AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN ÜÇ KATLI YAPI MODELİNİN SİSMİK VE HARMONİK DAVRANIŞINA ETKİLERİ

H. Çetin[1], E. Aydın[2] ve B. Öztürk[3]

[1] *Yüksek İnşaat Mühendisi, Nevşehir*
[2] *Yardımcı Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Niğde Üniversitesi, Niğde*
[3] *Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara*
Email: henainsaat@gmail.com

ÖZET:

Bu çalışmada kat kütleleri ve kat rijitlikleri belli olan üç katlı yapı modelini kontrol etmek için ayarlı kütle sönümleyicilerin (TMD, Tuned Mass Damper) etkinliği araştırılmış olup, optimum ayarlı kütle sönümleyici parametrelerini belirlemek amacıyla sönüm katsayıları ve yay sabitleri üzerine değerlendirmeler yapılmıştır. İlk olarak üç katlı ve bünyesinde ayarlı kütle sönümleyici olmayan normal yapı modelinin birinci modu dikkate alınarak El Centro depremi ve harmonik yükler altında analizi yapılmış ve her katın deplasman ve ivmeleri elde edilmiştir. Ardından sistemin her bir katına ayrı ayrı ayarlı kütle sönümleyici (TMD) eklenmiş, sistem birinci moda göre tekrar analiz edilmiş, ayarlı kütle sönümleyicinin her bir katın deplasman ve ivmesini nasıl etkilediği incelenmiştir. Sonuç olarak optimum ayarlı kütle sönümleyicilerin kat deplasman ve ivmelerini azaltmayı başardığı gözlenmiştir. Ayrıca ayarlı kütle sönümleyicinin harmonik yük etkilerini azaltmada El Centro depreminin etkilerini azaltmaya göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Ayarlı kütle sönümleyicileri, yapısal kontrol, optimum ayarlı kütle sönümleyicileri (TMD) parametreleri.

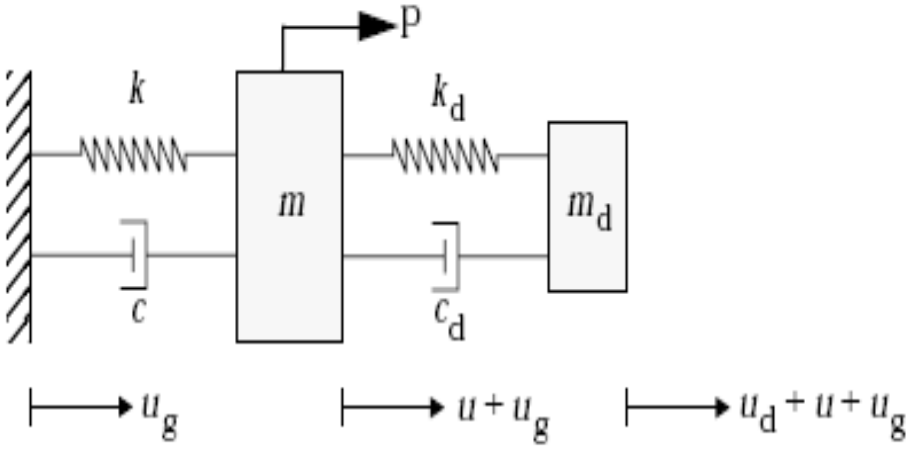
1. AMAÇ VE LİTERATÜR

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 etkilerinde göz önüne alınarak tasarımların yapıldığı dönemdir. Statik yükler yapı ömrü boyunca çok fazla değişmezler. Fakat dinamik yükler gerek büyüklükleri gerekse yönleri açısından değişkendirler. Dış yüklerdeki bu değişimi telafi etmek için yeni düşünceler ortaya çıkmıştır. Üçüncü dönem olarak ortaya çıkan post modern dönem bu bakış açısı ile doğmuştur. Yapıya gelebilecek yükleri önceden tahmin etmek çok zordur. Bilgisayar, elektro-hidrolik sistemler ve sensör teknolojilerindeki ilerlemeler sonucunda artık, yapıya gelen dinamik kuvvetler ölçülerek önceden belirlenen bir algoritmaya göre kontrol yapılarak bilgisayarda 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 sistemleri pasif, aktif, yarı aktif ve taban izolasyon sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Bu sönüm sistemleri ile ilgili detaylı bilgi literatürde mevcuttur. Bu çalışmada yapıların deprem ve rüzgar etkileri altında sismik performanslarını artırmak amacı ile yapıya eklenen pasif ayarlı kütle sönümleyiciler (TMD) incelenmiştir.

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 sönümlendirici adını vermiştir. Frahm tarafından ortaya konan bu titreşim kontrol aleti hiçbir doğal sönüme sahip değildi. Alet sadece kütlenin, ayarlı kütlenin doğal frekansı ile dış etki frekansı birbirine çok yakın olduğunda etkili olmaktaydı (Rana ve Soong, 1997).

Ayarlı kütle sönümleyiciler ile ilgili ilk teorik çalışma 1928 yılında Ormondroyd ve Den Hartog tarafından ortaya konmuş ve daha sonra yayın haline getirilmiş ve yayınlanmıştır. Den Hartog ayrıca 1940 yılında 'Mekanik Titreşimler' adlı kitabında optimum sönüm parametrelerini geliştirmiş, sistemin ana kütlesinde sönüm olmadığını fakat TMD' nin sönüm içerdiğini varsaymıştır (Ormondroyd ve Den Hartog, 1928). Daha sonra Bishop ve Welbourn (1952) ana kütlenin de sönüm içerdiğini varsayarak çeşitli analizler yapmışlar ve çalışmalarını geliştirmişlerdir. Falcon (1967) ana sisteme belli miktar sönümleyici ekleyerek sistemi optimize etmeyi planlamıştır. Ioi ve Ikeda (1978) sönüm parametreleri için fonksiyon olarak çeşitli düzeltme faktörleri eklemişlerdir. Warburton ve Ayorinde (1980) ana kütle oranı ve ana kütlenin sönüm oranlarının optimum değerlerini tablolaştırmışlardır. Thompson (1981), optimum TMD parametrelerini frekanslara bağlı olarak ortaya koymuştur. Warburton (1982) sönümsüz tek serbestlik dereceli sistemlerde optimum TMD parametrelerini geliştirmiştir. Vickery vd. (1983) ana kütlede %5 sönüm oranı ile çalışmalar yapmış, bu çalışmalarını grafik haline getirmişlerdir. Ayrıca TMD' ye eklenmesi gereken optimum sönüm oranını hesaplamışlardır. Tsai ve Lin (1993) harmonik hareket yapan sistemin optimum parametrelerini geliştirmiştir. Ayrıca uygun ampirik denklemler türetmişlerdir. Villaverde ve Koyoama (1993) 1985 yılında meydana gelen Mexico City Depremi ivme kaydını kullanarak, TMD'nin 10 katlı bina üzerindeki etkilerini incelemiştir. Belirli bir bant genişliğinde ve uzun süreli deprem kayıtlarında binanın tepesine yerleştirilen 0.042 kütle oranına sahip TMD'nin binanın tepe deplasmanını %40 oranında azalttığını görmüşlerdir. Yüksek şiddetli depremlerin meydana getirmiş olduğu etkiler dikkate alındığında, Soto-Brito ve Ruiz (1999), TMD'nin yüksek yoğunluktaki depremlerdeki davranışını incelemişlerdir. 22 katlı lineer olmayan bir binaya TMD yerleştirerek Deprem anındaki davranışını incelemişlerdir. Onların bu çalışmaları TMD'nin yapılar üzerindeki pik tepkilerinin azaltılmasında etkili olmuştur. Bunun sebebi yapının lineer olmayan davranışıdır. Bu lineer olmayan etki ise çok şiddetli depremlerde açığa çıkmaktadır.

Şekil 1'de, bir yapı ve bu yapıya bağlı olan TMD'nin modeli görülmektedir. Burada k, c ve m yapının rijitlik katsayısı, sönüm katsayısı ve kütlesini ifade eder. Ayrıca, k_d, c_d ve m_d ise TMD'nin rijitlik katsayısı, sönüm katsayısı ve kütlesini gösterir. TMD'nin kütlesinin yapıya göre faz dışı hareketi ile enerji sönümlenir. Pasif TMD'ler yapının genelde birinci mod hareketini azaltacak şekilde ayarlanırlar. Diğer modları da kontrol edebilmek aktif TMD' ler ile mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, ayarlı kütle sönümleyicisinin 3 katlı bir yapı modelinde farklı katlar da yerleştirilmesi durumunda kat deplasmanları ve nihai ivmeleri incelenmiştir. TMD'nin optimum parametreleri için literatürde verilen denklemler kullanılmıştır (Connor 2003).



Şekil 1. TMD ve elemanları

2. OPTİMUM TMD PARAMETRELERİ

TMD'lerin tasarımında ilk olarak, TMD kütlesi belirlenerek 1.moda ait modal kütle oranı değeri,

$$\mu = \frac{m_d}{M_1} \tag{1}$$

olarak hesaplanır. Sonra $0.03 < \mu < 0.40$ arasında, yapının sönüm oranı ise $0 < \xi < 0.15$ arasında olmak koşulu ile optimum parametreler aşağıdaki formülasyonlar yardımı ile hesaplanır (Conner 2003).

$$f_{opt} = \frac{\omega_d}{\omega} \tag{2}$$

$$\omega_{dopt} = \frac{\omega}{\sqrt{1+\mu}} \tag{3}$$

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-0.5\mu}}{(1+\mu)} \tag{4}$$

$$\omega_{dopt} = f_{opt}\omega \tag{5}$$

$$k_{dopt} = [\omega_{dopt}]^2 m_d = \mu k f_{opt}^{\ 2} \tag{6}$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{\mu(3-\sqrt{0.5\mu}}{8(1+\mu)(1-0.5\mu)}} \tag{7}$$

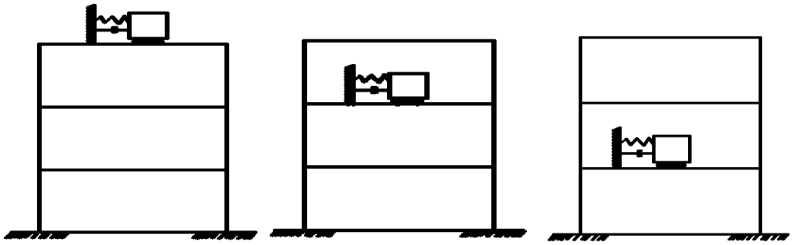
$$c_{dopt} = 2\xi_{dopt}\omega_d m_d = \mu f_{opt}[2\xi_{dopt}\omega m] \tag{8}$$

Burada, m ana kütleyi, m_d TMD'nin kütlesini, Ω dış etkinin frekansını, ω ana kütlenin doğal frekansını, ξ ana kütlenin sönüm oranını, μ TMD kütlesinin ana kütleye oranını (kütle oranı), $k_{d\,opt}$ TMD'nin ana kütleye bağlandığı yay sabitinin optimum değerini, $\xi_{d\,opt}$ TMD'nin sönüm oranının optimum değerini, ω_{dopt} TMD' nin sönüm içeren ana sistem için optimum doğal frekansını, c_{dopt}, TMD'nin ana kütleye bağlandığı sönümleyicinin optimum değerini gösterir.

3. SAYISAL UYGULAMA

Şekil 2' de 3 katlı bir yapı modeli üzerinde, TMD'nin 3., 2. ve 1. kata yerleştirilmiş durumu görülmektedir. Tablo 1'de TMD tasarımı için kullanılan parametreler verilmiştir. Bulunan optimum TMD, yapının 3. katına, 2. katına ve 1. katına, ayrı ayrı % 3 kütle oranı dikkate alınarak yerleştirilmiştir. Yapının birinci modu dikkate alınmıştır. El Centro depremi ve yapının birinci mod frekansına eşit frekansa sahip 0.2m genlikte sinüzoidal harmonik bir yük uygulanarak TMD'nin yapı davranışını nasıl etkilediği incelenmiştir. Zaman tanım alanında hesaplar yapılmış ve yapının zamana bağlı deplasman ve nihai ivme davranışları incelenmiştir. Burada her bir

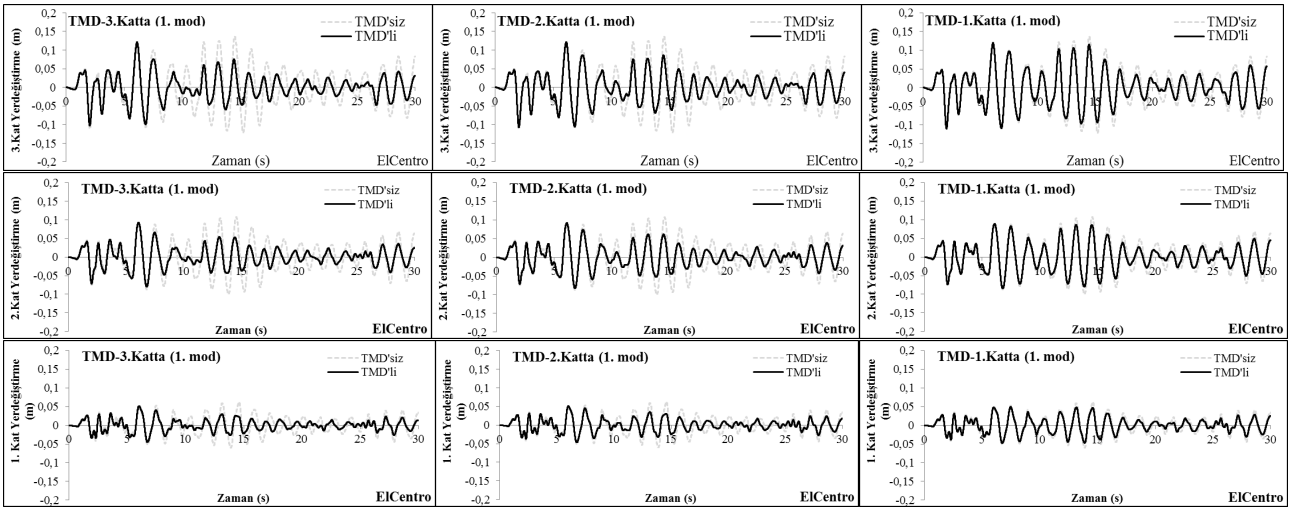
katın kütlesi m=10 kg, kat rijitliği k=1000 N/m, yapı modelinin sönüm oranı ξ=0.02, TMD kütlesi m_d =0,9 kg olarak belirlenmiştir. Yapı modelinin 1. mod, 2. mod ve 3. mod için doğal frekansları sırasıyla ω_1=4.45 (rad/s), ω_2= 12.47 (rad/s), ω_3=18.01 (rad/s) olarak hesaplanmıştır. Tablo 1'deki "Mok1" ifadesi 1. moda göre modal kütle anlamına gelmektedir. Zaman tanım alanında hesaplar yapılarak üç farklı TMD yerleşimi ve TMD'nin olmadığı davranışlar incelenmiştir. X kat deplasmanlarını, A ise nihai kat ivmelerini göstermektedir. İndisleri ise katları ifade etmektedir. TMD'siz ifadesi ise yapının TMD eklenmemiş yalın durumunu göstermektedir.



Şekil 2. 3 katlı yapı modelinde TMD'nin 3., 2. ve 1. kata yerleştirilmiş durumu

Tablo 1. 1.mod için TMD'nin tasarımından elde edilen parametrelerin değerleri

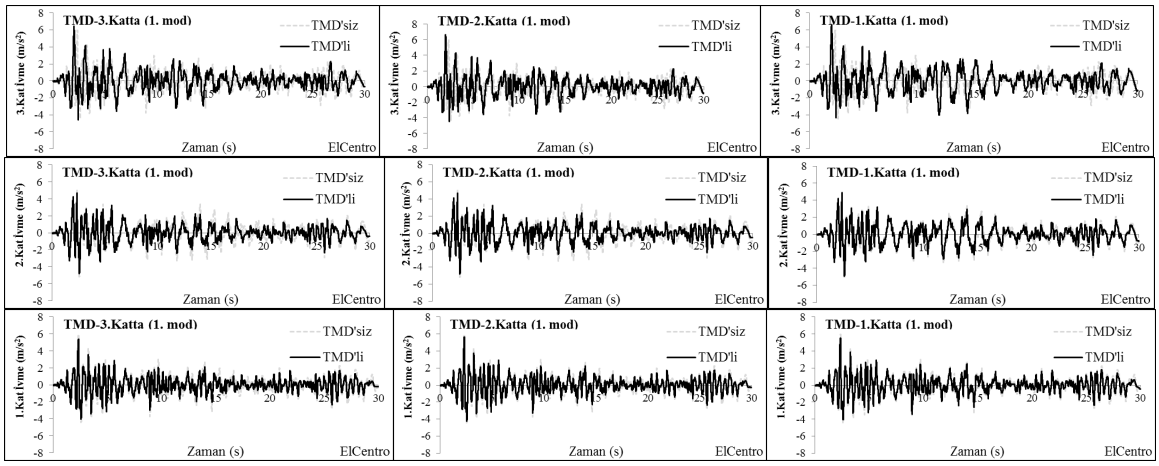
Mok1(kg)	μ_1	$\tilde{f}_{opt}$	$\tilde{\xi}_{dopt}$	$\tilde{k}_{dopt}$ (N/m)	$\tilde{c}_{dopt}$ (N.s/m)
18.41	0.049	0.94	0.13	15.97	1.02



Şekil 3. El Centro depremi etkisinde TMD 3., 2. ve 1. katta iken, katlardaki deplasman değişimi

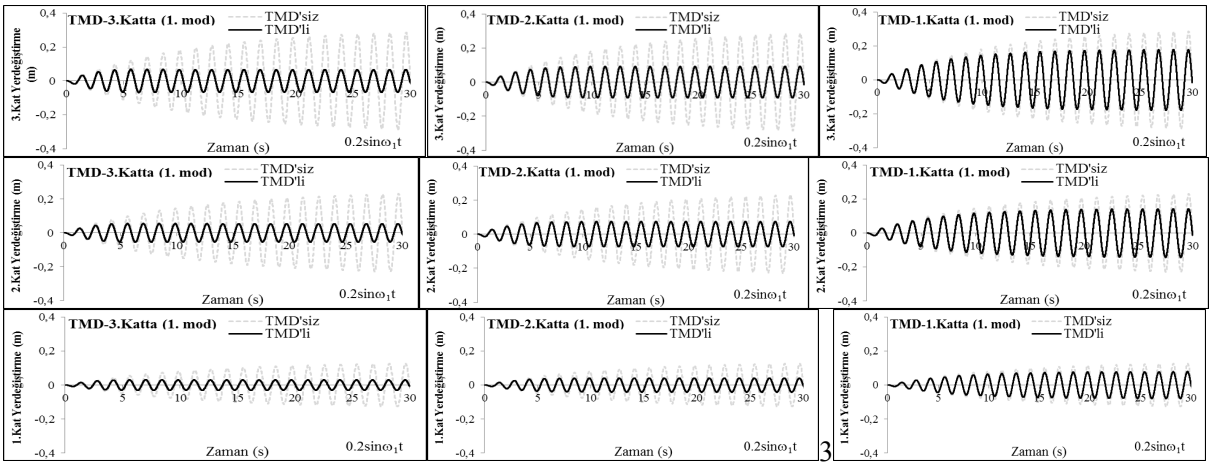
El Centro depremi KG ivme kaydı kullanılarak yapılan analizler sonucu bulunan kat deplasmanları, TMD'nin farklı yerleşimleri için Şekil 3'de gösterilmiştir. El Centro depremi etkisi altında, yapının 1. mod frekansına ayarlanan sistemde, TMD en üst kata yerleştirildiğinde, 10. saniyeden sonra, özellikle de 10-20 saniye arasında sisteme dikkate değer biçimde olumlu bir katkısı söz konusudur. TMD'nin 2. kata yerleştirilmesi 2. katın deplasmanını olumlu etkilemiş, 1. kata yerleştirilmesi ise sisteme genel anlamda katkı sağlamadığı gibi 20-30 saniye arasındaki deplasmanları olumsuz yönde etkilemiştir.

Şekil 4' e göre bakılacak olursa, TMD'nin en üst kata yerleştirilmesi, nihai ivmeler açısından sisteme 0-10 saniye arasında pek etkili olmayıp en büyük etkisini 10-20 saniye arasında göstermiştir. TMD'nin 2. ve 1. kata yerleştirilmesi ise sisteme önemli katkı sağlamamıştır.



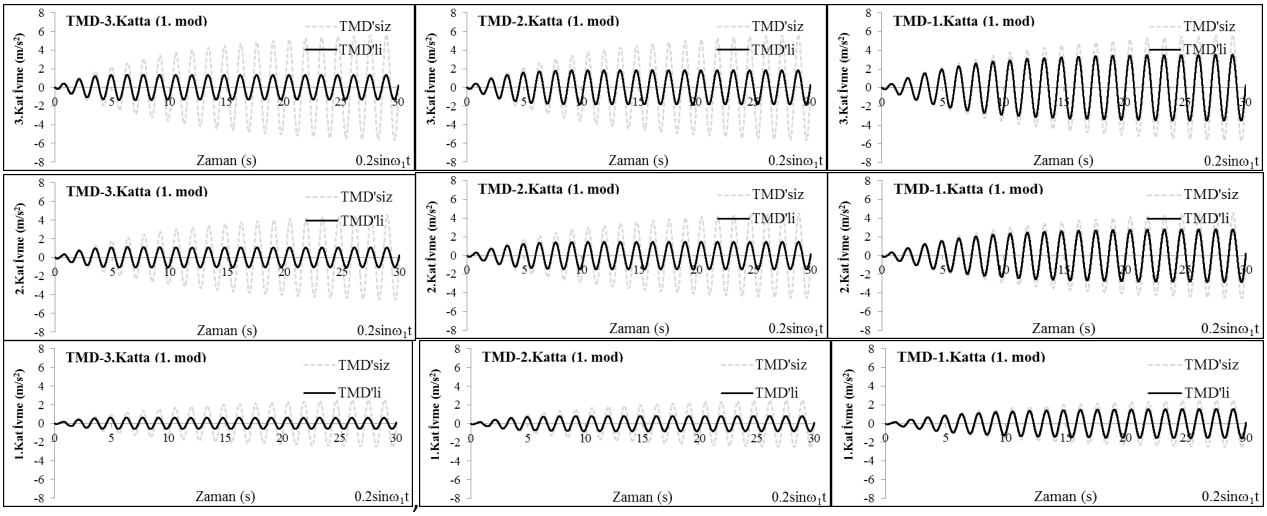
Şekil 4. El Centro depremi etkisinde TMD 3., 2. ve 1. katta iken,
katlardaki nihai ivmelerin değişimi

Şekil 5 incelenecek olursa, 0.2 genlikli harmonik bir yük altında, TMD'nin en üst kata yerleştirilmesi bütün katların deplasmanı açısından çok iyi sonuçlar vermiştir. En az etkisini 1. kata yerleştirince göstermiştir. TMD'nin 2. kata yerleştirilmesi durumundaki katkısı azımsanmayacak derecede olumludur.



Şekil 5. 1.mod frekansında ve 0.2 genlikteki harmonik yük etkisinde, TMD 3., 2. ve 1. katta iken, katlardaki deplasmanın değişimi

Şekil 6'dan görüleceği gibi, harmonik yük altındaki davranış ivmeler açından incelendiğinde, TMD'nin en üst kata yerleştirilmesi bütün katların ivmelerini ciddi derecede azaltmıştır. TMD'nin 1. kata yerleştirilmesinin katkısı diğer katlara yerleştirilmesi ile kıyaslandığında ivmelerin azalımı açısından en az katkıyı sağlamıştır.



Şekil 6. 1.mod frekansında ve 0.2 genlikteki harmonik yük etkisinde, TMD 3., 2. ve 1. katta iken, katlardaki nihai ivme değişimi

4. SONUÇLAR

TMD'ler ister harmonik yük, isterse El Centro deprem yükü olsun, yapı modelinin en üst katına yerleştirilip yapı modelinin 1.mod doğal frekansına ayarlanırsa, bütün katların deplasman ve ivmelerinin azaltılmasında iyi performans sergilerler. Üç katlı yapı modelinde, TMD'lerin gerek harmonik yükler altında ve gerekse El Centro depremi altında gösterdiği performanslar kıyaslandığında, harmonik yükler altındaki deplasman ve ivme azaltımı konusunda çok daha iyi performans sergiledikleri söylenebilir. Ayrıca TMD uygulandığında, El Centro depreminin etkisindeki 3 katlı yapı modelindeki deplasman azaltımı konusundaki performansı, ivme azaltımına göre çok daha iyi olmuştur.

KAYNAKLAR

Bishop., R.E.D.and Welbourn, D.B. (1952). The problem of the dynamic vibration absorber, Engineering, London, 174-769.

Connor,J.J.(2003). Introduction To Structural Motion Control, Prentice Hall Pearson Education.,inc.,New york.

Den Hartog, J.P. (1956) . Mechanical Vibrations, 4th ed. McGraw-Hill, New York.

Falcon, K.C., Stone, B J., Simcock, W.D. and 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. and lkeda, K.(1978). On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system, *Bull. Jpnese Soc. Mech. Engng* **21 : 151 ,** 64-71

Ormondroyd, J.and Den Hartog, J.P.(1928). The theory of dynamic vibration absorber, *Trans. ASME*, APM-50-7, 9-22.

Rana, R. and Soong T.T.(1997). Parametric study and simplified design of tuned mass dampers, *Engineering Structures*, **20:3,** 193-204.

Soto-Birito R and Ruiz S.E.(1999). Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic* **28,** 1255-71.

Thompson, A.G. (1981). Optimum damping and tuning of a dynamic vibration absorber applied to a force excited and damped primary system, *J. Sound Vib*. **77,** 403-415.

Tsai, H. C. and Lin, G. C.(1993). Optimum tuned mass dampers for minimizing steady-state response of support excited and damped systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic* **22,** 957-973.

Warburton, G.B. and Ayorinde, E.O.(1980). Optimum absorber parameters for simple systems , *Earthquake Engineering and Structural Dynamic* **8,** 197-217.

Warburton, G B.(1982). Optimal absorber parameters for various combinations of response andexcitation parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic* **10,** 381-401.

Vickery, B J., lsyumov, N. and Davenport. A.G.(1983). The role of damping, mass and acceleration, *.1. Wind Engng lnd. Aerodynam., II*, 285- 294.

Villaverde R, Koyoama L.A, .(1993). Damped resonant appendages to increase inherent damping in buildings , *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **22,** 491-507.