı modlara ayarlanabilen AKS sistemler geliştirmişlerdir. Bu sistemler çoklu AKS sistemler olarak isimlendirilirler. Tek serbestlik dereceli bir sisteme (SDOF) birçok frekansa ayarlanabilen AKS'ler eklenerek rastgele ve geniş frekans bandında analiz yapılmasıyla, çoklu AKS sistemlerin AKS'ye göre daha etkili oldukları saptanmıştır (Kareem ve Klie, 1995). Çoklu AKS'ler yerleşim olarak da avantajlı olmalarına rağmen, deplasman kontrolünde klasik AKS tasarımına göre bir avantaj sağlayamamışlardır (Wu, 2000). Üç serbestlik dereceli bir sistemde her kata yerleştirilen AKS'lerle oluşturulan çoklu AKS sisteme uygulanan harmonik ve deprem yükleri sonucunda, katlara eklenen AKS'ler diğer katların deplasmanlarını az da olsa artırmıştır. Sonuç olarak her kata yerleştirilen çoklu AKS'lerden gerekli performans alınamamıştır (Rana ve Soong, 1997).

Literatürde tekli ve çoklu, rüzgar ve deprem etkisindeki çalışmaları mevcuttur. Yoğunluklu olarak çalışmaların çoğunluğu teorik temelli olup, deneysel çalışmalar daha limitlidir. Bu çalışmada indirgenmiş boyutlarda 3 katlı bir kayma çerçevesi modeli üzerine tasarlanan basit bir sarkaç ile yapısal ivmenin azaltılması amaçlanmıştır.

Harmonik etkiler altında, tasarlanan AKS'li modellerin ivmeleri dü ürdü ü gözlenmiştir. Ayrıca sarkaç boyunun ve sarkaç kütesinin de ivmelerinin etkisi de incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Deney Düzeni

Fotoğraf 1.'de görülen deney düzeneğinde kullanılan yapı modeli St37 çeliğinden imal edilmiş 3 katlı bir kayma çerçevesidir. Çerçeve ağırlığı 6500 gr, 1.kata konulan ağırlık 10812 gr, 2.kata konulan ağırlık 8346 gr, 3.kata konulan ağırlık 6718 gr, her bir kat yüksekliği 35 cm, kolonlar 1*0.2 cm, kirişler 1.5*1.5 cm, et kalınlığı 0.1 cm olan tüp kesit, döşemeler ise 24*24 cm'dir. Yapı modelinin konulan ağırlıklar ve bağlantı elemanları ile birlikte toplam ağırlığı yaklaşık olarak 33 kg'dır. Yaklaşık olarak 1. kat ağırlığı 13 kg, 2. kat ağırlığı 10,5 kg, 3.kat ağırlığı 8,9 kg'dır. AKS olarak yapının en üst katına bir sarkaç yerleştirilmiştir. Bu sarkacın boyu ve ucundaki kütle de iştirilerek deneyler yapılmıştır ve hangi parametrelerin daha uygun sonuç verdiği araştırılmıştır. Burada Tablo 1.'de gösterilen 4 farklı AKS modelinin üzerinde durulacaktır. Yapısal davranış ölçümünde ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçer tek eksenli ivme ölçüm yapmayı sağlar. Frekans aralığı 0 - 400 Hz'dir. Sarsma tablası kompakt masaüstü büyüklükte lineer bir sarsma tablasıdır. Harmonik ve rastgele yükler verebilen hassas bir pozisyonlama kapasitesine sahiptir. Sarsma tablası bilgisayardaki yazılım ve kapalı devre dönüşümü sağlayan Control Box cihazı sayesinde istenilen frekans (1 - 10 Hz) ve genlikte (-200 mm, +200 mm), istenilen sayıda tek eksenli (yatay) titreşim oluşturmayı sağlar. Ayrıca verilerin toplanması için genel amaçlı dinamik veri toplama cihazı kullanılmıştır. İvmeölçer bu cihaza bağlanarak, mevcut bir yazılım ile cihazın kayıttığı verileri de iştirilerek alınabilmektedir.



Fotoğraf 1. Sarsma tablası üzerine sabitlenmiş yapı modeli

Bu deneysel çalışma verileri verilen bir harmonik etki (frekansı yapının hakim frekansına eşit) altında AKS'siz deneyler yapılarak, kat seviyelerinden ivme ölçümleri alınmıştır. Daha sonra Tablo 1.'de özellikleri verilen yapı modeline sarkaç eklenmiş bir 4 farklı tip AKS yerleştirilerek aynı deneyler tekrarlanmıştır ve ivme kayıtları

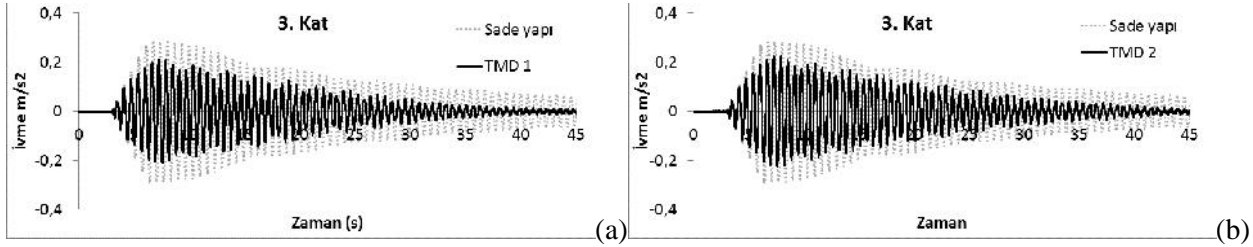
alınmıştır. İvme grafikleri çizdirilerek incelenmiş ve mevcut modeller içerisindeki en uygun sönümleyici parametreleri deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Sarsma tablası üzerine sabitlenen yapı modelinin doğal frekansını bulmak için mevcut yazılımından faydalanılmış ve yapının doğal frekansının 1,5 Hz olduğu belirlenmiştir. Az katlı yapılarda hakim modun 1. Mod olduğu bilinmektedir. Bu yüzden deneylerde sarsma tablasına gönderilen etki frekansı de 1,5 Hz olarak ayarlanmıştır.

Tablo 1. Aktif kütle sönümleyici modellerinin özellikleri

AKS Modeli	Sarkaç Boyu (cm)	Sarkaç Kütle (gr)
TMD 1	13,5	918
TMD 2	13,5	794
TMD 3	11,5	918
TMD 4	11,5	794

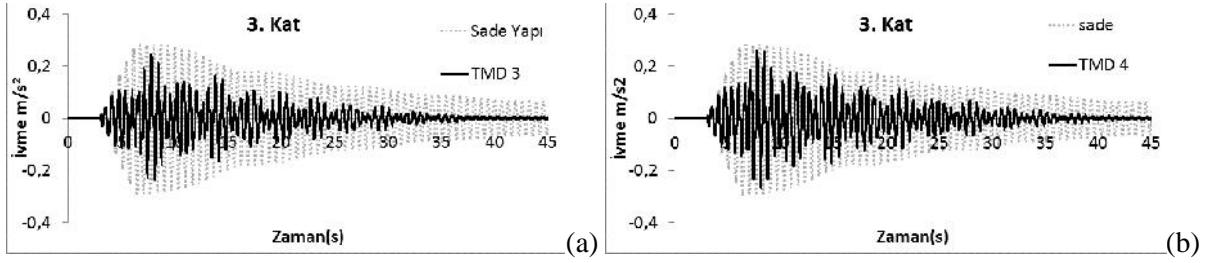
2.2 Deneysel Çalışmanın Bulguları

İvme grafiklerinde yer alan sade yapı ifadesi, yapı modeline ayarlı kütle sönümleyicisi eklenmemiş durumu, TMD ise yapı modeline ayarlı kütle sönümleyicisi AKS'nin eklendiği durumu ifade etmektedir. Yapının hem zorlanmış titreşim hali, hem de serbest titreşim hali grafiklerinde görülebilmektedir. Ekil 3.(a)'da yapıya TMD 1 ($m=918$ gr, $l=13,5$ cm) bağlanması halindeki ivme – zaman grafiği ile yapıya AKS bağlanmamış haldeki ivme – zaman grafiği karşılaştırılarak AKS'nin harmonik davranışa etkisi incelenmiştir. Sade yapı grafiğinin pik ivme değeri $0,3$ m/s² dolaylarında iken AKS eklendikten sonra pik değeri $0,21$ m/s² dolaylarında olduğu görülmektedir.



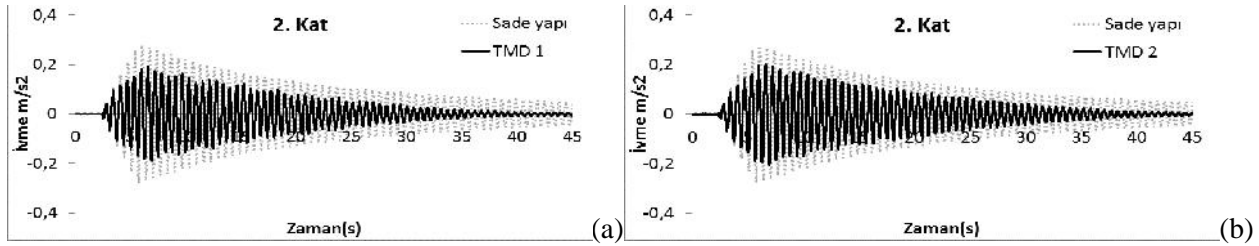
Ekil 3. Sade yapı ile (a) TMD 1'li yapı ve (b) TMD 2'li yapının 3.kat ivme-zaman grafiği karşılaştırılması

Ekil 3.(b)'de yapıya 2 numaralı TMD 1 bağlanması halindeki ivme – zaman grafiği ile yapıya AKS bağlanmamış haldeki ivme – zaman grafiği üst üste çizdirilerek benzer şekilde TMD 2'nin etkisi incelenmiştir. Sade yapı grafiğinin pik ivme değeri $0,3$ m/s² dolaylarında iken, TMD 2 eklendikten sonraki grafikte görülen pik değeri $0,24$ m/s² dolaylarındadır. Ekil 4.(a)'da yapıya 3 numaralı TMD 3 bağlanması, AKS eklendikten sonraki grafikte görülen pik değeri $0,24$ m/s² dolayında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca TMD 3'ün sürekli davranışını incelendiğinde TMD 1 ve TMD 2'ye göre daha iyi olduğu görülmektedir. Ekil 4 (b)'de ise TMD 4'ün davranışını görülmektedir. TMD 4, TMD 1 ve TMD 2'ye göre sürekli davranış açısından bakıldığında, davranışını daha çok azaltmış söylenebilir iken pik değeri olarak $0,28$ m/s² dolaylarındadır.

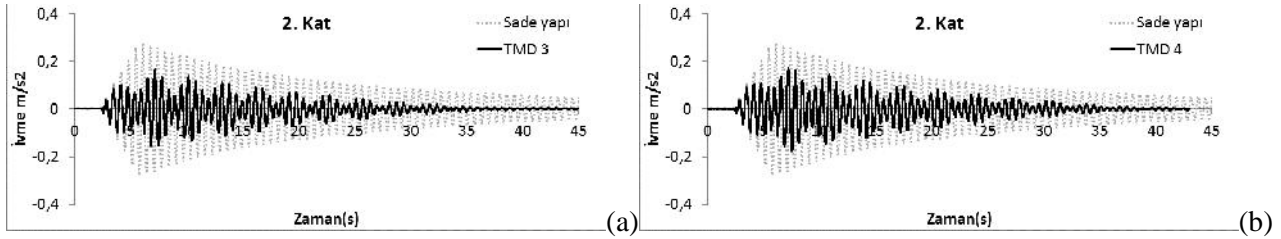


ekil 4.Sade yapı ile (a) TMD 3'li yapı ve (b) TMD 4'li yapının 3.kat ivme-zaman grafiği karşılaştırması

2. katın ivme ölçümleri ekil 5 ve ekil 6'da görülmektedir. ekil 5'e göre TMD 2'nin davranışı TMD 1'e göre daha iyidir. Ayrıca ekil 6'da çizilen TMD 3 ve TMD 4'ün davranışları TMD 1 ve TMD 2'ye göre daha iyi olmakla birlikte, küçük bir farkla TMD 3'ün TMD 4'e göre daha iyi performans gösterdiği söylenebilir.

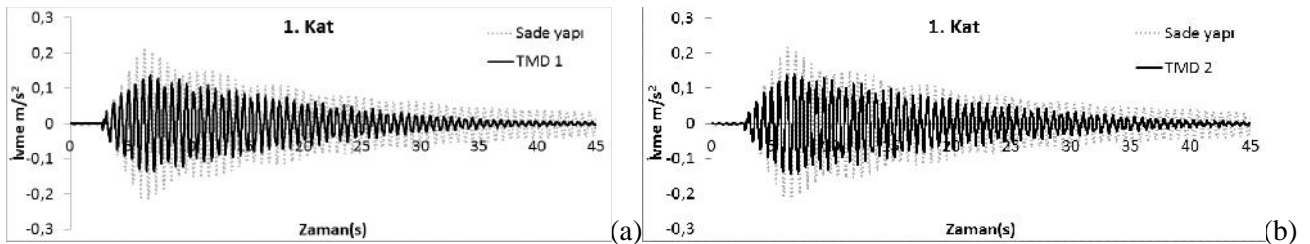


ekil 5.Sade yapı ile (a) TMD 1'li yapı ve (b) TMD 2'li yapının 2.kat ivme-zaman grafiği karşılaştırması

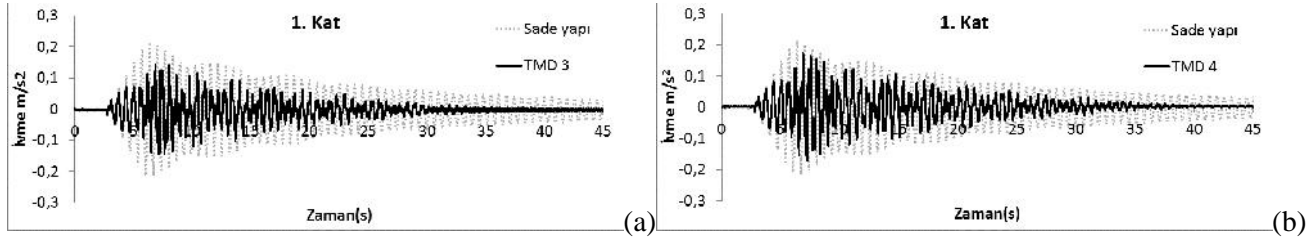


ekil 6.Sade yapı ile (a) TMD 3'li yapı ve (b) TMD 4'lü yapının 2.kat ivme-zaman grafiği karşılaştırması

ekil 7 ve ekil 8'de sürekli davranış açısından bakıldığında TMD 3 ve TMD 4'ün iyi performans gösterdiği söylenebilir.

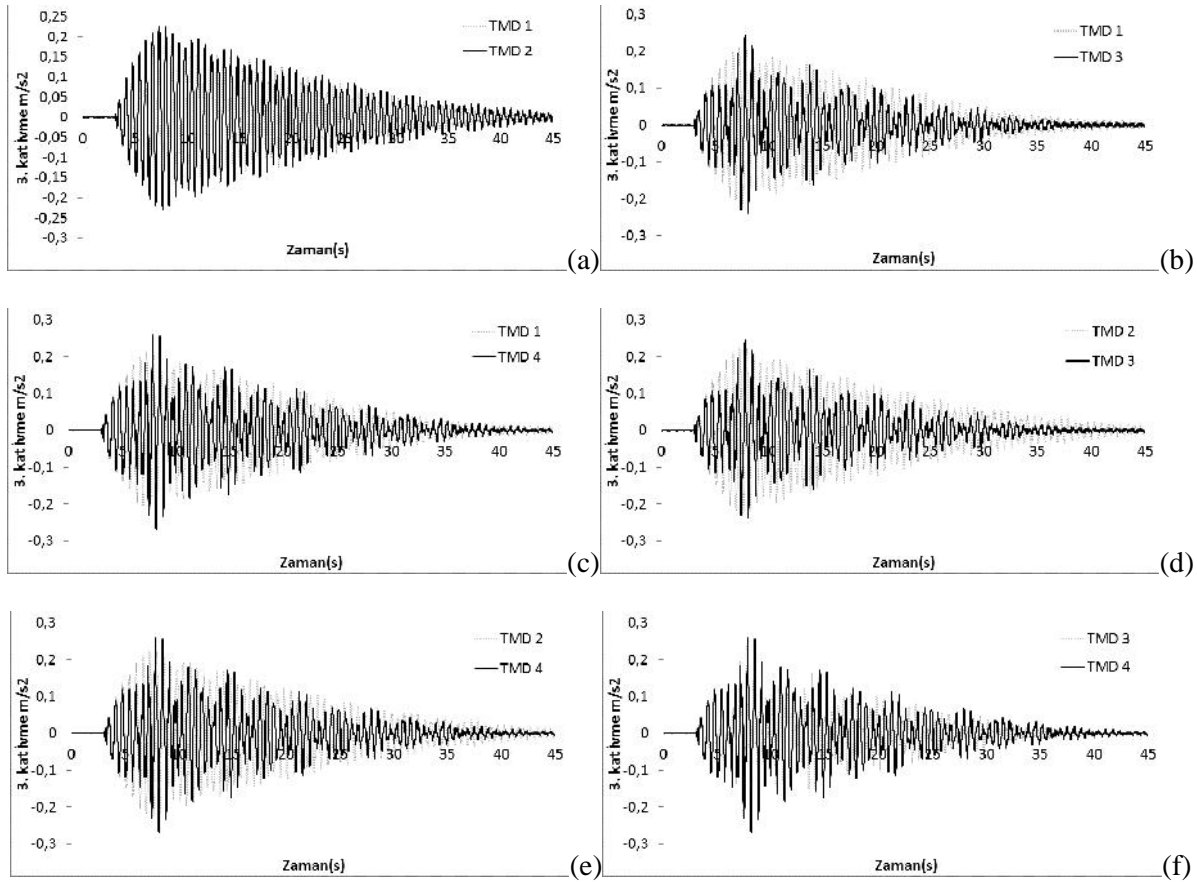


ekil 7.Sade yapı ile (a) TMD 1'li yapı ve (b) TMD 2'li yapının 1.kat ivme-zaman grafiği karşılaştırması



ekil 8.Sade yapı ile (a) TMD 3'li yapı ve (b) TMD 4'li yapının 1.kat ivme-zaman grafiği karşılaştırması

Yapılan deneylerin sonuçlarından elde edilen ivme - zaman grafikleri genel olarak şu sonuca varılmasını sağlar: AKS'li yapılarda AKS'siz yapılara göre ivmeler azalmıştır. AKS'lerin yapıların harmonik etkisi altındaki sürekli davranış ve pik değerlerini büyük oranlarda azalttığı görülmüştür.



ekil 9 (a) TMD 1 ve TMD 2, (b) TMD 1 ve TMD 3, (c) TMD 1 ve TMD 4, (d) TMD 2 ve TMD 3, (e) TMD 2 ve TMD 4, (f) TMD 3 ve TMD 4 modelleri için 3. kat ivme ölçümlerinin karşılaştırılması

ekil 9'da sadece AKS'li modellerin ivme ölçümleri kendi aralarında karşılaştırılmak üzere, 3. katın ivme değişim grafikleri çizilmiştir. TMD 1 ve TMD 2'nin davranışları birbirlerine oldukça yakındır (ekil 9 (a)). TMD 3 ve TMD 4'ün, TMD 1'den daha iyi performans gösterdiği ekil 9(b)-(c)'den görülebilir. Benzer bir durum ekil 9(d)-(e)'de görülmektedir. TMD 3 ve TMD 4, TMD 2'ye göre titreşimi daha çok düşürmüştür. TMD 3 ve TMD 4'ün davranışlarının birbirlerine yakın olduğu ekil 9 (f)'den görülebilir.

3. SONUÇLAR

Deneysel olarak indirgenmiş 3 katlı kayma çerçevesi modeli üzerinde 4 farklı AKS modeli geliştirilmiştir. Bu modellerin yapının harmonik etkiler altındaki ivme davranışları kat seviyelerinde ölçülmüştür. Tasarlanan bütün AKS modelleri yapının ivme davranışında ciddi azalmalara yol açmıştır. Mevcut modeller içerisinde kütlelerin sabit tutulup sarkaç boyunun azaltılması, davranışı daha fazla düzümüştür. Ayrıca sarkaç boyunun sabit tutulup kütlelerin azaltılması mevcut modeller içerisinde çok fazla bir deprem ivmesi sebep olmamakla birlikte kütlesi büyük olan modeller pik davranışları açısından biraz daha iyi sonuçlar vermiştir. Sunulan bilgiler devam etmekte olan bir çalışmanın ilk bulgularıdır. Çalışmanın teorik modelleri, farklı modların kontrolü ve deprem etkisi altındaki davranışları ile ilgili çalışmalar devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- Bishop, R.E.D. ve Welbourn, D.B. (1952). The problem of dynamic vibration absorber. *Engineering, London* 174-769.
- Falcon, K. C., Stone, B. J., Simcock, W. D. ve Andrew, C. (1967). Optimization of vibration absorbers: a graphical method for use on idealized systems with restricted damping. *J. Mech. Engng. Sci.* 9, 374-381.
- Ioi, T., Ikeda, K. (1978). On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system. *Bulletin of the Japanese Society of Mechanical Engineers.* 21:151, 64-71.
- Kareem, A. ve Klie, S. (1995). Performance of multiple mass dampers under random loading. *J. Struct. Engng.* 121:2, 348-361.
- Ormondroyd, J. ve Den Hartog, J. P. (1928). The theory of dynamic vibration absorber. *Trans. ASME, APM* 50:7, 9-22.
- Rana, R. ve Soong, T.T. (1997). Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Engineering Structures* 20:3,193-204.
- Soong, T.T. ve Constantinou, M.C. (1994). Passive and active structural vibration control in civil engineering, *International Sciences Courses and Lectures* 345, New York.
- Soto-Birito, R. ve Ruiz, S.E. (1999). Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28, 1255-1271.
- Tsai, H. C. ve Lin, G. C. (1993). Optimum tuned mass dampers for minimizing steady-state response of support excited and damped systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 22, 957-973.
- Vickery, B. J., Isyumov, N. ve Davenport, A. G. (1983). The role of damping, mass and acceleration. *I. Wind Engnglnd. Aerodynam.*,2, 285-294.
- Villaverde, R ve Koyama, LA. (1993). Damped resonant appendages to increase inherent damping in buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*22, 491-507.
- Warburton, G. B., Ayorinde, E. O. (1980). Optimum absorber parameters for simple systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*8:3, 197-217.
- Wu,J. (2000). Seismic performance, design and placement of multiple tuned mass dampers in building applications, Phd. Thesis, University of Missouri, Rolla.