

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

بهینه یابی در کنترل فعال سازه ها با استفاده از روش شبکه های
عصبی مصنوعی

محمد رضا توسلی

پایان نامه برای دریافت درجه دکترا
در رشته مهندسی عمران-زلزله

استاد راهنما: دکتر فریدون امینی
استاد مشاور: دکتر غلامرضا قدرتی امیری

تیر ۱۳۸۴

تقدیم به دو شمع روشنی بخش زندگیم،

پدر و مادرم

و

تقدیم به همسر عزیز و مهربانم

چکیده

در این تحقیق، روش جدیدی برای بهینه یابی نیروهای کنترل و تعداد کنترل گرها در یک سیستم کنترل حلقه باز- بسته ارائه شده است. در مواردی که تعداد محدودی کنترل گر در بعضی از طبقات یک سازه بکار برده میشوند، تعیین بهترین آرایش و موقعیت بهینه آنها در طبقات، بطوریکه منجر به بیشترین بهره وری، با صرف کمترین مقدار انرژی گردد، حایز اهمیت خواهد بود. در مطالعه حاضر، بررسی تعدادی سازه برشی تحت اثر تحریکات لرزه ای مختلف، به شاخص ساده ای برای تعیین اولویت مناسب طبقات برای جایگذاری کنترل گرها منتهی شده است. با معلوم بودن این اولویت ها، بهینه یابی نیروهای کنترل و تعداد کنترل گرها، می تواند به صورت یک مسأله بهینه سازی ریاضی مطرح شود.

در یک سیستم کنترل حلقه باز- بسته، اعمال نیروی کنترل، معادل ایجاد تغییراتی در ماتریسهای جرم، میرایی و سختی سازه و نیز بردار تحریک خارجی است. با فرض اینکه این تغییرات، خطی بوده و متناسب با مقادیر اولیه ماتریسها و بردار مذکور باشند، کمینه سازی نیروهای کنترل، به یافتن مقادیر بهینه برای ضرایب تناسب وابسته میگردد. این مسأله، با استفاده از روشهای عددی بهینه یابی قابل حل خواهد بود. کارایی روش پیشنهادی، با استفاده از مثالهای مختلف نشان داده شده است.

بهینه یابی تعداد کنترل گرها با استفاده از چنین روشی نیازمند عملیات وقت گیر سعی و خطا، تا رسیدن به جواب نهایی است. با استفاده از نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی، یک شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده است، بطوریکه با استفاده از این شبکه و با داشتن خصوصیات فیزیکی سازه و ویژگیهای تحریک لرزه ای، تعداد و موقعیت بهینه کنترل گرها در کوتاه ترین زمان و بدون نیاز به انجام سعی و خطا میتواند بدست آورده شود.

تقدیر و تشکر

قبل از هر چیز بر خود لازم می دانم تا از زحمات استاد ارجمندم جناب آقای دکتر فریدون امینی که در طول مدت انجام این پایان نامه و نیز قبل از آن در تمام مدت تحصیل در دانشگاه، همواره از راهنماییهای دلسوزانه و ارزشمند ایشان برخوردار بودم، صمیمانه تشکر نمایم. برای ایشان همواره آرزوی سلامتی و بهروزی دارم.

همچنین از تمام دوستانی که به نحوی در طی این راه یاریگرم بودند، بخصوص از دوستان گرامیم جناب آقای مهندس آرش اسدی خوانساری و جناب آقای مهندس حسین رحامی ممنون و سپاسگزارم.

و بالاخره از تمام کسانی که در طول سالهای تحصیل از کمک و زحمات بیدریغشان بهره مند بودم، از جمله معلمین و اساتید مهربانم، صمیمانه قدردانی می نمایم.

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ کنترل فعال سازه ها
۶	۲-۱ روشهای کنترل فعال
۱۱	۳-۱ تعریف مسأله
۱۴	فصل دوم: الگوریتم های کنترل فعال
۱۵	۱-۲ مقدمه
۱۵	۲-۲ پایداری و کنترل پذیری سیستم
۱۸	۳-۲ روش کنترل بهینه کلاسیک
۲۲	۴-۲ روش تخصیص قطبها
۲۳	۵-۲ روش کنترل بهینه لحظه ای
۲۷	۶-۲ روش کنترل فضای مستقل مودال
۲۹	۷-۲ سایر الگوریتم ها
۳۰	فصل سوم: بهینه یابی نیروهای کنترل
۳۱	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ مسأله بهینه یابی مقید چند متغیره
۳۶	۳-۳ روشهای تحلیلی بهینه یابی
۳۸	۱-۳-۳ روش تابع جریمه خارجی
۴۰	۲-۳-۳ روش ضرایب لاگرانژ افزوده
۴۴	۳-۳-۳ روش پاول
۴۶	۴-۳-۳ روش تقریب چند جمله ای
۴۸	۵-۳-۳ روش تحلیل مودال

فصل چهارم: بهینه‌یابی تعداد و مکان کنترل گرها

۴۹		
۵۰	مقدمه	۱-۴
۵۲	مکان‌یابی بهینه بر اساس شاخص بهره‌وری	۱-۱-۴
۵۳	مکان‌یابی بهینه بر اساس شاخص کنترل‌پذیری	۲-۱-۴
۵۸	مکان‌یابی بهینه بر اساس کمینه‌سازی توابع انتقال	۳-۱-۴
۵۹	مکان‌یابی بهینه بر اساس کنترل ناپیوسته	۴-۱-۴
۶۱	مکان‌یابی بهینه بر اساس الگوریتم ژنتیک	۵-۱-۴
۶۲	بهینه‌یابی مکان کنترل‌گرها بر اساس شاخص پیشنهادی	۲-۴
۶۶	بهینه‌یابی مکان کنترل‌گرها با استفاده از تحلیل مودال	۳-۴

فصل پنجم: کاربرد شبکه عصبی مصنوعی برای مکان‌یابی بهینه کنترل‌گرها

۶۸	مقدمه	۱-۵
۷۰	شبکه‌های عصبی مصنوعی	۲-۵
۷۹	استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای مکان‌یابی بهینه کنترل‌گرها	۳-۵

فصل ششم: مثالهای عددی

۹۳	بهینه‌یابی نیروهای کنترل	۱-۶
۹۳	مثال اول	۱-۱-۶
۹۶	مثال دوم	۲-۱-۶
۱۰۰	مثال سوم	۳-۱-۶
۱۰۳	بررسی نتایج	۴-۱-۶
۱۰۸	بهینه‌یابی تعداد و موقعیت کنترل‌گرها	۲-۶
۱۱۳	نمونه S1E1	۱-۲-۶
۱۱۳	نمونه S1E2	۲-۲-۶
۱۱۴	نمونه S1E3	۳-۲-۶
۱۱۴	نمونه S1E4	۴-۲-۶
۱۱۵	استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه‌یابی تعداد و موقعیت کنترل‌گرها	۳-۶
۱۱۷	بهینه‌یابی نیروهای کنترل و تعداد و موقعیت کنترل‌گرها در فضای مودال	۴-۶

فصل هفتم: نتیجه گیری

۱۲۱

۱-۷ جمع بندی

۱۲۲

۲-۷ خلاصه نتایج

۱۲۹

۳-۷ پیشنهاد برای کارهای بعدی

۱۳۱

مراجع

۱۳۲

فهرست اشکال

صفحه

عنوان شکل

۳	۱-۱) نمودار بلوکی سیستم کنترل فعال
۷	۱-۲) سیستم مهاربند فعال
۸	۱-۳) سیستم سختی متغیر فعال
۹	۱-۴) سیستم جرم-میراگر فعال
۳۹	۳-۱) الگوریتم روش تابع جریمه خارجی
۴۳	۳-۲) الگوریتم روش ضرایب لاگرانژ افزوده
۵۵	۴-۱) دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر طبقات
۶۲	۴-۲) نمایش عملیات قطع
۶۲	۴-۳) نمایش عملیات جهش
۷۱	۵-۱) مدل چند ورودی یک نرون
۷۲	۵-۲) تابع محرک خطی
۷۳	۵-۳) تابع محرک آستانه ای دو مقداره حدی
۷۳	۵-۴) تابع محرک لگاریتمی زیگموئید
۷۴	۵-۵) فرم ساده شده شبکه پیش خور با دو لایه میانی
۹۰	۵-۶) منحنی برازش داده شده بر زوج نقاط α و β
۹۴	۶-۱) منحنی پاسخهای تغییر مکان و سرعت سازه در دو حالت بدون کنترل و با کنترل ...
۹۵	۶-۲) منحنی پاسخ شتاب سازه در دو حالت بدون کنترل و با کنترل فعال در نقطه بهینه ...
۹۷	۶-۳) منحنی پاسخهای تغییر مکان و سرعت طبقه سوم در دو حالت بدون کنترل و با کنترل ...
۹۸	۶-۴) منحنی پاسخ شتاب طبقه سوم در دو حالت بدون کنترل و با کنترل فعال در نقطه بهینه ...
۹۹	۶-۵) منحنی نیروی کنترل فعال در طبقه اول و دوم
۱۰۱	۶-۶) منحنی پاسخهای تغییر مکان و سرعت طبقه دوازدهم در دو حالت بدون کنترل و با ...
۱۰۲	۶-۷) منحنی پاسخ شتاب طبقه دوازدهم در دو حالت بدون کنترل و با کنترل فعال در نقطه ...
۱۰۴	۶-۸-الف) منحنی نیروی کنترل فعال در مثال اول، محاسبه شده با دو روش پیشخوراند ...
۱۰۴	۶-۸-ب) منحنی نیروی کنترل فعال در مثال دوم، محاسبه شده با دو روش پیشخوراند...
۱۰۴	۶-۸-ج) منحنی نیروی کنترل فعال در مثال سوم، محاسبه شده با دو روش پیشخوراند...
۱۰۹	۶-۹) مدل سازه برشی پانزده طبقه

- ۱۱۰ (۶-۱۰) تغییر مکان طبقه اول، کنترل شده در دو حالت a و b
- ۱۱۱ (۶-۱۱) تغییر مکان طبقه پانزدهم، کنترل شده در دو حالت a و b

فهرست جداول

صفحه

عنوان جدول

- ۸۰ (۵-۱) خصوصیات فیزیکی نمونه‌های آنالیز شده
- ۸۱ (۵-۲) مشخصات سایر تحریک‌های لرزه‌ای
- ۸۲ (۵-۳) تعداد و محل بهینه کنترل‌گرها برای نمونه‌های آنالیز شده
- ۸۳ (۵-۴) بردار r_1 برای نمونه‌های آنالیز شده
- ۸۷ (۵-۵) مقادیر شکل مودال برای مدل‌های سازه ای S1 تا S6
- ۸۷ (۵-۶) مقادیر پارامترهای α و ρ برای مدل‌های سازه ای S1 تا S6
- ۸۸ (۵-۷) مقادیر پارامترهای ρ, γ, β و α برای مدل‌های سازه ای S1 تا S6
- ۸۹ (۵-۸) مشخصات فیزیکی نمونه‌های سازه ای T1 تا T7
- ۸۹ (۵-۹) مقادیر شکل بردار ارتعاش و تفاضل نسبی آن برای نمونه‌های T1 تا T7
- ۸۹ (۵-۱۰) مقادیر پارامترهای ρ, γ, β و α برای نمونه‌های T1 تا T7
- ۱۰۵ (۶-۱) تعداد دفعات حل معادله حالت برای مثال‌های دوم و سوم
- ۱۱۰ (۶-۲) مقادیر قدرمطلق حداکثر تغییر مکان‌های کلی و نسبی
- ۱۱۰ (۶-۳) حاصلضرب مقادیر قدرمطلق حداکثر تغییر مکان‌های کلی و نسبی به ترتیب نزولی
- ۱۱۲ (۶-۴) مقادیر حداکثر قدرمطلق تغییر مکان کلی و نسبی نمونه‌های S1E1, S1E2, S1E3 و ...
- ۱۱۲ (۶-۵) مقادیر شاخص مکان بهینه در طبقات مختلف برای نمونه‌های S1E1, S1E2, S1E3 و ...
- ۱۱۵ (۶-۶) مشخصات فیزیکی نمونه‌های آزمایشی
- ۱۱۶ (۶-۷) خروجی شبکه عصبی برای نمونه‌های آزمایشی و مقایسه با نتایج حاصل از حل مستقیم ...

مقدمه

۱-۱ کنترل فعال سازه ها

تفاوت عمده بین بارهای استاتیکی وارد بر یک سازه با بارهای دینامیکی طبیعی، در عدم ثبات و یکنواختی دسته دوم است. در واقع برای مقابله با بارهای دائم التغییر محیطی نظیر زلزله، باد یا امواج آب که دامنه و فرکانس آنها در هر لحظه از زمان تغییر میکنند، نیاز به یک سیستم نوین که بر خلاف روشهای سنتی صرفاً متکی به جرم و صلبیت سازه نباشد وجود دارد. به عبارت دیگر تا زمانی که نتوان خصوصیات حرکات لرزه ای را که به سازه وارد می شوند به درستی و دقت محاسبه کرد، کنترل پاسخهای سازه باید مبتنی بر دریافت این حرکات از پاسخهای خود سازه باشد. این موضوع مبنای ایده کنترل فعال سازه ها میباشد. بطور کلی پنج راه برای رسیدن به یک سازه با پاسخهای کنترل شده در برابر زلزله وجود دارد:

(۱) قطع مسیر انتقال انرژی حرکات زمین به سازه

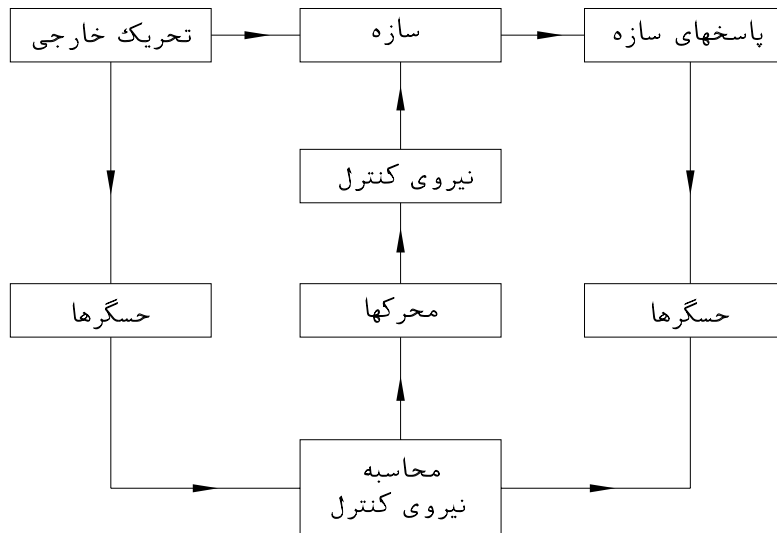
(۲) دور کردن فرکانس طبیعی سازه از محدوده فرکانسهای غالب حرکات زمین لرزه

(۳) رساندن سازه به رفتار نامانا و بدون تشدید با تأمین خصوصیات غیرخطی

(۴) استفاده از نیروی کنترل نظیر جرم - میراگر، جرم - راه انداز یا مهاربند

(۵) بکارگیری روشهای جذب و استهلاک انرژی

اگر روش (۱) برای انواع سازه ها قابل استفاده باشد دیگر نیازی به روشهای (۲) تا (۵) نخواهد بود، اما از آنجا که استفاده از این روش جز برای بعضی از انواع خاص از سازه ها بسیار مشکل میباشد، قاعده معمول برای حفظ سازه ها در برابر نیروهای مخرب زلزله، استفاده از ترکیبی از سایر روشها است. بهترین حالت این است که اعضای معمولی سازه، مقاومت لرزه ای آنها تأمین کنند و به هیچ گونه وسیله خاص دیگری نیاز نباشد، اما به دلیل اینکه پیش بینی خصوصیات حرکات لرزه ای زمین بنظر میرسد حتی در آینده هم غیرعملی باشد، تأمین کمک مصنوعی از طرف انسان برای کنترل فعال پاسخهای لرزه ای سازه لازم است. نمودار بلوکی یک سیستم کنترل فعال را به صورت شکل (۱-۱) میتوان نشان داد.



شکل (۱-۱) نمودار بلوکی سیستم کنترل فعال

این سیستم شامل اجزای اصلی زیر میباشد:

- حسگرهایی که در سازه قرار می‌گیرند تا نیروهای خارجی وارده یا پاسخهای سازه و یا هر دو را اندازه‌گیری کنند.
 - پردازشگری که مقادیر اندازه‌گیری شده را پردازش کرده و با توجه به آنها نیروی کنترل مورد نیاز را محاسبه میکند.
 - محرکها، که با استفاده از منبع انرژی خارجی تغذیه شده و نیروی کنترل محاسبه شده را به سازه اعمال میکنند.
- هرگاه در چنین سیستمی فقط مقادیر پاسخهای سازه اندازه‌گیری شوند، الگوریتم کنترل بکار رفته، بنام الگوریتم کنترل حلقه بسته نامیده میشود. از طرف دیگر هرگاه نیروی کنترل با توجه به اندازه‌گیری نیروهای خارجی محاسبه شود، الگوریتم کنترل، حلقه باز خواهد بود. در الگوریتم کنترل حلقه باز- بسته، پاسخهای سازه و نیز بارهای خارجی در هر لحظه اندازه‌گیری شده و در محاسبه نیروی کنترل بکار برده میشوند.

معادله تعادل دینامیکی چنین سیستمی بصورت رابطه (۱-۱) خواهد بود:

$$M.x(t) + C.x(t) + K.x(t) = D.u(t) + E.f(t) \quad (1-1)$$

که در آن M, C, K و به ترتیب ماتریسهای جرم، میرایی و سختی کل سازه و $x(t)$ بردار تغییر مکان آن و از مرتبه n میباشد. تعداد کل درجات آزادی فعال سازه است. همچنین بردارهای $f(t)$ از مرتبه r و $u(t)$ از مرتبه m ، به ترتیب شامل نیروهای خارجی وارد به سازه و نیروهای کنترل تولید شده توسط محرکها میباشد که موقعیت مکانی آنها به ترتیب توسط ماتریسهای $D_{(n \times m)}$ و $E_{(n \times r)}$ مشخص میگردد. بنابراین نیروی کنترل، $u(t)$ به صورت تابعی از جابجایی، سرعت و شتاب سازه و همچنین بار خارجی وارده در هر لحظه خواهد بود که در تئوری کنترل خطی با استفاده از ضرایب تناسب مربوطه به صورت زیر در نظر گرفته میشود:

$$u(t) = M_1.x(t) + C_1.x(t) + K_1.x(t) + E_1.f(t) \quad (1-2)$$

که با جایگذاری در معادله تعادل دینامیکی سازه کنترل شده، رابطه زیر حاصل می گردد:

$$(M - D.M_1)x(t) + (C - D.C_1)x(t) + (K - D.K_1)x(t) = (E + D.E_1)f(t) \quad (1-3)$$

به این ترتیب اثر کنترل فعال حلقه بسته در اصلاح مشخصات فیزیکی سیستم و اثر کنترل حلقه باز در اصلاح بار خارجی میباشد.

در مهندسی کنترل مدرن، فرمول بندی یک مسأله در فضای حالت (State Space) صورت می گیرد که در اینجا به شرح آن پرداخته میشود. رفتار بسیاری از سیستمها، شامل سیستمهای سازه ای را میتوان با یک دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه اول همزمان، به صورت زیر مدل نمود [۳]:

$$\dot{Z}(t) = g[Z(t), P(t), t] \quad (1-4)$$

که در آن t زمان، $Z(t)$ بردار تابع زمان و نشانگر حالت (State) سیستم و $P(t)$ بردار ورودی تحریک خارجی میباشد. در بعضی موارد، بردار ورودی به طرز مناسبی کنترل میگردد تا رفتار کل سیستم را بهبود بخشد. در سایر موارد، فقط تابعی از شرایط محیطی میباشد.

برای یک سیستم خطی که در آن پارامترهای سیستم تابعی از زمان نمی باشند، رابطه (۴-۱) را میتوان

بصورت زیر نوشت:

$$Z(t) = A.Z(t) + R.P(t) \quad (1-5)$$

که در آن A و R ماتریس های ثابت با ابعاد مناسب میباشند. رابطه (۵-۱) نشانگر دینامیک یک سیستم خطی نامتغیر با زمان در فضای حالت میباشد. در بسیاری از سیستمها، انتخاب بردار حالت با توجه به طبیعت فیزیکی سیستم انجام میگردد. بطور مثال هر گاه برای یک سازه با n درجه آزادی، معادله تعادل دینامیکی مطابق رابطه (۱-۱) باشد و بردار حالت $q(t)$ به صورت زیر انتخاب گردد،

$$q(t) = \begin{Bmatrix} x(t) \\ x(t) \end{Bmatrix} \quad (1-6)$$

در این صورت معادلات حالت را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$q(t) = A.q(t) + B.u(t) + H.f(t) \quad (1-7)$$

که در آن ماتریس A از مرتبه $2n \times 2n$ و به صورت زیر میباشد:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}.K & -M^{-1}.C \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

همچنین ماتریس B از مرتبه $2n \times m$ و نشان دهنده موقعیت مکانی نیروی کنترل در فضای حالت

میباشد که عبارت است از:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}.D \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

به طریق مشابه، ماتریس H از مرتبه $2n \times r$ و نشان دهنده موقعیت مکانی تحریک خارجی است:

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}.E \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

بدیهی است که سازه بدون سیستم کنترل فعال، حالت خاصی از بحث فوق بوده و در معادلات حالت،

جمله $B.u(t)$ حذف می‌گردد.

بنابراین معادلات حالت صورت دیگری از معادلات تعادل دینامیکی سازه می‌باشند. بزرگترین مزیت استفاده از معادلات حالت در مبحث کنترل سازه‌ها، تبدیل معادلات دیفرانسیل مرتبه دوم تعادل دینامیکی سازه به دسته‌ای از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول حالت می‌باشد که خود، سادگی حل و امکان مناسب‌تر برای شبیه‌سازی کامپیوتری و محاسبات عددی را به همراه دارد.

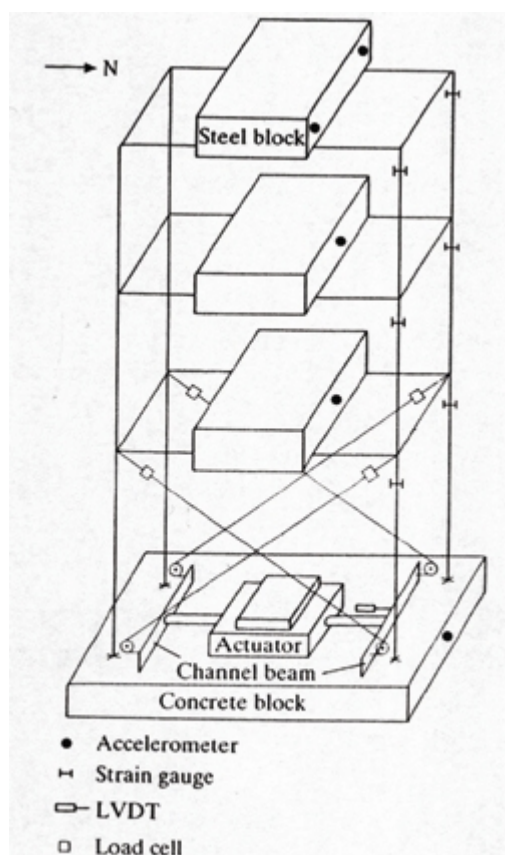
۲-۱ روشهای کنترل فعال

همچنانکه در قسمت قبل مطرح شد، کنترل فعال سازه‌ها مستلزم یک منبع انرژی خارجی است تا نیروی کنترل را در فواصل زمانی کوتاه و به میزان مورد نظر به سازه اعمال نماید. تاکنون در کارهای تحقیقاتی و کاربردهای عملی، روشهای مختلفی برای اعمال نیروی کنترل به سازه مطرح گردیده و یا مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از این روشها فقط در حد تحقیقات تئوری مورد مطالعه قرار گرفته و رفتار و عملکرد آنها صرفاً بر مبنای مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی کامپیوتری ارزیابی شده است. برای برخی دیگر، به موازات تحقیقات تئوری، مطالعات تجربی بر روی مدل‌های فیزیکی و آزمایشگاهی نیز انجام گرفته و منابع خطاهای عملی نظیر تأخیر زمانی (Time Delay) و یا اثرات محدود سازی تعداد درجات آزادی سازه در مدل‌های ریاضی (Spillover Effects)، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در دو دهه اخیر، ساختمانهایی در نقاط مختلف دنیا ساخته شده اند که مجهز به یکی از انواع روشهای کنترل فعال می‌باشند. در این قسمت، روشهای مختلف اعمال نیروی کنترل بطور خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد.

از ابتدای طرح ایده کنترل فعال در ساختمانها، اغلب محققین بر آن بودند تا از المانها و سیستم‌های سازه‌ای موجود و متداول برای اعمال نیروی کنترل بهره گرفته و با حداقل تجهیزات اضافی، سیستم کنترل فعال را بر روی سازه تعیبه نمایند. در این راستا از میان روشهای سنتی مقاوم سازی ساختمانها در برابر

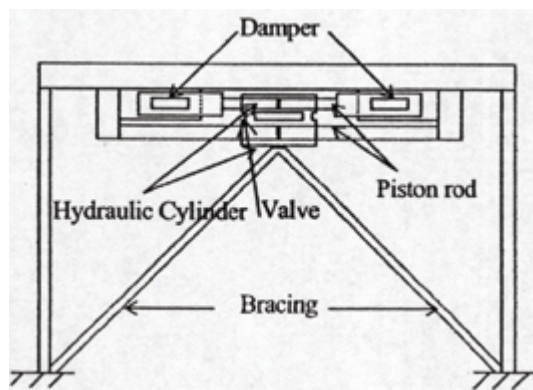
نیروهای جانبی، سیستم مهاربندی (Bracing System) مورد توجه واقع شد. یک راه ممکن بدین صورت بود که سیستم مهاربندی بصورت مجموعه ای از کابلهای پیش تنیده در نظر گرفته شود و میزان کشش آنها توسط محرکهایی کنترل شده و از این طریق نیروی کنترل به سازه اعمال گردد. این سیستم که به نام مهاربند فعال (Active Bracing System-ABS) شناخته میشود، درصد قابل توجهی از مطالعات تئوری و آزمایشگاهی را به خود اختصاص داده است. به نظر میرسد این سیستم برای مقاوم سازی یک سازه موجود نسبت به دیگر سیستم ها مناسبتر باشد.

سیستم مهار بند فعال بصورت تئوری برای استفاده در سازه های لاغر، ساختمانهای بلند، پلها و سازه های دریایی مورد مطالعه قرار گرفته و مدل های آزمایشگاهی بسیاری برای آن ساخته شده است. در شکل (۱-۲) مدلی آزمایشگاهی از یک سازه سه طبقه با سیستم مهاربند فعال بصورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) سیستم مهار بند فعال

بعدها بر مبنای این تفکر که با تغییر در سختی جانبی سازه، میتوان مشخصات ارتعاشی آن را تغییر داده و از بروز تشدید در اثر زلزله پیشگیری نمود، سیستم سختی متغیر فعال (Active Variable Stiffness-AVS) ابداع گردید. در شکل (۱-۳) مدلی از یک سیستم سختی متغیر فعال بطور شماتیک نشان داده شده است. بطوریکه در شکل ملاحظه میشود، سیستم مهاربند معمولاً بصورت V بوده و در محل تلاقی اعضای مهاربندی و زیر تیرها، تجهیزات مکانیکی نصب میگردد تا سختی جانبی سازه را متناسب با اثر زلزله تغییر داده و به عبارت دیگر نوعی رفتار غیر خطی مصنوعی به سازه ببخشد. کاربرد عملی این سیستم تا به امروز فقط در مورد یک ساختمان پنج طبقه گزارش شده است [۴].

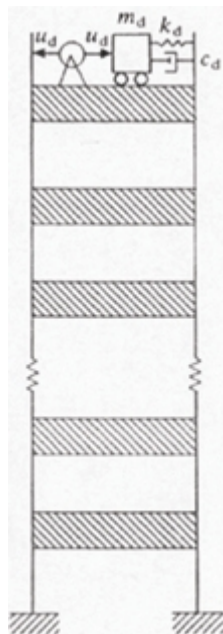


شکل (۱-۳) سیستم سختی متغیر فعال

همچنین از میان روشهای مدرن کنترل غیر فعال سازه ها، سیستم جرم - میراگر تنظیم شده (Tuned Mass Damper-TMD) که کنترل ارتعاشات سازه را در مود اول و بدون نیاز به انرژی خارجی بر عهده داشت و در مواردی نیز با موفقیت بکار گرفته شده بود، جلب توجه نمود و محققین بر آن شدند تا نیروی کنترل را با استفاده از دستگاههای محرک به جرم مذکور اعمال نمایند. نتیجه این تفکر، ابداع سیستمهایی بود که امروزه به نامهای جرم - میراگر فعال (Active Mass Damper-AMD)، جرم - راه انداز فعال (Active Mass Driver-AMD) و جرم - میراگر تنظیم شده فعال (Active Tuned Mass Damper)

شناخته میشوند [۴-۷].

سیستم جرم-میراگر فعال از نظر زمانی بعد از سیستم مهاربند فعال مطرح گردید ولی تا به امروز کارهای تحقیقاتی زیادی در ارتباط با این سیستم چه به صورت تئوری و چه بر روی مدل‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. همچنین این سیستم بیشترین سهم کاربرد عملی را در ساختمانها در سالهای اخیر به خود اختصاص داده است. در این سیستم یک جرم بزرگ که معمولاً از فلز یا بتن ساخته میشود در یکی از طبقات ساختمان نصب گردیده و از طریق فنرها و میراگرهایی با میزان سختی و میرایی مشخص به سازه متصل میشود. این جرم حدود ۱ الی ۴ درصد جرم مودی سازه میباشد. جرمهای بزرگتر از ۴۰۰ تن در این شرایط نامتعارف نیستند. این جرم قادر است روی یک سطح صاف و یا بر روی ریلهایی با اصطکاک ناچیز بلغزد. دستگاه محرک در تراز همان طبقه و یا طبقات مجاور نصب گردیده و با دستور پردازشگر در هر لحظه، نیروی کنترل را به جرم مذکور و عکس العمل آنرا به سازه وارد میسازد و از این طریق ارتعاشات سازه کنترل میشود. سیستم جرم-میراگر فعال، در اغلب کاربردهای عملی در تراز طبقه فوقانی ساختمان نصب می‌گردد. در شکل (۴-۱) این سیستم بطور شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) سیستم جرم میراگر فعال