

کنترل سازه ها با میراگرهای
غیرفعال ، طراحی عملکردی
بهبوده برای زلزله

izuru takewak

مهندس علیرضا صالحین

مهندس نیما اصغری

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

تقدیم نامه مهندس علیرضا صالحین

با نهایت قدردانی و تشکر، تقدیم به اساتید زحمتکش و عزیزم:

کانچو شیرزاد و شیهان استند آبادی (اساتید کیوکوشین کاراته، شین ذن شیر و شمشیر)



مهندس علی جمالی و مهندس هراند جوادیانس (اساتید مهندسی جوش و NDT، شرکت BKS)



تقدیم نامه مهندس نیما اصغری

تقدیم به روح پاک مادر عزیزتر از جانم که آفتاب مهر و عشقش در قلبم همواره پا بر جاست و هرگز غروب نخواهد کرد. پدر ایثارگرم که همواره پشتیبانی محکم و مطمئن برای من در زندگی بوده، و برادر مهربانم که همدم و همراه همیشگی من در زندگی بوده است.

فهرست مطالب

صفحه 6	مقدمه
صفحه 7	پیشگفتار نویسنده
صفحه 10	فصل 1: مقدمه
صفحه 23	فصل 2: طراحی بر اساس معیار بهینگی: معیار واحد یا ضابطه بشکل تابع انتقال
صفحه 61	فصل 3: طراحی بر اساس معیار بهینگی: معیار چندگانه در عبارات پاسخ های لرزه ای
صفحه 87	فصل 4: طراحی بر اساس حساسیت بهینه میراگرها در قاب های مقاوم خمشی
صفحه 119	فصل 5: طراحی بر اساس حساسیت میراگرها در ساختمان های 3 بعدی
صفحه 139	فصل 6: طراحی بر اساس حساسیت میراگرها در ساختمان های برشی بر روی سطح زمین تحت بارگذاری زلزله
صفحه 159	فصل 7: طراحی بر اساس حساسیت میراگرها در ساختمان های خمشی-برشی بر روی سطح زمین تحت بارگذاری زلزله
صفحه 185	فصل 8: طراحی بر اساس حساسیت بهینه میراگرها در ساختمان برشی با میراگر جرمی تنظیم شده بر روی سطح زمین تحت بارگذاری زلزله
صفحه 210	فصل 9: عدم قطعیت طراحی میراگرها در ساختمان های برشی
صفحه 254	فصل 10: پیشینه تئوری اثر بخشی سیستم کنترل غیرفعال
صفحه 277	فصل 11: پاسخ بحرانی دینامیکی غیرخطی سازه های ساختمانی دارای میراگرهای غیرفعال
صفحه 304	واژه نامه تخصصی انگلیسی به فارسی

مقدمه

جای این کتاب در کنترل ارتعاشات خالی (در بازار کتاب ایران) بود. موضوع بهینه سازی محل قرارگیری میراگرها بر اساس عملکرد بحث جالب، پیچیده و تاثیر گذاری است. چه از لحاظ کارایی میراگر، تناژ میراگر، هزینه (نسبت میراگر با تناژ کمتر) و بهینه سازی میزان تاثیر گذاری در سازه، این مبحث می تواند تاثیر گذار باشد. مطالعه این کتاب نیاز به تسلط بر دروس بر برخی دروس از جمله: دینامیک سازه، ریاضیات عالی مهندسی، معدلات دیفرانسیل، بهینه سازی و مهندسی زلزله، دارد. بنابراین اگر خواننده محترم در مورد مذکور مطالعه لازم را داشته باشد تا بهره کافی از کتاب را ببرد. بنابراین پیشنهاد می گردد که پیش از خواندن کتاب، مروری گذرا و سریع بر دروس فوق داشته باشید.

آقای Izuru Takewaki کتب متعددی در مورد بهینه سازی، دینامیک سازه و کنترل ارتعاشات دارند و مطمئناً سواد و تجربه لازم را نیز داشته اند که این کتاب را بر اساس مطالعات و تحقیقات خود تالیف نمودند. همچنین انتشارات Wiley معمولاً کتب با ارزش علمی بالا را چاپ می نماید. بنابراین از لحاظ کیفیت علمی کتاب، می توان تا حدود زیادی اطمینان حاصل نمود. نویسنده کتاب ژاپنی هست، نگارش کتاب به انگلیسی توسط خود ایشان انجام گردیده، بنابراین نمی توان انتظار متن روان (مانند نویسندگان آمریکایی یا انگلیسی) را از آن داشت. این موضوع به وفور در طول متن کتاب قابل مشاهده است. از طرفی به واسطه روابط ریاضیاتی پشت سر هم، ممکن است روند کتاب مقداری به نظر خواننده خشک بیاید. هر چند مترجمین نهایت تلاش خود را برای بهترین برگردان کرده است. در هر حال، هنگام تصمیم گیری برای ترجمه بر اساس موضوع و تایتل کتاب اخذ گردیده و تایتل مشابه با نویسنده آمریکایی یا انگلیسی یافت نگردید.

سابقاً برای هر کتاب DVD تهیه می گردید که شامل گزارشات فنی، کتب مرتبط، کلیپ و انیمیشن و ... بود، در حال حاضر و قابلیت دسترسی سریع به تلگرام، کلیه مطالب مرتبط با این کتاب، بعلاوه یک کتابخانه عظیم و تکمیل در زمینه مهندسی سازه، زلزله، ژئوتکنیک و ... به آدرس [@seismicisolation](https://www.seismicisolation.com) موجود می باشد که مخاطبین محترم می توانند به آن مراجعه نمایند.

با تشکر از انتخاب حضرت عالی برای خواندن این کتاب، لطفاً پیشنهادات، انتقادات و نکات اصلاحی مربوط به این کتاب یا سایر کتب چاپ شده توسط بنده را به شناسه تلگرامی [@alirezasaalehin](https://www.alirezasaalehin.com) ارسال نمایید.

مهندس علیرضا صالحین، مدیر علمی نشر دانشگاهی فرهمند

زمستان 1397

پیشگفتار نویسنده

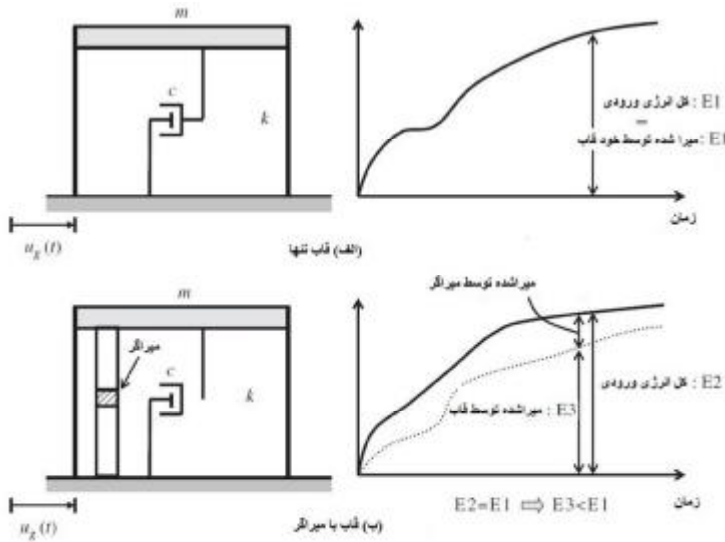
مفهوم طراحی مبتنی بر عملکرد به خوبی امروزه در طراحی سازه ها پذیرفته شده است. در کشورهای زلزله خیز، فلسفه طراحی مقاوم در برابر زلزله به مقاومت در برابر تکان های زمین از طریق ایجاد سختی کافی و مقاومت در ساختمان به عنوان مفهوم طراحی سازه ها برای چندین سال پذیرفته شده است. از سوی دیگر، یک استراتژی جدید بر اساس مفهوم کنترل ساختاری فعال و غیر فعال به تازگی برای طراحان با ابزار های قدرتمند برای طراحی مبتنی بر عملکرد ارائه شده است. سیستم های کنترل اغلب در طراحی بر پایه عملکرد الزاماتی جهت انعطاف پذیری سازه تعیین می کنند. با این حال، به نظر نمی رسد، مهندسان سازه ابزاری برای انتخاب مکان بهینه سیستم های کنترل، داشته باشند.

اگر چه استفاده از دستگاه های کنترل ساختاری ممکن است پاسخ زلزله را به طور کلی کاهش دهد، اغلب برخی از پاسخ های ساختاری محلی تقویت می شود. به عنوان مثال، نیروهای عضو اطراف دستگاه های کنترل. این پدیده باید در طراحی ساختاری واقعی حل شود. علاوه بر این، آن را توجه داریم که زلزله دارای مقدار زیادی عدم قطعیت می باشد، به عنوان مثال، (Drenick (1970)، (Bertero (1987) و (Takewaki (2006) را مشاهده نمایید. به منظور مقابله با این مشکل، انتظار می رود که نصب و راه اندازی سیستم های هوشمند اتلاف انرژی، نقش حیاتی بازی کنند. در این کتاب، طراحی بر اساس معیار بهینه و الگوریتم طراحی مبتنی بر حساسیت بهینه در جزئیات سیستم های کنترل و اتلاف انرژی در سازه های ساختمانی توضیح داده شده است. تغییر مکان، شتاب و انرژی ورودی زلزله به عنوان سه شاخص اصلی در طراحی بر اساس عملکرد می باشد. پس از آن قاب سازه و سیستم های کنترل و اتلاف انرژی مناسب مدل، مقدار و مکان بهینه کنترل و سیستم های اتلاف انرژی به صورت خودکار و به طور همزمان تعیین می شود. در اینجا سیستم سازه ای رفتار برشی با پایه ثابت، قاب خمشی با پایه ثابت، ساختمان سه بعدی با پایه ثابت، ساختمان های برشی با و بدون فنر و میراگر جرمی تنظیم شده بر روی زمین سطح و ساختمان های خمشی - برشی بر روی زمین سطح، رفتار می کند. از آنجا که زمین یا خاک زیر ساختمان بر رفتار لرزه ای ساختمان های با و بدون فنر و میراگر تاثیر می گذارد، مدل ها باید اثر اندرکنش خاک-سازه را در نظر بگیرند. هر دو تابع انتقال و پاسخ زلزله به عنوان شاخص های عملکرد معرفی شده اند.

مفهوم طراحی فنر و میراگر با بار و مدل شامل عدم قطعیت می شود و مسائل نظری بر سیستم کنترل و اتلاف انرژی تاثیر می گذارد و در نهایت انرژی ورودی زلزله بیان می شود. اگر معیار انرژی ورودی زلزله حدود هفت باشد، صرف نظر از وجود میراگر و فنر و می توان انرژی ورودی زلزله را به عنوان انرژی ورودی به قاب تا حد زیادی جذب و در نتیجه میزان انرژی وارد شده به سازه را به شدت کاهش داد. اگر چه قاب اصلی طراحی شده معمولاً به طور الاستیک در زمان استفاده از سیستم اتلاف انرژی باقی می ماند، واکنش

دینامیکی غیر ارتجاعی سازه های ساختمانی با میراگر ویسکوز و یا پسماند نیز از نظر اثر بخشی فنر و میراگر مورد بحث قرار می گیرد.

هدف از این کتاب صرفاً ارائه نتایج بهینه سازی نیست و شرح مفصلی از چگونه تعیین اندازه بهینه و محل به طور همزمان به دست آمده است. جزئیات فرآیندهای بهینه سازی گام به گام توضیح داده شده است. بنابراین، مهندسان سازه می توانند با انجام برنامه نویسی های خود برای به دست آوردن مقدار و مکان بهینه اقدام کنند. اکثر جنبه های تکنیک های توضیح داده شده توسط مجلات بین المللی علمی و قابل اعتماد به رسمیت شناخته شده اند. علاوه بر این، تکنیک های توضیح داده گاهی اوقات به عنوان تکنیک های کلیدی مرجع در بهینه سازی سیستم های کنترل استفاده می شود، و مقایسه این روش با دیگران مشکل نیست. امیدواریم که این کتاب بتواند به طراحان سازه و مهندسان ابزار و راهنماهای قدرتمندی جهت کنترل بهینه و هوشمند سازه ارائه دهد.



شکل - اثر بخشی استقامت تئوری میراگرهای الحاقی

References

- Anderson, J.C. and Bertero, V.V. (1987) Uncertainties in establishing design earthquakes. *Journal of Structural Engineering*, **113** (8), 1709–1724.
- Casciati, F. (ed.) (2002) *Proceedings of 3rd World Conference on Structural Control*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Drenick, R.F. (1970) Model-free design of aseismic structures. *Journal of Engineering Mechanics Division*, **96** (EM4), 483–493.
- Hanson, R.D. and Soong, T.T. (2001) *Seismic Design with Supplemental Energy Dissipation Devices*, EERI, Oakland, CA.
- Housner, G., Bergmann, L.A., Caughey, T.A., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E.,

- Soong, T.T., Spencer, B.F., and Yao, J.T.P. (1997) Structural control: past, present, and future (special issue). *Journal of Engineering Mechanics*, **123** (9), 897–971.
- Housner, G.W., Masri, S.F., and Chassiakos, A.G. (eds) (1994) *Proceedings of 1st World Conference on Structural Control*, IASC, Los Angeles, CA.
- Johnson, E., and Smyth, A. (eds) (2006) *Proceedings of 4th World Conference on Structural Control and Monitoring (4WCSCM)*, IASC, San Diego, CA.
- Kobori, T. (1993) *Structural Control: Theory and Practice*, Kajima Press (in Japanese).
- Kobori, T., Inoue, Y., Seto, K., Iemura, H., and Nishitani, A. (eds) (1998) *Proceedings of 2nd World Conference on Structural Control*, JohnWiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, JohnWiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Takewaki, I. (2006) *Critical Excitation Methods in Earthquake Engineering*, Elsevier Science, Amsterdam.

1. مقدمه

1.1 پیش زمینه و مرور

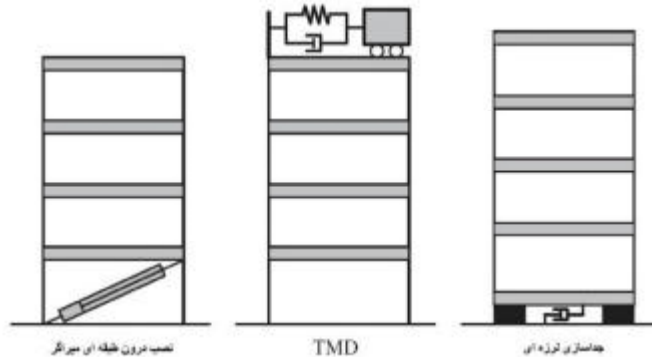
کنترل سازه ای دارای سابقه طولانی و موفق در رشته مهندسی مکانیک و هوا فضا می باشد. با این حال، در زمینه مهندسی عمران، دارای پیش زمینه های مختلفی می باشد. (Housner و همکاران، 1994، 1997؛ Kobori، 1996؛ Soong و Kobori، 1997؛ Dargush، Kobori و همکاران، 1998؛ Rivin، 1999؛ Srinivasan و McFarland، 2000؛ Hanson و Soong، 2001؛ Burns، 2002؛ Casciati، Johnson و Soong، 2002؛ Constantinou و Christopoulos، 2002؛ Filiatrault و Johnson، 2006؛ Smyth، 2006؛ Arora، 2007؛ de Silva، 2007). ساختمان و سازه های عمرانی اغلب تحت زلزله های شدید و اختلالات باد با عدم قطعیت بزرگ قرار می گیرند. بنابراین، نیاز به محاسبه این عدم قطعیت در نظریه کنترل سازه ای و کاربرد آن در سازه های واقعی مهم و ضروری می باشد. پروفیسور Soong پنج حوزه مهم تحت تأثیر توسط کنترل سازه ای در سخنرانی اصلی خود (Soong، 1998) را در کنفرانس دوم جهانی کنترل سازه که در کیوتو برگزار شد، ارائه داد: 1- رویکرد سیستمی 2- عمق تاثیرگذاری 3- اثر گسترش پذیری 4- تحقیقات تجربی 5- ابداعات و نوآوری های مهندسی. در میان این پنج حوزه اثر گسترش پذیری شامل استفاده موثر از میراگر غیرفعال در سازه های ساختمانی می باشد. در این کتاب، این جزئیات توضیح داده خواهد شد. در مراحل اولیه توسعه در کنترل غیرفعال سازه ای، نصب و راه اندازی میراگر تکمیلی یا مکمل در ساختمان های معمولی هدف اصلی بود. طبیعی است که پس از تحولات گسترده ای که در سیستم های مختلف میراگر روی داد، هدف دیگری درباره توسعه و راه اندازی هوشمند و موثر میراگرهای غیرفعال در نظر گرفته شود. اگر چه انگیزه ی الهام گرفته شده درباره نصب و راه اندازی هوشمند میراگرهای غیرفعال مکمل وجود دارد، اما تحقیق در مورد محل قرار گیری بهینه میراگرهای غیرفعال بسیار محدود بوده است. مطالعات زیر به این موضوع می پردازند. Constantinou و Tadjbakhsh ضریب میرایی مطلوب برای میراگر قرار داده شده در طبقه اول یک ساختمان برشی در معرض حرکات تصادفی زلزله افقی را تعیین کردند. Muller و Gurgoze (1992) یک روش عددی برای پیدا کردن مکان بهینه و ضریب میرایی مطلوب برای یک میراگر ویسکوز منفرد در سیستم خطی چند درجه آزادی (MDOF) ارائه کردند. Zhang و Soong (1992) یک روش طراحی لرزه ای برای پیدا کردن پیکربندی بهینه ی میراگرهای ویسکوز برای یک ساختمان با طبقات دارای سختی های خاص را پیشنهاد دادند. در حالی که روش آنها بر اساس قرارگیری میراگر در طبقات با میزان تغییرمکان جانبی نسبی حداکثری بود. Hahn و Sathivageeswaran چند مطالعه پارامتری درباره اثرات میراگر در توزیع پاسخ لرزه ای در ساختمان برشی انجام دادند و نشان دادند که برای یک ساختمان با سختی طبقات یکنواخت، میراگرها باید به طبقات نیمه پایین تر ساختمان اضافه شوند. De Silva (1981) یک الگوریتم گرادینانی برای طراحی بهینه ی

میراگرهای ویسکوز گسسته در کنترل ارتعاش سیستم های قابل انعطاف ارائه نمود. Kelly و Inaudi (1993) یک روش برای پیدا کردن میرایی بهینه جداساز پیشنهادی برای حداقل پاسخ شتاب سازه های دارای جداساز لرزه ای در معرض تحریک تصادفی ثابت را ارائه دادند. Tsuji و Nakamura (1996) پیشنهاد یک الگوریتم برای پیدا کردن هر دو نوع توزیع مطلوب سختی طبقات و توزیع بهینه میراگر برای یک مدل برشی ساختمان که در برابر مجموعه ای از طیف سازگار زلزله قرار گیرد، دادند. Connor و Klink (1996) و Connor و همکاران (1997) توزیع بهینه سختی و توزیع میراگر که متناسب با توزیع سختی محدود شده است، را معرفی کردند. آنها این توزیع را یک توزیع شبه بهینه دانستند. Masri همکاران (1981) یک روش ساده و تا کنون کاربردی، کنترل بهینه فعال مطلوب را برای کاهش نوسانات سیستم های پارامتریک توزیع یافته تحت تاثیر تحریکات تصادفی و نامعین دلخواه را معرفی نمودند، هنگام مواجهه با کنترل فعال، نتایج برای بسط و گسترش در تئوری های کنترل بهینه غیر فعال آموزنده قرار گرفت. به تازگی Takewaki (1997)، راه دیگری برای قرارگیری هوشمند و بهینه میراگرهای غیرفعال با کمک مفاهیم روش های مسئله معکوس و روش های طراحی بر اساس معیار بهینگی یافتند. ایشان مشکل محل قرارگیری بهینه میراگرهای غیرفعال را با تعیین معیار بهینگی و سپس توسعه روش افزایشی مسئله معکوس حل کرد. طی سالیان زیاد، این پژوهش نقش مهمی در این حوزه را بازی کرد و محققین بسیاری به این مقاله استناد کردند و نیز نتایج حاصل از روش Takewaki 1997 را با روش های خود مقایسه کردند. متعاقباً Takewaki و Yoshitomi، 1998 و همکاران 1999 و Takewaki 2000 یک روش جدید را براساس مفهوم حساسیت سنجی بهینه معرفی کردند. مقدار بهینه میراگرهای غیرفعال بطور اتوماتیک با قرارگیری بهینه میراگرها طبق این روش بدست می آید. پس از این تحقیقات مطالعات مشابه فراوانی توسعه یافته شد.

کتاب زیادی در رابطه با طراحی میراگر غیر فعال وجود دارد. Connor و Klink (1996) به معرفی مفهوم "طراحی مبتنی بر حرکت" و توضیحات چند منظوره در سیستم های مختلف کنترل فعال و غیر فعال، یعنی ویسکو الاستیک، فنر و میراگر، میراگر ویسکوز، فنر و میراگر تنظیم جرم (TMDS)، سیستم های جداساز لرزه ای و سیستم های کنترل فعال ارائه دادند. Soong و Dargush (1997) جنبه های اساسی مکانیکی میراگر غیر فعال و نمونه های عملی بسیاری از برنامه در حال حاضر که برای ساختمان واقع بینانه است، بیان کردند. Hanson و Soong (2001) به معرفی مفاهیم اولیه میراگر فعال آغاز پرداختند و در حال حاضر چند نمونه از نرم افزار از آن موجود است. Christopoulos و Filiatrault (2006) به سیستم اتلاف انرژی غیر فعال و ساختمان جداسازی شده پایه پرداختند. آنها از چندین سیستم مختلف فنر و میراگر الحاقی، یعنی فلزی و اصطکاک فنر و میراگر، میراگر ویسکوز و ویسکو الاستیک، فنر و میراگر خود مرکز گرا، TMDS و غیره استفاده کردند. همچنین از اصل انرژی و عملکرد مبتنی بر اصل طراحی، استفاده کردند. De Silva (2007) بسیاری از فصل مفید برای میراگر غیر فعال را جمع آوری تا به امروز را جمع آوری و بررسی کرده است.

1.2 اساس و بنیاد نصب میراگر غیر فعال

سه نوع سیستم کنترل غیر فعال اصلی نصب شده در سازه های ساختمانی، (الف) میراگرهای غیر فعال مکمل از نوع قابل نصب در طبقه (میراگر ویسکوز، میراگر ویسکوالاستیک، میراگر هیسترتیک)، (ب) TMDS و (ج) سیستم های جداساز لرزه ای، به عنوان نشان داده شده در شکل 1.1 می باشند. در این کتاب، طبقه نصب و راه اندازی از فنر و میراگر غیر فعال مکمل موضوع اصلی است. TMDS نیز بخشی از آن است. به منظور ارائه اصول اساسی برای مدل سازی مکانیکی این طبقه نصب و راه اندازی فنر و میراگر غیر فعال مکمل، میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک به عنوان نمونه گرفته شده است.



شکل 1.1 نحوه بکارگیری و نصب 3 نوع میراگر غیر فعال

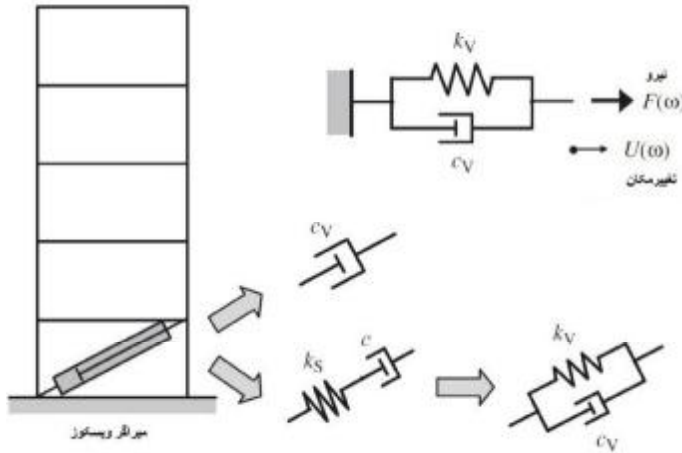
1.2.1 میراگرهای ویسکوز

سیستم غیر فعال میراگر، همانطور که در شکل 1.2 نشان داده شده است، به دو صورت، مدل شده است. یکی از میراگر و دیگری پشتیبانی از میراگر توسط یک فنر (مدل Maxwell). c نشان دهنده ضریب میرایی از میراگر و k نشان دهنده سختی فنر تکیه گاهی می باشد. تکیه گاه فنری نشان دهنده سختی میراگر ویسکوز یا سختی سیستم تکیه گاهی اطراف آن است. برای مدل Maxwell رابطه نیروی تغییر مکان در فرکانس دامنه را می توان به صورت زیر بیان کرد.

$$F(\omega) = (K_R + iK_V)U(\omega) = (k_V + i\omega c_V)U(\omega) \quad (1.1)$$

در معادله 1.1، k_V و c_V نشان دهنده سختی فنر و ضریب میرایی، میراگر از شبه مدل Kelvin-Voigt تبدیل از مدل Maxwell می باشد. سختی پیچیده و مختلط در معادله 1.1 از فرمولاسیون سلسله مدل های میراگر و فنر تعریف می گردد:

$$K_R + iK_I = \frac{1}{\frac{1}{i\omega c} + \frac{1}{k_s}} \quad (1.2)$$



شکل 1.2 سیستم میراگر غیرفعال شامل میراگر ویسکوز و مدل سازی آن بصورت مدل ضربه گیر و مدل Maxwell

پس کمی تغییرات، اجزای حقیقی و مختلط معادله سختی در معادله 1.2 به صورت زیر در می آید:

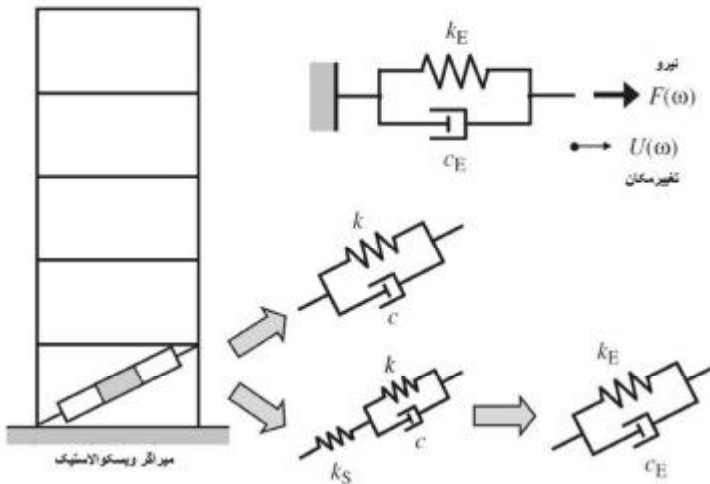
$$K_R(\omega) = K_V(\omega) = \frac{k_s c^T \omega^T}{k_s^T + c^T \omega^T} \quad (1.3)$$

$$K_I(\omega) = \omega c_V(\omega) = \frac{k_s^T c \omega}{k_s^T + c^T \omega^T} \quad (1.4)$$

از معادله 1.3 و 1.4 می توان متوجه شد که k_V و c_V توابع فرکانس اعمالی و تحمیلی هستند.

1.2.2 میراگرهای ویسکوالاستیک

سیستم میراگر غیر فعال (همانطور که در شکل 1.3 نشان داده شده) از جمله میراگر ویسکو الاستیک به دو صورت، مدل شده است. یکی مدل Kelvin-Voigt و دیگری مدل Kelvin-Voigt با تکیه گاه (برای مثال، Kasai و همکاران، 1998؛ Fu و Kasai، 1998). برای سختی میراگر ویسکو الاستیک و C میرایی، میراگر ویسکو الاستیک است. از سوی دیگر، k_s نشان دهنده سختی تکیه گاه فنری است. این تکیه گاه فنری نشان دهنده سختی دستگاه میراگر ویسکوالاستیک (به عنوان مثال، پیوست فولاد از مواد ویسکو الاستیک است) یا سختی سیستم تکیه گاهی اطراف آن می باشد. به خوبی مشخص شده است که k و C بیشترین وابستگی به دامنه ارتعاش و درجه حرارت را در مواد ویسکو الاستیک دارند. بنابراین، رفتار سیستم میراگر ویسکو الاستیک سخت تر است از فنر و میراگر ویسکوز به طور کلی، می باشد.



شکل 1.3 سیستم میراگر غیرفعال شامل میراگر ویسکوالاستیک و مدل سازی آن بصورت مدل Kelvin-Voigt و مدل Kelvin-voigt با تکیه گاه

همانند مدل Kelvin-Voigt با تکیه گاه، رابطه نیرو- تغییرمکان در حوزه فرکانس را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$F(\omega) = (K_R + iK_I)U(\omega) = (k_E + i\omega c_E)U(\omega) \quad (1.5)$$

در معادله 1.5، k_E و c_E نشان دهنده سختی فنر و ضریب میرایی از میراگر از شبه مدل Kelvin-Voigt که از تبدیل مدل با تکیه گاه Kelvin-Voigt، تعیین شده، می باشد. سختی پیچیده ای از این شبه مدل

Kelvin-Voigt که از تدوین مدل سری از مدل Kelvin-Voigt با تکیه گاه فنری به صورت زیر به دست آمده است:

$$K_R + iK_I = \frac{1}{\frac{1}{k + i\omega c} + \frac{1}{k_s}} \quad (1.6)$$

بعد از تغییراتی در قسمت حقیقی و مختلط سختی های پیچیده در معادله 1.6 به صورت زیر بیان می شود:

$$K_R(\omega) = K_E(\omega) = \frac{k_s(k^T + kk_s + c^T\omega^T)}{(k + k_s)^T + c^T\omega^T} \quad (1.7)$$

$$K_I(\omega) = \omega C_E(\omega) = \frac{\omega k_s^T c}{(k + k_s)^T + c^T\omega^T} \quad (1.8)$$

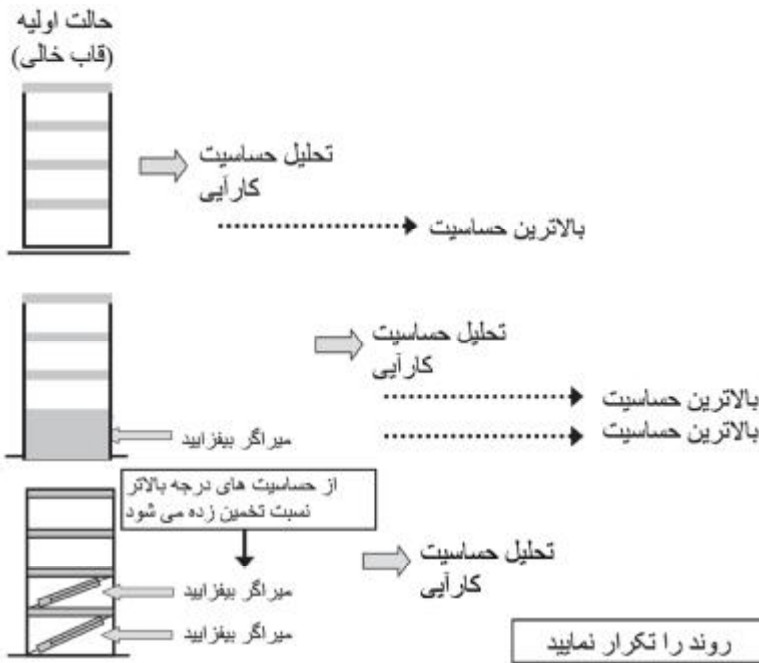
از معادلات 1.7 و 1.8 قابل درک است که K_E و C_E توابعی از فرکانس تحریک هستند.

1.3 چیدمان و سازمان این کتاب

در فصل 1، پیشینه این کتاب و اصول نصب و راه اندازی میراگر غیر فعال ارائه می دهد. علاوه بر این، یک بررسی جامع در زمینه طراحی سیستم میراگر غیر فعال، به ویژه سیستم های نصب و راه اندازی از نوع طبقه ای، انجام شده است. در فصل 2، طراحی مبتنی بر معیار بهینگی برای مدل های فتر (مدل های ساختمان برشی) که شامل یک معیار واحد ساده ارائه شده است. مقادیر مطلق توابع انتقال فرکانس طبیعی اساسی یک سیستم ساختاری در سیستم نامیرا از مقادیر کنترل همراه با فرکانس طبیعی اساسی گرفته شده است. مجموعه ای از شرایط بهینگی برای اولین بار ارائه شده است. سپس، به منظور استخراج یک راه حل رضایت بخش معیار بهینگی، فرمولاسیون مشکلات معکوس افزایشی معرفی شده است. فصل 3 شامل چند طرح مبتنی بر معیار بهینگی متمرکز می باشد، از جمله موارد شاخص؛ تغییر شکل و شتاب است. تحت شرایطی که اعضای سازه ثابت هستند، تغییر شکل و شتاب بهینه شده است. روش سیستماتیک و کارآمد برای بهینه سازی به طور همزمان از توزیع سختی طبقه و توزیع ضریب میرایی، میراگر بیان می شود. این روش، یک روش طراحی دو مرحله ای است. در مرحله اول، طراحی جهت ارضاء موقعیت بهینه سازی برای یک مجموعه مشخص از ظرفیت سختی کل طبقات و میراگرها می باشد. در مرحله دوم، ظرفیت سختی کل طبقات و یا میراگرها با موقعیت های بهینه سازی مناسب، متنوع است. در حالی که تغییر شکل هر دو در مراحل اول و دوم کاهش می یابد، شتاب تنها در مرحله دوم از طریق افزایش ظرفیت میراگر کل، کاهش می یابد. فصل 4 به معرفی مفهوم طراحی مبتنی بر حساسیت بهینه با کمک فتر و میراگر در قاب های مقاوم خمشی می پردازد. سیستم میراگر توسط یک مدل ویسکوز و یا Maxwell مدل می شود. دامنه مجموع انتقال تابعی از

هدف طراحی است. مقدار میراگر افزایش می یابد، تا مکان بهینه و مقدار به طور خودکار بر اساس حساسیت بهینه تعیین شود. حساسیت هدف به صورت غیر یکنواخت رفتار می کند. یک دیاگرام شماتیک برای روش بهینه سازی در فصل 4 در شکل 1.4 نشان داده شد. در حالی که الگوریتم های مختلفی تهیه شد و تغییرات، توزیع یکنواخت طبقات با اضافه شدن فنر و میراگر در فصل 2 در نظر گرفته شد، که تغییراتی برابر صفر ایجاد می شود. این رفتار به طراحان برای درک همزمان موقعیت و ظرفیت بهتر میراگر مورد نیاز کمک می کند تا به سطح عملکرد پاسخ مورد نظر برسد. در فصل 5، یک روش طراحی بهینه در سازه های سه بعدی مبتنی بر حساسیت میراگر توضیح داده شده است. مانند فصل 4، از مجموع دامنه تابع انتقال تعریف شده برای بسیاری از تغییرمکان جانبی نسبی های درون طبقه ای محلی به عنوان هدف از طراحی درمان می شود. اثر پیچشی سازه های سه بعدی در نظر گرفته شده است و روش برای پیدا کردن بهترین مکان میراگر توضیح داده شده است. مسیر غیرمونتونیک با توجه به سطح کمی میراگر نیز در جزئیات نشان داده شده است. فصل 6 به طراحی مبتنی بر حساسیت بهینه با کمک فنر و میراگر در ساختمان های برشی بر روی سطح زمین تحت بار زلزله می پردازد. به خوبی نشان داده شده که خاک و یا زمین تا حد زیادی بر خواص ارتعاش سازه تاثیر می گذارند. این موضوع مهم است، بنابراین، روش بهینه سازی برای مدل اندرکنشی توسعه یافت. در حالی که برخی روش های کنترل فعال برای چنین یک مدل پیشنهاد شده است، نظریه ای برای سیستم های کنترل غیر فعال شده توسط نویسنده در حال حاضر برای اولین بار در اینجا و با جزئیات توضیح داده شده، پیشنهاد شد. فصل 7 به بیان مفهوم طراحی مبتنی بر حساسیت بهینه با کمک فنر و میراگر در ساختمان خمشی برشی بر روی زمین سطح تحت بار زلزله می پردازد. لازم به ذکر است که تغییر شکل خمشی برشی در ساختمان های بلند مهم است. برای اولین بار نشان داده شده است که با کمک فنر و میراگر فقط برای تغییر شکل برشی موثر است و یک روش برای پیدا کردن بهترین مکان میراگر با جزئیات توضیح داده شده است. در فصل 8، طراحی بهینه مبتنی بر حساسیت میراگر در ساختمان برشی با TMD بر روی زمین سطح تحت بار زلزله ارائه شد. در حالی که TMD به عنوان یک دستگاه کنترل غیر فعال بسیار محبوب است، هیچ روش طراحی بهینه از نوع کمک با فنر و میراگر ویسکوز مکمل با TMDS تا به حال شده ارائه نشده است. اثر سیستم TMD در مکان بهینه با کمک فنر و میراگر ویسکوز مکمل همچنین توضیح داده خواهد شد. در فصل 9 به بررسی یک چشم انداز جدید از طراحی با کمک فنر و میراگر در ساختمان های برشی با عدم قطعیت پرداخته می شود. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت یکی از موضوعات عمده به تازگی در طراحی سازه های ساختمانی مورد استفاده قرار گرفته است. اثرات عدم قطعیت با کمک فنر و میراگر، سازه اصلی، و حرکات زلزله در طراحی سازه های ساختمانی با کمک فنر و میراگر با جزئیات بحث شده است. به طور خاص، سطح عدم قطعیت تحت زلزله با کمک فنر و میراگر بزرگتر از سازه اصلی است و در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت با کمک فنر و میراگر و حرکات زمین تحت زلزله در طراحی قابل اعتماد چنین ساختارهای کنترل غیر فعال بسیار مهم است. روش تحریک بحرانی (Takewaki، 2006) برای اولین بار برای مدل سازی با عدم قطعیت در برابر زلزله معرفی شده است. سپس اطلاعاتی جهت تجزیه و تحلیل با عدم قطعیت برای

اندازه گیری تاب آوری ساختمان با کمک فنر و میراگر غیر فعال معرفی شده است و یک روش برای محاسبه همزمان بار و عدم قطعیت مدل ساختاری توضیح داده شده است. در فصل 10، مسائل نظری اثر بخشی سیستم های کنترل غیر فعال با استفاده از خواص ورودی ثابت انرژی (شکل موجود در مقدمه را مشاهده نمایید) توضیح داده شد. فرمول دوگانه در حوزه زمان و بسامد نقش مهمی در تأیید خواص ورودی ثابت انرژی بازی می کند. در فصل 11، پاسخ دینامیکی غیرالاستیک سازه ساختمانی با کمک فنر و میراگر ویسکوز و یا پسماند توضیح داده شده و اثر بخشی میراگر غیر فعال از نظر نوع میراگر غیر فعال بحث شده است. امواج سینوسی تشدید به عنوان ورودی تقریبی و طیف سازگار امواج به عنوان زلزله ورودی به کار می روند. سخن گفتن درباره آن بسیار مهم و مفید است، در حالی که کتاب حاضر تنها به کمک فنر و میراگر ویسکوز مکمل می پردازد، روش توضیح داده شده را می توان به کمک فنر و میراگر ویسکو الاستیک مکمل اعمال شود. این روش نشان داده شده در بخش 4.6-4.9 نمونه ای از فرمت خوب است. فرض کنیم که کمک فنر و میراگر ویسکو الاستیک را می توان با مدل Kelvin-Voigt مدل سازی کرد. هنگامی که مقدار کمک فنر و میراگر ویسکو الاستیک تغییر می کند، مقادیر سختی و ضریب میرایی ویسکوز به طور همزمان تغییر خواهد کرد. در این مورد، مناسب است که از ضریب میرایی ویسکوز به عنوان متغیر اولیه طراحی و از سختی مدل Kelvin-Voigt به عنوان متغیر وابسته استفاده کرد. این روش شبیه به شیوه استفاده شده در بخش 4.6-4.9 می باشد. شکل 1.4 یک دیاگرام شماتیک برای روش های بهینه سازی توضیح داده شده در این کتاب را نشان می دهد. روش بهینه سازی در فصل 4 و 9 بر اساس معیار بهینگی و حساسیت عملکرد می باشد. معیار محل قرارگیری میراگر از معیار بهینگی و حساسیت عملکرد مشتق شده است. در شکل 1.4، طراحی اولیه یک قاب بدون کمک فنر و میراگر الحاقی نشان داده شده است. تحلیل حساسیت تابع هدف با توجه به متغیر طراحی (میرایی ضریب میراگر الحاقی) برای اولین بار برای این قاب خالی انجام و بالاترین حساسیت عملکرد پیدا شده است. سپس ضریب میرایی از میراگر الحاقی به این طبقه اضافه شده است. این امر نشان می دهد که میراگر الحاقی با بیشترین حساسیت عملکرد می تواند عملکرد را به طور موثر کاهش می یابد و ضریب میرایی باید به میراگر الحاقی افزوده شود. باز هم، تحلیل حساسیت برای قاب با میراگر الحاقی و بالاترین عملکرد حساسیت پیدا شده است. ساختمان های چند طبقه حساسیت کارایی بالایی را نشان می دهند، سپس ضرایب میرایی با کمک فنر و میراگر الحاقی مربوطه اضافه شده است. باز هم، تحلیل حساسیت در کنار برای قاب با میراگر الحاقی با استفاده از روش توضیح داده شده در بالا تکرار می شود تا زمانی که به کل مقدار مورد نیاز کمک فنر و میراگر الحاقی رسیده شده باشد.



شکل 1.4 دیاگرام شماتیک نمایش دهنده فرآیند بهینه سازی تعریفی در این کتاب

References:

- Arora, J.S. (ed.) (2007) *Optimization of Structural and Mechanical Systems*, World Scientific.
- Asahina, D., Bolander, J.E., and Berton, S. (2004) Design optimization of passive devices in multi-degree of freedom structures. Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper no. 1600.
- Attard, T.L. (2007) Controlling all interstory displacements in highly nonlinear steel buildings using optimal viscous damping. *Journal of Structural Engineering*, **133** (9), 1331–1340.
- Aydin, E., Boduroglu, M.H., and Guney, D. (2007) Optimal damper distribution for seismic rehabilitation of planar building structures. *Engineering Structures*, **29**, 176–185.
- Burns, S.A. (ed.) (2002) *Recent Advances in Optimal Structural Design*, Structural Engineering Institute Technical Committee on Optimal Structural Design, ASCE, New York.
- Casciati, F. (ed.) (2002) *Proceedings of 3rd World Conference on Structural Control*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Christopoulos, C. and Filiatrault, A. (2006) *Principle of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS Press, Pavia.
- Cimellaro, G.P. (2007) Simultaneous stiffness-damping optimization of structures with respect to acceleration, displacement and base shear. *Engineering Structures*, **29**, 2853–2870.

- Cimellaro, G.P. and Retamales, R. (2007) Optimal softening and damping design for buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, **14** (6), 831–857.
- Connor, J.J. and Klink, B.S.A. (1996) *Introduction to Motion-Based Design*, WIT Press.
- Connor, J.J., Wada, A., Iwata, M., and Huang, Y.H. (1997) Damage-controlled structures, I: preliminary design methodology for seismically active regions. *Journal of Structural Engineering*, **123** (4), 423–431.
- Constantinou, M.C. and Tadjbakhsh, I.G. (1983) Optimum design of a first story damping system. *Computers & Structures*, **17** (2), 305–310.
- de Silva, C.W. (1981) An algorithm for the optimal design of passive vibration controllers for flexible systems. *Journal of Sound and Vibration*, **75** (4), 495–502.
- de Silva, C.W. (ed.) (2007) *Vibration Damping, Control, and Design*, CRC Press.
- Fu, Y. and Kasai, K. (1998) Comparative study of frames using viscoelastic and viscous dampers. *Journal of Structural Engineering*, **124** (5), 513–522.
- Garcia, D.L. (2001) A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures. *Earthquake Spectra*, **17** (3), 387–398.
- Garcia, D.L. and Soong, T.T. (2002) Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures. *Journal of Structural Control*, **9** (1), 19–30.
- Gurgoze, M. and Muller, P.C. (1992) Optimal positioning of dampers in multi-body systems. *Journal of Sound and Vibration*, **158** (3), 517–530.
- Hahn, G.D. and Sathiyaveeswaran, K.R. (1992) Effects of added-damper distribution on the seismic response of buildings. *Computers & Structures*, **43** (5), 941–950.
- Hanson, R.D. and Soong, T.T. (2001) *Seismic Design with Supplemental Energy Dissipation Devices*, EERI, Oakland, CA.
- Housner, G.W., Masri, S.F., and Chassiakos, A.G. (eds) (1994) *Proceedings of 1st World Conference on Structural Control*, IASC, Los Angeles, CA.
- Housner, G., Bergmann, L.A., and Caughey, T.A. (1997) Structural control: past, present, and future (special issue). *Journal of Engineering Mechanics*, **123** (9), 897–971.
- Inaudi, J.A. and Kelly, J.M. (1993) Optimum damping in linear isolation systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **22**, 583–598.
- Johnson, E. and Smyth, A. (eds) (2006) *Proceedings of 4th World Conference on Structural Control and Monitoring (4WCSCM)*. IASC, San Diego, CA.
- Kasai, K., Fu, Y., and Watanebe, A. (1998) Passive control systems for seismic damage mitigation. *Journal of Structural Engineering*, **124** (5), 501–512.
- Kiu, W., Tong, M., Wu, Y., and Lee, G. (2004) Optimized damping device configuration design of a steel frame structure based on building performance indices. *Earthquake Spectra*, **20** (1), 6789.
- Kobori, T. (1996) Structural control for large earthquakes. Proceedings of IUTAM Symposium, Kyoto, Japan, pp. 3–28.
- Kobori, T., Inoue, Y., Seto, K. et al. (eds) (1998) *Proceedings of 2nd World Conference on Structural Control*, JohnWiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Lavan, O. and Levy, R. (2004) Optimal design of supplemental viscous dampers for linear framed structures. Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper no. 42.
- Lavan, O. and Levy, R. (2005) Optimal design of supplemental viscous dampers for irregular shear-frames in the presence of yielding. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **34** (8), 889–907.

- Lavan, O. and Levy, R. (2006a) Optimal design of supplemental viscous dampers for linear framed structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35** (3), 337–356.
- Lavan, O. and Levy, R. (2006b) Optimal peripheral drift control of 3D irregular framed structures using supplemental viscous dampers. *Journal of Earthquake Engineering*, **10** (6), 903–923.
- Levy, R. and Lavan, O. (2006) Fully stressed design of passive controllers in framed structures for seismic loadings. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **32** (6), 485–498.
- Liu, W., Tong, M., Wu, X., and Lee, G. (2003) Object-oriented modeling of structural analysis and design with application to damping device configuration. *Journal Computing in Civil Engineering*, **17** (2), 113–122.
- Liu, W., Tong, M., and Lee, G. (2005) Optimization methodology for damper configuration based on building performance indices. *Journal of Structural Engineering*, **131** (11), 1746–1756.
- Marano, G.C., Trentadue, F., and Chiaia, B. (2006) Stochastic reliability-based design criteria for linear structure subject to random vibrations. Proceedings of 8th BiennialASMEConference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA2006.
- Masri, S.F., Bekey, G.A., and Caughey, T.K. (1981) Optimum pulse control of flexible structures. *Journal of Applied Mechanics*, **48**, 619–626.
- Moreschi, L.M. (2000) Seismic design of energy dissipation systems for optimal structural performance. PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Palazzo, B., Petti, L., and De Iuliis, M. (2004) A modal approach to optimally place dampers in framed structures. Proceedings of 13thWorld Conference on Earthquake Engineering, paper no. 769.
- Paola, M.D. and Navarra, G. (2009) Stochastic seismic analysis of MDOF structures with nonlinear viscous dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, **16**, (3), 303–318.
- Park, J.-H., Kim, J., and Min, K.-W. (2004) Optimal design of added viscoelastic dampers and supporting braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **33** (4), 465–484.
- Rivin, E. (1999) *Stiffness and Damping in Mechanical Design*, Marcel Dekker Inc.
- Silvestri, S. and Trombetti, T. (2004) Optimal insertion of viscous dampers into shear-type structures: dissipative properties of the MPD system. Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper no. 473.
- Silvestri, S. and Trombetti, T. (2007) Physical and numerical approaches for the optimal insertion of seismic viscous dampers in shear-type structures. *Journal of Earthquake Engineering*, **11** (5), 787–828.
- Silvestri, S., Trombetti, T., and Ceccoli, C. (2003) Inserting the mass proportional damping (MPD) system in a concrete shear-type structure. *International Journal of Structural Engineering and Mechanics*, **16** (2), 177–193.
- Silvestri, S., Trombetti, T., and Ceccoli, C. (2004) Optimal insertion of viscous dampers into shear-type structures: performances and applicability of the MPD system. Proceedings of 13thWorld Conference on Earthquake Engineering, paper no. 477.
- Silvestri, S., Trombetti, T., and Gasparini, G. (2006) Effectiveness of inserting dampers between frames and lateral-resisting elements for the mitigation of the seismic effects.

- Proceedings of the 100th Anniversary Earthquake Conference Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake, EERI's Eighth U.S. National Conference on Earthquake Engineering (8NCEE).
- Singh, M.P. and Moreschi, L.M. (2001) Optimal seismic response control with dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **30** (4), 553–572.
- Singh, M.P. and Moreschi, L.M. (2002) Optimal placement of dampers for passive response control. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31** (4), 955–976.
- Soong, T.T. (1998) Structural control: impact on structural research in general. *Proceedings of 2nd World Conference on Structural Control*, Kobori, T., Inoue, Y., Seto, K. *et al.* (eds), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester 1, 5–14.
- Soong, T.T. and Constantinou, M.C. (2002) *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, Springer-Verlag.
- Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Srinivasan, A.V. and McFarland, D.M. (2000) *Smart Structures: Analysis and Design*, Cambridge University Press.
- Takewaki, I. (1997) Optimal damper placement for minimum transfer functions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **26** (11), 1113–1124.
- Takewaki, I. (1999) *Dynamic Structural Design: Inverse Problem Approach*, WIT Press.
- Takewaki, I. (2000) Optimal damper placement for planar building frames using transfer functions. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **20** (4), 280–287.
- Takewaki, I. (2006) *Critical Excitation Methods in Earthquake Engineering*, Elsevier Science, Amsterdam.
- Takewaki, I. and Yoshitomi, S. (1998) Effects of support stiffnesses on optimal damper placement for a planar building frame. *Journal of the Structural Design of Tall Buildings*, **7** (4), 323–336.
- Takewaki, I., Yoshitomi, S., Uetani, K., and Tsuji, M. (1999) Non-monotonic optimal damper placement via steepest direction search. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **28** (6), 655–670.
- Tan, P., Dyke, S.J., Richardson, A., and Abdullah, M. (2005) Integrated device placement and control design in civil structures using genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*, **131** (10), 1489–1496.
- Trombetti, T. and Silvestri, S. (2004) Added viscous dampers in shear-type structures: the effectiveness of mass proportional damping. *Journal of Earthquake Engineering*, **8** (2), 275–313.
- Trombetti, T. and Silvestri, S. (2006) On the modal damping ratios of shear-type structures equipped with Rayleigh damping systems. *Journal of Sound and Vibration*, **292** (1–2), 21–58.
- Trombetti, T. and Silvestri, S. (2007) Novel schemes for inserting seismic dampers in shear-type systems based upon the mass proportional component of the Rayleigh damping matrix. *Journal of Sound and Vibration*, **302** (3), 486–526.
- Tsuji, M. and Nakamura, T. (1996) Optimum viscous dampers for stiffness design of shear buildings. *Journal of the Structural Design of Tall Buildings*, **5**, 217–234.
- Uetani, K., Tsuji, M., and Takewaki, I. (2003) Application of optimum design method to practical building frames with viscous dampers and hysteretic dampers. *Engineering Structures*, **25** (5), 579–592.

- Viola, E. and Guidi, F. (2009) Influence of the supporting braces on the dynamic control of buildings with added viscous dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, **16**, (3), 267–286. DOI:10.1002/stc.234
- Wang, Y. and Dyke, S. (2008) Smart system design for a 3D base-isolated benchmark building. *Structural Control and Health Monitoring*, **30**, 939–957.
- Wongprasert, N. and Symans, M.D. (2004) Application of a genetic algorithm for optimal damper distribution within the nonlinear seismic benchmark building. *Journal of Engineering Mechanics*, **130** (4), 401–406.
- Xu, Z.D., Shen, Y.P., and Zhao, H.T. (2003) Asynthetic optimization analysis method on structures with viscoelastic dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**, 683–689.
- Xu, Z.D., Zhao, H.T., and Li, A.Q. (2004) Optimal analysis and experimental study on structures with viscoelastic dampers. *Journal of Sound and Vibration*, **273** (3), 607–618.
- Zhang, R.H. and Soong, T.T. (1992) Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications. *Journal of Structural Engineering*, **118** (5), 1375–1392.