OPTİMUM PASİF KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİNİN BELİRSİZ ÖZELLİKLİ YAPILARDAKİ ETKİLERİ

S.M. Nigdeli [1] ve G. Bekdaş [2]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, Avcılar/İstanbul*
[2] *Araştırma Görevlisi Dr., İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, Avcılar/İstanbul*
Email: melihnig@istanbul.edu.tr

ÖZET:

Yapılarda, deprem ve rüzgâr gibi büyük titreşimlere neden olan etkilerden korunmak amacıyla kütle sönümleyicileri kullanılmaktadır. Mekanik elemanlardan oluşan bu cihazın, kütlesi, rijitliği ve sönümü optimum olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu ayarlama yapılırken yapının özellikleri önemli rol oynamaktadır. Fakat yapı imalatı sırasında oluşabilecek hatalar, malzeme özelliklerindeki belirsizlikler ve analizlerde yapılan kabuller gibi etkenlerden dolayı yapının özelliklerinde bir miktar değişiklikler olabilmektedir. Bu çalışmada yapının üstüne yerleştirilmiş olan pasif kütle sönümleyicisinin optimum özelliklerinin bulunmasında bir meta-sezgisel optimizasyon metodu olan armoni araştırması (Harmony Search) yöntemi kullanılmıştır. Nümerik optimizasyon prosesinde dış etki olarak sinüs yüklemeleri kullanılmakta ve yapının yer değiştirmesi ile transfer fonksiyonu değerlerine göre kütle sönümleyici için optimum parametreler elde edilmektedir. Teorik olarak elde edilmiş olan yapı parametreleri için bulunan kütle sönümleyicisi özellikleri aynı kalmak şartıyla, teorik değerlerden bir miktar sapma yapmış yapı parametreleri için analizler yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Pasif kütle sönümleyicileri, armoni araştırması yöntemi, optimizasyon, deprem

1. GİRİŞ

Mekanik sistemlerde oluşan istenmeyen titreşimler, pasif kütle sönümleyicileri ile kolaylıkla sönümlenmektedir. Yapılarda mekanik sistem sayıldığı için pasif kütle sönümleyicileri ile yapılarda rüzgâr ve deprem etkisinde oluşan titreşimlerin seviyesi düşürülebilir. Genel olarak yüksek kule tipi yapılar olmak üzere, pasif kütle sönümleyicileri birçok rüzgâr etkisindeki yapıya eklenmiştir. Bu yapılara örnek olarak Citigroup Center, Yokohama Landmark Tower, Berlin televizyon kulesi ve Taipei 101 binası gösterilebilir.
Yapıların aktif kontrolü deprem etkileri altında pasif kontrol sistemlerine göre daha etkili olmasına rağmen ekonomik ve uygulama koşullarından dolayı pasif kontrol sistemleri üzerinde yoğun bir biçimde çalışmaya devam edilmektedir.
Frahm (1909) tarafından geliştirilen ve pasif kütle sönümleyicilerinin temeli olan alette sadece yaya bağlı bir kütlenin bulunması değişken frekanslı dış etkiler tarafından oluşan titreşimlerin sönümlenmesi için uygun değildir. Ormondroyd ve Dan Hartog (1928), Frahm tarafından önerilen sisteme sönümleyiciler eklemiştir. Böylece bu form ile yapılarda türbülanslı rüzgâr ve deprem etkisinde oluşan titreşimlerin sönümlenmesi mümkün hale gelmiştir. Fakat en ekonomik biçimde en iyi faydayı elde etmek için kütle sönümleyicisinin mekanik elemanlarının özellikleri optimum olarak ayarlanmalıdır.
Kütle sönümleyicileri ile ilgili yapılmış bazı bilimsel araştırmalar bu bölümde verilmiştir. Dan Hartog (1947), kütle sömünleyicilerinin frekans ve sönüm oranlarının hesaplanması için denklemler elde etmiştir. Warburton ve Ayorinde (1980), yapının doğal frekansları düzgün bir şekilde ayrılması durumunda yapının eşdeğer tek serbestlik dereceli olarak düşünülebileceğini vurgulamışlardır. Thompson (1981), bir frekans yeri metodu kullanarak optimum kütle sönümleyicisi değerlerini bulmuştur. Warburton (1982), kütle sönümleyicilerinin optimum değerleri için pratik bağıntılar elde etmiştir. Rana ve Song(1998), yapının sadece tek modunu kontrol ederek ve bir nümerik optimizasyon kullanarak pasif ayarlı kütle sönümleyicilerini dizayn etmişlerdir. Ayrıca

birçok yapısal modu kontrol etmek için çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerini incelemişlerdir. Lee vd. (2006), optimum kütle sönümleyicisi değerlerini elde etmek için bir nümerik optimizasyon algoritmasından faydalanmışlardır. Bakre ve Jangid (2007), optimum kütle sönümleyicisi parametreleri için matematiksel ifadeler elde etmişlerdir. Marano vd. (2010), kütle oranı da dahil olmak üzere tüm özellikleri önceden seçilmemiş olduğu durumda kütle sönümleyicilerini optimum ayarlamışlardır. Ayrıca genetik algoritma (Hadi ve Arfiadi, 1998), parçacık sürü optimizasyonu (Leung ve Zhang, 2009) ve armoni araştırma metodu (Bekdaş ve Nigdeli, 2011) gibi meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak pasif kütle sönümleyicilerinin optmizasyonu yapılmıştır.
Yapılarda imalat sırasında oluşabilecek hatalar, malzeme özelliklerindeki belirsizlikler ve analizlerde yapılan kabuller gibi etkenlerden dolayı yapının özelliklerinde bir miktar değişiklikler olabilmektedir. Bu çalışmada, armoni araştırma metodu kullanılarak optimum değerleri bulunmuş örnek yapının özelliklerinin mevcut değerlerinden belirli oranlarda farklı olduğu durumlarda oluşan etkiler incelenmiştir. Yapının özellikleri belirli oranlarla değiştirilmiştir. Fakat kütle sönümleyicisi özellikleri, yapının özelliklerinin değişmemiş olduğu durum için elde edilmiş olup, tüm analizlerde aynı olarak kullanılmıştır.

2. HAREKET DENKLEMLERİ

Bu bölümde kütle sönümleyicili çok serbestlik dereceli lineer sistemlerin hareket denklemleri verilmiştir. Bu denklemler birçok yapı dinamiği kitabında bulunabilir (Clough ve Penzien, 1993, Hart ve Wong, 1999, Chopra,2001, Celep ve Kumbasar, 2001). Denklem (1)'de, P(t) dış kuvvet etkisi altındaki yapının hareket denklemi verilmiştir.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = P(t) \tag{1}$$

Denklemde M, C, K matrisleri sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ve x(t) vektörü ise yatay yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Bu vektör ve matrislerin içeriği Denklem (2-5)'te verilmiştir.

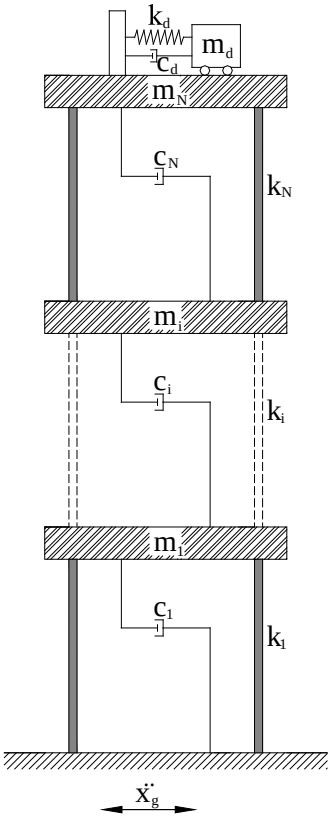
$$\begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_N & \\ & & & & m_d \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} (c_1+c_2) & -c_2 & & & & & \\ -c_2 & (c_2+c_3) & -c_3 & & & & \\ & \cdot & \cdot & & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & & & -c_N & (c_N+c_d) & -c_d \\ & & & & & -c_d & c_d \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} (k_1+k_2) & -k_2 & & & & & \\ -k_2 & (k_2+k_3) & -k_3 & & & & \\ & \cdot & \cdot & & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & & -k_N & (k_N+k_d) & -k_d & \\ & & & & -k_d & k_d \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1 \quad x_2 \ldots \quad x_N \quad x_d]^T \tag{5}$$

Denklemlerde, N ana yapının serbestlik derecesini ve m_d, c_d ve k_d terimleri ise sırasıyla kütle sönümleyisinin kütle, sönüm ve rijitlik terimlerine karşılık gelmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Kütle sönümleyicili çok serbestlik dereceli yapı

P(t) dış yüklemesi, harmonik yükleme için Denklem (6) ve deprem yükleri için Denklem (7)'de verilmiştir.

$$P(t) = p_0 \{1\} \sin \varpi t \tag{6}$$

$$P(t) = -M\{1\}\ddot{x}_g(t) \tag{7}$$

3. SAYISAL ÖRNEK

Bu çalışmada örnek olarak üst katına ayarlı kütle sönümleyicisi eklenmiş olan 10 katlı kesme binası incelenmiştir. Bu yapının tüm kat özellikleri aynıdır ve bir katının kütlesi, rijitlik katsayısı ve sönüm katsayısı sırasıyla 360t, 650 MN/m ve 6.2 MNs/m'dir (Singh vd.,1997).
Kütle sönümleyicisinin özellikleri ise, m_d=65 t, k_d=2570 kN/m ve c_d =115 kN s/m'dir. Bu değerler armoni araştırması yöntemi ile bulunmuştur. Optimizasyon sürecinde harmonik yükleme kullanılmış ve birinci katın yer değiştirmesinin düşürülmesi hedeflenmiştir (Bekdaş ve Nigdeli, 2011).
Geem vd. (2001) tarafından geliştirilmiş olan armoni araştırma yönteminin temeli bir müzisyenin daha iyi durumdaki bir armoniyi aradığı müzik performansına dayanmaktadır. Bu yöntemde öncelikle rastgele sayılar ile istenilen sayıda vektörler oluşturulmakta ve bu vektör ile analiz sonuçlarına ulaşılmaktadır. Sonraki aşamada yeni vektör oluşturularak, diğer vektörler ile istenilen kritere göre karşılaştırılmakta ve kritere göre istenmeyen en kötü vektör silinerek iterasyonlara devam edilmektedir. İterasyonlar belirlenmiş durdurma kriteri sağlanana kadar devam etmektedir.
Bu çalışmada, yapının tüm katlardaki rijitliğinin ±%25'e kadar değişebileceği kabul edilerek analizler yapılmıştır. Tablo 1'de yapının rijitlik değişimine göre periyotları verilmiştir. Periyodu 0.99s olan yapının rijitliği 1.14s ile 0.885s arasında değiştiği görülmüştür.

Tablo 1. Yapının periyot değişimi

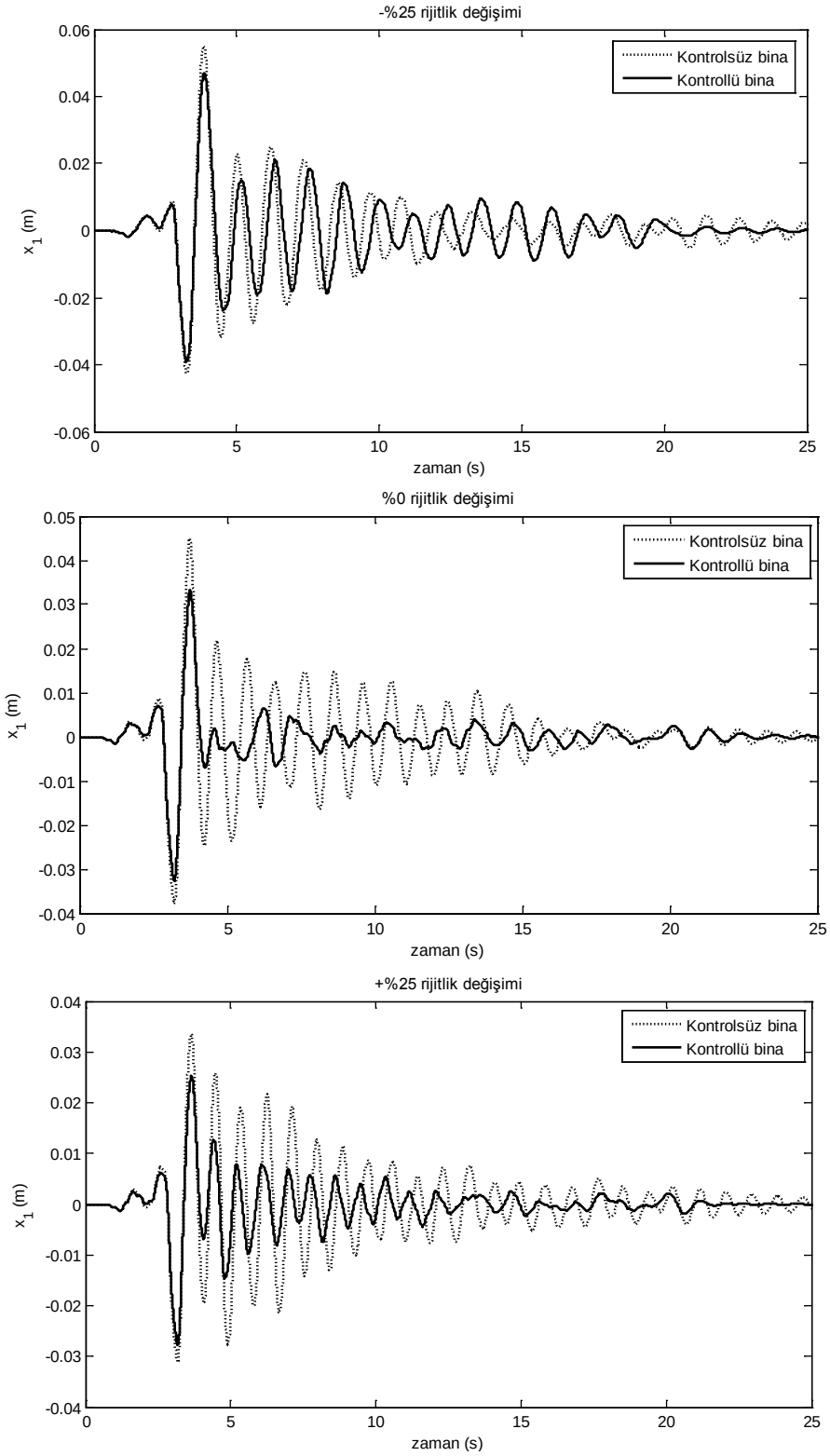
Rijitlik Değişimi	-%25	-%20	-%15	-%10	-%5	**%0**	+%5	+%10	+%15	%20	+%25
Yapının periyodu (s)	1.14	1.11	1.07	1.04	1.015	**0.99**	0.97	0.94	0.92	0.90	0.885

Tablo 2'de Erzincan depremi (Erzincan merkez kaydının kuzey-güney bileşeni) etkisi altında yapılan analiz sonuçlarından maksimum yer değiştirmeler görülmektedir. Tabloda görüldüğü gibi rijitlik bir miktar değişse bile kütle sönümleyicisinin oldukça faydalı olduğu görülmüştür. Özellikle %15 rijitlik değişimine kadar çok ciddi bir performans kaybı görülmemektedir. Deprem etkisi altında oluşabilecek ikinci mertebe etkilerden dolayı periyodun bir miktar değişmesi bir sorun oluşturmayacaktır. Rijitlik değişiminin %25 mertebelerine ulaşması durumunda kütle sönümleyicisi, maksimum yer değiştirmenin düşmesinde yaklaşık olarak %50 daha az etkili olmaktadır.

Tablo 2. Erzincan depremi altında yer değiştirme değerleri

Rijitlik Değişimi	-%25	-%20	-%15	-%10	-%5	**%0**	+%5	+%10	+%15	%20	+%25
Kontrolsüz Bina 1. Kat (cm)	5.51	5.30	5.11	4.92	4.71	**4.49**	4.25	4.01	3.78	3.56	3.35
Kontrollü Bina 1. Kat (cm)	4.72	4.39	4.07	3.79	3.54	**3.32**	3.15	3.04	2.95	2.86	2.77
Azalama (%)	14.34	17.17	20.35	22.97	24.84	**26.06**	25.88	24.19	21.96	19.66	17.31
Kontrolsüz Bina 10. Kat (cm)	35.54	34.06	32.64	31.22	29.79	**28.37**	26.96	25.59	24.27	22.99	21.76
Kontrollü Bina 10. Kat (cm)	31.02	28.65	26.36	24.22	22.31	**20.84**	20.02	19.29	18.65	18.06	17.50
Azalama (%)	12.72	15.88	19.24	22.42	25.11	**26.54**	25.74	24.62	23.16	21.44	19.58

Şekil 2'de Erzincan depremi için elde edilmiş 1. katın yer değiştirmesinin zaman tanım alanındaki sonuçları ±%25 rijitliği değişimi ve rijitliği değişmemiş olan durum için verilmiştir.



Şekil 2. Erzincan depremi etkisinde rijitliği ±%25 değişen ve rijitliği değişmemiş yapı için 1. kat yer değiştirmesi

Tablo 3'te El Centro depremi (ELC180 bileşeni) etkisi altında yapılan analiz sonuçlarından maksimum yer değiştirmeler görülmektedir. Tablodan, rijitlik değişmesi durumunda kütle sönümleyicisinin etkisinin azalmasına rağmen faydalı olduğu görülmektedir. Rijitliğin aynı miktarda değişmesi durumunda, değişimin pozitif bölgesinde negatif bölgeye göre kütle sönümleyicisi etkisini daha az kaybetmiştir. Kütle sönümleyicisi, rijitlik değişiminin pozitif ve negatif bölgelerinde maksimum yer değiştirmenin düşmesinde sırasıyla %22 ve %70 daha az etkili olmaktadır.

Tablo 3. El Centro depremi altında yer değiştirme değerleri

Rijitlik Değişimi	-%25	-%20	-%15	-%10	-%5	**%0**	+%5	+%10	+%15	%20	+%25
Kontrolsüz Bina 1. Kat (cm)	2.21	2.19	2.48	2.66	2.83	**2.88**	2.81	2.66	2.50	2.35	2.53
Kontrollü Bina 1. Kat (cm)	1.87	1.71	1.51	1.47	1.44	**1.43**	1.39	1.34	1.32	1.44	1.54
Azalama (%)	15.39	21.90	39.29	44.98	49.23	**50.11**	50.58	49.69	47.05	38.88	39.25
Kontrolsüz Bina 10. Kat (cm)	15.44	16.17	17.44	17.97	17.91	**17.50**	18.23	18.32	17.87	16.96	17.45
Kontrollü Bina 10. Kat (cm)	13.23	12.12	10.58	9.74	9.32	**9.18**	9.12	9.13	9.18	9.39	9.91
Azalama (%)	14.31	25.06	39.34	45.78	47.97	**47.56**	49.97	50.18	48.64	44.60	43.22

4. SONUÇLAR

Ayarlı kütle sönümleyicilerinin özellikleri genelde yapının periyotuna bağlı olarak değişim gösterdiği için yapının rijitliğinin değişmesi durumu incelenmiştir. Yapının rijitliğin azalmasının ve çoğalmasının %25'e kadar olması durumda kütle sönümleyicilerinin, titreşimlerin azalmasında etkili olduğu görülmüştür.
Optimum kütle sönümleyicisi değerleri doğrusal yapı modelleri için elde edilmektedir. Dış etkiye bağlı olarak ikinci mertebe etkilerden dolayı yapının periyodunda bir miktar değişim meydana gelebilir. Yapının rijitliğinin değiştirilmesi ile yapının periyodunun da değişmesi sağlanmıştır. Sonuçlardan görülmektedir ki, bir miktar periyot değişimi olduğu durumda titreşim seviyesinin azalımı çok fazla düşmemektedir.
Hesap yönteminde yapılan kabuller dışında binadaki yükleme durumlarından dolayı periyot değişimi meydana gelebilir. Bu durumda da kütle sönümleyicisinin başarılı olduğu irdelenmiştir.
Analiz sonuçları incelendiğinde ±%10 rijitlik sapması olduğunda yer değiştirmelerin azalmasında ciddi bir fark olmamaktadır. Buradan, rijitlik değişimini oluşturabilecek kabul ve hataların %10 sınırını geçmemesi durumda kütle sönümleyicisinin optimum değerlerinin geçerli olduğu sonucuna varılabilir.

KAYNAKLAR

Bakre, S.V., Jangid, R.S. (2007). Optimal parameters of tuned mass damper for damped main system. *Structural Control and Health Monitoring* **14**,448-470.
Bekdaş, G., Nigdeli, S.M. (2011). Estimating Optimum Parameters of Tuned Mass Dampers Using Harmony Search. *Engineering Structures* **33**,2716-2723.
Celep, Z., Kumbasar, N. (2001). Yapı Dinamiği. İstanbul: Beta Dağıtım 3.Baskı.
Chopra, A.K. (2001). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall.
Clough, R.W., Penzien, J. (1993). Dynamics of Structures. New York: Mc Graw-Hill Book Company.
Den Hartog J.P. (1947). Mechanical Vibrations. 3rd Edition. New York: McGraw-Hill.
Frahm, H. (1911). Device for damping of bodies. U.S. Patent No: 989,958.

Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan, G.V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. Simulation **76**, 60–68.
Hadi, M.N.S., Arfiadi, Y. (1998). Optimum design of absorber for MDOF structures. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* **124**,1272–1280.
Hart, G.C., Wong, K. (1999). *Structural Dynamics for Structural Engineering*. New York: John Wiley and Sons Inc.
Lee, C.L., Chen, Y.T., Chung, L.L., Wang, Y.P. (2006). Optimal design theories and applications of tuned mass dampers. *Engineering Structures* **28**,43-53.
Leung, A.Y.T., Zhang, H. (2009). Particle swarm optimization of tuned mass dampers. *Engineering Structures* **31**,715-728.
Marano, G.C., Greco, R., Chiaia, B. (2010). A comparison between different optimization criteria for tuned mass dampers design. *Journal of Sound and Vibration* **329**, 4880-4890.
Ormondroyd, J., Den Hartog, J.P. (1928). The theory of dynamic vibration absorber. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* **50**, 9–22.
Rana, R., Soong, T.T. (1998). Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Engineering Structures* **20**,193–204.
Singh, M.P., Matheu, E.E., Suarez, L.E. (1997). Active and semi-active control of structures under seismic excitation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics **26**, 193-213.
Thompson, A.G. (1981). Optimum damping and tuning of a dynamic vibration absorber applied to a force excited and damped primary system. *Journal of Sound and Vibration* **77**,403–415.
Warburton, G.B., Ayorinde, E.O. (1980). Optimum absorber parameters for simple systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **8**,197–217.
Warburton ,G.B. (1982). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **10**,381–401.