YÜZME HAVUZUNUN AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİ OLARAK PERFORMANSI

A. Bozer

Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Kayseri
Email: abozer@nny.edu.tr.

ÖZET:

Bu çalışmada ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) olarak çatı katına yerleştirilecek yüzme havuzu kullanılması düşünülmüştür. Bu sistemde su havuzunun yanal hareketine bağlı olarak suyun çalkalanmasıyla su yüzeyinde bir dalga hareketi oluşmaktadır. Bu dalga havuzun hareketine ters yönde etki ederek bağlı olduğu yapıda ayarlı kütle sönümleyici (TMD)'ye benzer şekilde sönüm yaratmaktadır. Suyun çalkalanması probleminin çözümü için Housner'in önerdiği eşdeğer mekanik model kullanılmış böylece TLD'ler için optimal çözüm yöntemleri TMD'ler için kullanılan optimal çözüm yöntemlerine indirgenebilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Ayarlı Sıvı Sönümleyici (TLD), Ayarlı Kütle Sönümleyici (TMD), Optimal Çözüm

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımında yük taşıyan elemanların yeterli dayanıma sahip olduğu ve deprem enerjisini plastik şekil değiştirmeler ile yutup sönümlendirdiği kuvvet-bazlı geleneksel yaklaşımın yerine harici sönümlendirme sistemleri gibi yenilikçi yaklaşımlar giderek daha çok uygulama alanı bulmaktadır. Harici sönümleyici sistemlerin bir örneği olarak Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD) yapıdaki enerji akışını ikincil bir sistemin titreşimi ile engeller. Özünde, ayarlı kütle sönümleyiciler veya titreşim soğurucular kütle-yay-amortisör sistemleridir ve monte edildikleri yapının belirli bir titreşim moduna ayarlanırlar. Dinamik etkiler altında TMD ana yapı ile aynı titreşim frekansında fakat farklı fazda hareket ederek girdi enerjisini ana yapıdan kendi üzerine yönlendirir.

Modern Ayarlı Kütle Sönümleyici kavramı ilk olarak Den Hatog'un (1956) sönümleyici parametrelerinin ideal seçimi için geliştirmiş olduğu temel prensipler ile ortaya çıkmış fakat kendisi bu çalışmalarda ana yapıdaki sönüm etkilerini göz önüne almamıştır. Bunun üzerine McNamara(1977) ana yapıdaki sönüm etkilerini de göz önüne alan çalışmalar yapmış ve bunu takiben Warburton (1982) oldukça geniş çalışmasında tek serbest dereceli yapıların hem kuvvet hem de ivme etkisi olarak harmonik ve rastgele yükler altında sönüm parametrelerini elde etmiştir. Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin optimum parametrelerini elde etmek için çalışmalar yapan çok sayıda araştırmacının içinden başlıcaları olarak Tsai ve Lin (1994), Abe ve Igusa (1995), Sadek vd. (1997), Hoang vd. (2008) sıralanabilir. Bütün bu araştırmacılar, eğer düzgün bir şekilde ayarlanırsa TMD'nin yapının hakim titreşimini azaltma yönünde çok etkili olduğu hususunda hemfikirdir, öte yandan yapının hakim periyodundaki hesaplama hataları veya TMD'nin üretim hatalarına bağlı olabilecek sebeplerden dolayı yanlış ayar yapılmışsa TMD'nin etkinliği oldukça azalmaktadır. Bu sebeple Xu ve Igusa (1992) tarafından dağılımlı titreşim frekansına sahip Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (MTMD) önerilmiştir. Bu sistemde ana yapıya n adet TMD ünitesi monte edilmekte ve TMD ünitelerinin doğal titreşim frekansları belirli bir frekans aralığında eşit dağılacak şekilde ayarlanmaktadır. Yazarlar bu çalışmalarında eşdeğer kütleli Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin tek bir Ayarlı Kütle Sönümleyiciden daha iyi performansa sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmadaki en çarpıcı

sonuçlardan biride MTMD sisteminde ki TMD ünitelerinin düşük sönüm seviyelerinde daha etkin çalışması olmaktadır, böylece ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) sistemlerinde suyun çalkalanması sonucu oluşan düşük sönüme bağlı olarak TLD sistemlerinin çoklu olarak kullanılması daha uygun olmaktadır. Daha sonra frekans aralığı, sönüm oranı ve toplam TMD sayısı gibi faktörlerin MTMD üzerindeki etkileri Yamaguchi ve Harnpornchai (1993) tarafından araştırılmıştır. Park ve Reed (2001) kütlenin ve frekansın düzgün dağılımı yerine değişken dağılımının etkilerini incelemiş. MTMD sisteminin optimum parametrelerinin hesabı taban kuvvetleri altında Joshi ve Jangid (1997) tarafından ve zemin ivmesi altında Li (2000) tarafından araştırılmıştır.

TMD her ne kadar yapıların deprem cevabını kontrol etmekte etkili olsa da yapıya büyük bir kütlenin yerleştirilmesine ihtiyaç duyar. Örneğin John Hancock Binası'na (Boston,USA) 2x300 tonluk kütle ve Citycorp Binası'na (Newyork,USA) 373 tonluk kütle TMD olarak monte edilmiştir. Öte yandan Hankyu Chayamachi Binası'nda (Osaka, Japonya) olduğu gibi bu kütlenin daha akıllıca kullanımı mümkündür. Bu örnekte hareketli kütle olarak helikopter pisti kullanılmıştır.

Bu çalışmada ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) olarak çatı katına yerleştirilecek yüzme havuzu kullanılması düşünülmüştür. Bu sistemde su havuzunun yanal hareketine bağlı olarak suyun çalkalanmasıyla su yüzeyinde bir dalga hareketi oluşmaktadır. Bu dalga havuzun hareketine ters yönde etki ederek bağlı olduğu yapıda TMD' ye benzer şekilde sönüm yaratmaktadır. Suyun çalkalanması probleminin çözümü sınır şartlarını sağlayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünü gerektirmektedir yalnız Housner (1954) yaklaşık bir eşdeğer mekanik model önerisinde bulunmuştur. Bu yöntemde bir tankın içindeki su kütlesinin salınım yapan kısmı kütle-yay modeli olarak temsil edilmiş, durağan kısmı ise tanka rijit bağlı bir kütle olarak temsil edilmiştir. Böylece TLD'ler için optimal çözüm yöntemleri TMD'ler için kullanılan optimal çözüm yöntemlerine indirgenebilmektedir. Dalga hareketinin doğal frekansı içinde bulunduğu havuzun geometrisi, boyutları ve sıvı derinliğine bağlı olduğundan TLD'yi monte edildiği yapının titreşim frekansına ayarlamak mümkün olmaktadır.

2. ÇOKLU AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ (MTMD)

MTMD-Yapı sisteminin hareket denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$m_s\ddot{x}_s + \left[(c_s + \sum_{n=1}^{N} c_n)\dot{x}_s - c_n\dot{x}_n)\right] + \left[(k_s + \sum_{n=1}^{N} k_n)x_s - k_n x_n\right] = F(t) \qquad (1)$$

$$m_n\ddot{x}_n + \left[k_n(x_n - x_s)\right] + \left[c_n(x_n - x_s)\right] = 0 \qquad \text{n=1,2…N} \qquad (2)$$

Burada, altsimge s ana yapıyı, altsimge n MTMD sistemindeki n'inci TMD ünitesini temsil etmektedir. Yapıya etkiyen yük F(t) ile; kütle,rijitlik ve sönüm katsayıları sırasıyla m,k,c ile; ana yapının zemine göre göreli deplasmanı x_s ile, n'inci TMD'nin zemine göre göreli deplasmanı x_n ile gösterilmiştir. Aşağıdaki tanımlamalar yapıldığında:

$$\mu_n = \frac{m_n}{m_s};\ \lambda_n = \frac{\omega_n}{\omega_0};\ \zeta_s = \frac{c_s}{2m_s\omega_0};\ \zeta_n = \frac{c_n}{2m_n\omega_n};\ \omega_0 = \sqrt{k_s/m_s};\ \omega_n = \sqrt{k_n/m_n} \qquad \text{n=1, 2… N}$$

Denklem (1) ve (2) Z(s) = L[z(t)] şeklinde tanımlanan Laplace Dönüşümü sayesinde frekans alanında aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$X_s s^2 + \left[(2\omega_0\zeta_s + \sum_{n=1}^{N} 2\lambda_n\omega_0\zeta_n\mu_n)X_s - (2\lambda_n\omega_0\zeta_n\mu_n)X_n \right] s$$
$$+ \left[(\omega_0^2 + \sum_{n=1}^{N} \mu_n\lambda_n^2\omega_0^2)X_s - (\mu_n\lambda_n^2\omega_0^2)X_n \right] = F/m_s \qquad \text{n=1,2…N} \qquad (3)$$

$$(\mu_n X_n)s^2 + \left[2\lambda_n\omega_0\zeta_n\mu_n(X_n - X_s)\right]s + \left[\mu_n\lambda_n^2\omega_0^2(X_n - X_s)\right] = 0 \qquad \text{n=1,2…N} \qquad (4)$$

Denklem (3) ve (4)'ün matris formda ifadesi aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{bmatrix} A(s) & [B(s)]_{1xN} \\ [B(s)]_{Nx1} & diag[G(s)]_{NxN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ [X_n]_{Nx1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ [0]_{Nx1} \end{bmatrix} F/m_s \qquad (5)$$

Burada:

$$A(s) = s^2 + (2\omega_0\zeta_s + \sum_{n=1}^{N} 2\lambda_n\omega_0\zeta_n\mu_n)s + \omega_0^2 + \sum_{n=1}^{N} \mu_n\lambda_n^2\omega_0^2$$

$$B_n(s) = -(2\lambda_n\omega_0\zeta_n\mu_n)s - \mu_n\lambda_n^2\omega_0^2 \qquad \text{n=1, 2… N}$$

$$G_n(s) = \mu_n s^2 + (2\lambda_n\omega_0\zeta_n\mu_n)s + \mu_n\lambda_n^2\omega_0^2 \qquad \text{n=1, 2… N}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Denklem (5) çözülerek ana yapının Transfer Fonksiyonu

$$TF_s(s) = \frac{1}{m_s} \frac{G_1(s)G_2(s).....G_N(s)}{A(s)G_1(s)G_2(s).....G_N(s) - \sum_{j=1}^{N} B_j^2(s)G_1(s)..G_{j-1}(s)G_{j+1}(s)....G_N(s)} \qquad (6)$$

denklemi ile elde edilir. Transfer Fonksiyonu'nda s=iω dönüşümü yapılarak ve $\omega_0^2\left[TF_s(i\omega)\right]$ ifadesi hesaplanarak Dinamik Büyütme Faktör'ü (DBF) bulunabilir. j'inci TMD ünitesinin doğal titreşim frekansını

$$\omega_j = \omega_C\left[1 + (j - \frac{N+1}{2})\frac{\Delta\omega}{N-1}\right] \qquad (7)$$

denklemiyle hesaplamak mümkündür. Burada, ω_C MTMD sistemindeki her TMD ünitesinin doğal frekanslarının ortalaması olan merkezi frekans, $\Delta\omega$ ise frekans aralığıdır ve $(\omega_N - \omega_1)/\omega_C$ ifadesiyle hesaplanmaktadır. TMD ünitelerinin değişken frekansları, rijitliği ve sönüm katsayısını sabit tutup kütleyi değişken kılarak sağlanmaktadır. Bu durumda sistemin toplam kütle oranını μ kabul edersek sırasıyla TMD ünitelerinin rijitliği, her bir TMD ünitesine ait kütle ve sönüm oranı aşağıdaki gibi bulunabilir. Joshi ve Jangid (1997)

$$k_{TMD} = \frac{\mu m_s}{\sum_{i=1}^{N} 1/\omega_i^2},\ m_j = \frac{k_{TMD}}{\omega_j^2},\ \zeta_j = c_{TMD}/2m_j\omega_j = (c_{TMD}/2k_{TMD})\omega_j \quad (8)$$

MTMD sistemi için ortalama sönüm oranı

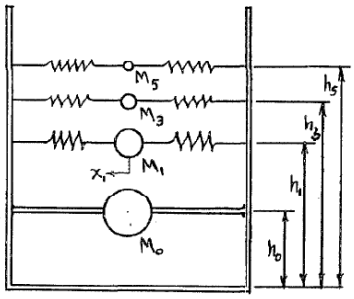
$$\zeta_T = \sum_{j=1}^{N} \frac{\zeta_j}{N} = \frac{\omega_C c_{TMD}}{2k_{TMD}} \quad (9)$$

ifadesi ile verilmektedir. MTMD sisteminde frekans aralığı, Δω, ve ortalama sönüm oranı, ζ_T , için optimum parametreler maksimum genliklerin minimumu (minimum-maximum amplitude procedure) adlı bir nümerik arama yöntemi ile bulunmaktadır. Bu yöntemde 0< Δω <0.30 ve 0< ζ_T <0.15 aralığında her bir Δω, ζ_T çiftine karşılık gelen Dinamik Büyütme Faktör'ünün maksimum genliği hesaplanır ve kayıt edilir. Hesaplanan bu maksimum değerler kümesi içindeki en küçük değere karşılık gelen Δω, ζ_T çifti aranılan optimum değeri vermektedir.

2. AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİ (TLD)

Yanal çalkalanma kısmi dolu bir su tankının maruz kaldığı salınıma bağlı olarak su yüzeyinde oluşan dalga hareketidir. Su tankı yanal ivmelere maruz kaldığında su yüzeyi tankın bir tarafında yükselirken diğer tarafında alçalarak dalga hareketi oluşturur, daha sonra yüksek kısım alçalarak ve alçak kısımda yükselerek bu hareketliliği sürdürür. Oluşan dalga hareketinin tank geometrisi ve boyutları, su derinliğine ve yerçekimi ivmesine bağlı olarak doğal titreşim periyodu vardır. Tankın bu ileri geri hareketi sırasında sıvıya ait dinamik model salınım yapan kısmın kütle yay modeli ile temsil edildiği, durağan kısmın ise tanka rijit bağlı kütle ile temsil edildiği eşdeğer bir mekanik model ile ifade edilebilir. Bu mekanik modelin grafiksel temsili Şekil 1'de gösterilmiştir.

Suyun çalkalanması probleminin çözümü sınır şartlarını sağlayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünü gerektirmektedir yalnız Housner (1954)'in önerdiği eşdeğer mekanik model, kısmı diferansiyel denklemlerin çözümünden kaçınarak problemi basit kapalı form çözümlere indirgemeyi mümkün kılmaktadır. Önerilen metot elastisitedeki Rayleigh-Ritz metoduyla benzeşmektedir ve hesaplanan su kuvvetleri her zaman güvenli tarafta kalmaktadır.



Şekil 1. Çalkalanma Problemi için Mekanik Model (Housner – 1954)

R yarıçaplı dairesel bir sıvı tankı, h derinliğinde sıvı ve yerçekimi ivmesi g için durağan sıvı kütlesi M_0, salınım yapan sıvı kütlesi M_1 ve doğal çalkalanma frekansı ω Housner (1954) tarafından verilmiş aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir:

$$M_0 = M\frac{\tanh\left(\sqrt{3}R/h\right)}{\sqrt{3}R/h}, M_1 = M\frac{1}{4}\sqrt{\frac{27}{8}}\frac{R}{h}\tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}}\frac{h}{R}\right),\ \omega^2 = \frac{g}{R}\sqrt{\frac{27}{8}}\tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}}\frac{h}{R}\right) \quad (10)$$

Yukarıdaki denklemler hesaplandıktan sonra eşdeğer yay rijitliği K kolayca hesaplanabilir:

$$K = \omega^2 M_1 \quad (11)$$

Denklem (10) sadece h ≤ 1.6 R için geçerlidir. Sıvı tankı uzadıkça ve daraldıkça h=1.6R seviyesinin altında kalan sıvının tank ile birlikte rijit hareket ettiği kabul edilmelidir.

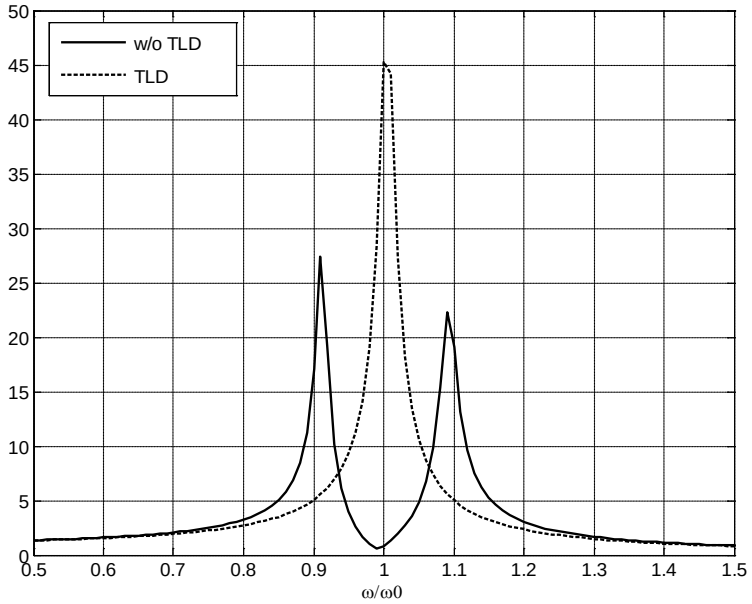
3. NÜMERİK SİMÜLASYON

Ayarlı Kütle Sönümleyiciler çalışma prensibi dolayısıyla binaların çatı katına büyük kütlelerin yerleştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu türden atıl bir kütlenin Hankyu Chayamachi Binası'nda (Osaka, Japonya) kullanılan helikopter pisti gibi yapının mimari bir parçası olarak değerlendirilmesi şüphesiz fonksiyonellik açısından büyük avantajdır. Bu çalışmada da benzer şekilde ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) sisteminin binanın çatı katına yerleştirilecek yüzme havuzu şeklinde kullanılıp kullanılamayacağının değerlendirilmesi yapılmıştır. Nümerik simülasyonlar için Citicorp Center (New York,USA) binası örnek seçilmiş ve bu binaya ait yapısal parametreler aşağıda verilmiştir. Soong ve Dargush (1997)

Kat Ölçüleri	(m)	49x49
Kat Alanı	(m^2)	2400
Bina Yüksekliği	(m)	280
Bina Modal Kütlesi	(ton)	20000
1inci mod periyodu	(sn)	6.25
Yapısal sönüm oranı		1%

Ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) sistemi için düşünülen havuz ölçüleri üzerine monte edileceği binanın doğal titreşim frekansıyla çakışacak şekilde seçilmiştir. Buna göre Denklem (10) ve (11) çözüldüğünde 1.65m'lik su derinliği için havuz yarıçapı R 7.15m, durağan sıvı kütlesi M_0 35,3 ton, salınım yapan sıvı kütlesi M_1 211,0 ton ve eşdeğer yay rijitliği K 213 kN/m olarak hesaplanır. Bu durumda toplam TLD kütlesinin ana yapının kütlesine oranı μ küçük olacağından yeterli kütleyi sağlamak için yan yana üç havuz konulması planlanmıştır. Bu havuzların toplam kütlesi tek bir kütle olarak düşünülürse Denklem (6) da verilen transfer fonksiyonu N=1 için çözüldüğünde maksimum genliklerin minimumu yöntemi (minimum-maximum amplitude procedure) kullanılarak frekans oranı, λ, 0,973 olarak hesaplanır. Bu frekans oranına göre her havuzun yeniden hesaplanan parametreleri havuz yarıçapı R 7,25m, durağan sıvı kütlesi M_0 35,8 ton, salınım yapan sıvı kütlesi M_1 217,3 ton ve eşdeğer yay rijitliği K 213,5 kN/m olarak bulunur.

Şekil 2.de ana yapının Dinamik Büyütme Faktörü (DBF) gösterilmiştir. Gözlemlenebileceği gibi yapı cevabında önemli oranda düşüş vardır. TLD olmayan çözümde maksimum DBF 45,3 iken TLD kullanılan çözümde maksimum DBF'nin 27,4 olduğu görülmektedir. Yine de bu optimal bir çözüm değildir çünkü suyun çalkalanmasına bağlı olarak kabul edilen TLD sönüm oranı %1 civarlarındadır halbuki optimum çözüm için gerekli olan sönüm oranı %10 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Ana Yapıya ait Dinamik Büyütme Faktörü (λ=0,973, μ=0,0326)

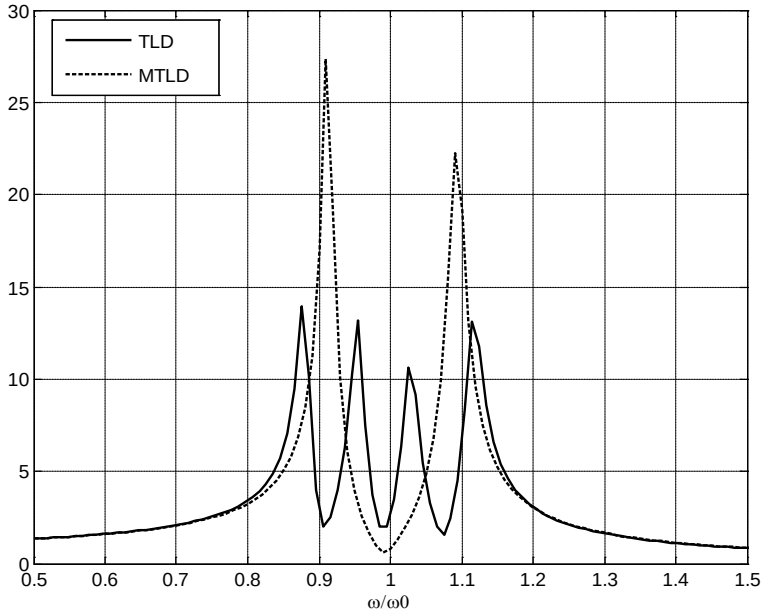
Daha iyi bir çözüm Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici (MTMD) çözümüyle elde edilebilir çünkü bu çözümde her bir Ayarlı Sıvı Sönümleyici (TLD) ünitesi için gerekli sönüm oranı suyun çalkalanmasıyla oluşan sönüm oranlarına daha yakın olacaktır. Her bir TLD ünitesinin sönümünü %1 kabul ederek elde edilen optimal parametreler frekans oranı, ω_C / ω_s, için 0,99 ve frekans aralığı, $\Delta\omega$, için 0,17 olarak hesaplanmıştır. Denklem (7)'den, her bir havuza ait frekanslar ω1=0,910, ω2=0,995, ω3=1,079 şeklinde bulunur. Bu frekanslara göre her havuz için hesaplanan parametreler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. ω1=0,907, ω2=0,994, ω3=1,081 için havuz parametreleri

	Havuz #1	Havuz #2	Havuz #3
R (m)	7,23	7,23	7,23
h (m)	1,35	1,65	2,00
M_0 (tons)	29,2	35,7	43,2
M_1 (tons)	230,0	216,0	210,7
K (kN/m)	181,0	213,4	246,1

Şekil 3. incelendiğinde Ayarlı Sıvı Sönümleyici (TLD) için olan çözümde iki tepe noktası görülmektedir çünkü üç havuzda aynı dinamik parametrelere sahip olduğundan tek bir havuz gibi çalışmakta ve bu durumda maksimum DBF 27,4 olmaktadır. Öte yandan Çoklu Ayarlı Sıvı Sönümleyici (MTLD) için olan çözümde her

havuzun ayrı dinamik parametreleri olduğundan dört tepe noktası gözlemlenmektedir. Bu durumda DBF 13,9 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Ana Yapıya ait Dinamik Büyütme Faktörü (λ=0,99, μ=0,0326)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) olarak çatı katına yerleştirilecek yüzme havuzu kullanılması düşünülmüştür. Nümerik simülasyonlar için Citicorp Center (New York, USA) binası örnek seçilmiş ve hesaplanan optimum frekans oranına bağlı olarak havuz ebatları bulunmuştur. Tek bir havuz için salınım yapan sıvı kütlesinin binanın modal kütlesine oranı küçük olduğundan yan yana üç havuz kullanılması düşünülmüş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Üç havuzun ebatları ve su derinliği aynı seçilirse, her bir havuz için salınım yapan sıvı kütlesi ve doğal titreşim frekansı aynı olmakta dolayısıyla üç havuz tek bir ayarlı sıvı sönümleyici gibi davranmaktadır. Bu tür bir çözüm için gerekli olan sönüm oranı suyun varsayılan sönüm oranından çok daha yüksek olduğundan çözüm optimal değildir. Yine de nümerik simülasyonlar sonucu ayarlı sıvı sönümleyici kullanıldığında Ana Yapıya ait Dinamik Büyütme Faktörü'nde %40 düşüş gözlemlenmiştir.

2. Daha iyi bir çözüm Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici (MTMD) çözümüyle elde edilmiştir çünkü bu çözümde her bir Ayarlı Sıvı Sönümleyici (TLD) ünitesi için gerekli sönüm oranı suyun çalkalanmasıyla oluşan sönüm oranlarına daha yakın olacaktır. Bu çözümde Ana Yapıya ait Dinamik Büyütme Faktörü'nde %69 düşüş gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

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

McNamara, R. J. (1977). Tuned Mass Damper for Buildings. *Journal of the Structural Division, ASCE* **103(9)** ,1785-1797.

Warburton, G. B. (1982). Optimum absorber parameters for various combination of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **10**, 381-401.

Tsai, H.C. ve Lin, G. C. (1994). Explicit formulae for optimum absorber parameters for force excited and viscously damped systems. *Journal of Sound and Vibration* **176(5)**, 585-596.

Abe, M. ve Igusa, T. (1995). Tuned mass dampers for structures with closely spaced natural frequencies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **24**, 247-261.

Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. ve 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.

Hoang, N., Fujino, Y. ve Warnitchai, P. (2008). Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas. *Engineering Structures* **30**, 707-715.

Xu, K. ve Igusa, T. (1992). Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **21**, 1059-1070.

Yamaguchi, H. ve Harnpornchai, N. (1993). Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **22**, 51-62.

Park, J. ve Reed, D. (2001). Analysis of uniformly and linearly distributed mass dampers under harmonic and earthquake excitation. *Engineering Structures* **23**, 802-814.

Joshi, A.S. ve Jangid, R.S. (1997). Optimum Parameters of Multiple Tuned Mass Dampers for Base-Excited Damped Systems. Journal of Sound and Vibration 202(5), 657-667.

Li, C. (2000). Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **29**, 1405-1421.

Housner, G. W. (1954). Earthquake pressures on fluid containers. EightTechnical Report under Office of Naval Research, CALTECH, Pasadena, California, U.S.A.

Soong, T. T. ve Dargush, G. F. (1997) Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley&Sons, West Sussex, İngiltere.