

به نام یگانه پاسدار حق



دانشگاه اراک

دانشکده فنی و مهندسی

کارشناسی ارشد مکترونیک

طراحی و پیاده سازی یک کنترل کننده فعال برای یک سازه تحت

تحریک بار لرزه ای

پژوهشگر

حسنعلی بهرامی

اساتید راهنما

دکتر مهدی سلیمانی

دکتر مهدی موسوی

تابستان ۹۳

به نام خدا

طراحی و پیاده سازی کنترل کننده فعال برای سازه تحت  
تحریک بار لرزه ای

توسط

حسنعلی بهرامی

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه

کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکترونیک

از

دانشگاه اراک

اراک-ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه :

دکتر مهدی سلیمانی (استاد راهنما)..... استادیار

دکتر سید مهدی موسوی (استاد راهنما)..... استادیار

دکتر امیرحسین ابوالمعصومی (استاد مشاور)..... استادیار

دکتر حسن جلالی (استاد داور)..... استادیار

تابستان 1393

این پژوهش را به خانواده عزیزم تقدیم می‌کنم  
که با صبر و تحمل و غم فراق، همواره پشتیبان من بودند.

## مشکر و قدر دانی

(ویر کیم ویه علمم الکتاب و الحکمہ)

نهایت تقدیر و مشکر شایسته نثار آقای دکتر مهدی سلیمانی، استاد راهنمای فریخته

که گلشن سرای علم و دانش را بار راهنمایی های کار ساز و سازنده بار و ساختند و مرا صمیمانه

و مشفقانه یاری داده و از هیچ گلی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و بهنچنین از آقای

دکتر مهدی موسوی نهایت مشکر را دارم.

بسی شایسته است که از آقای دکتر ابوالمعمومی که همواره مشاور و راهگشای

اینجانب در اتمام و اكمال پایان نامه بوده است تقدیر و مشکر کنم.

بهنچنین از آقای دکتر حسن جلالی که داوری این پایان نامه را عمده دار بودند

کمال سپاسگذاری را دارم.

## چکیده

از آنجایی که ایمنی سازه‌ها در برابر زلزله و نیروهای باد یکی از نگران‌های اصلی برای مهندسين در ساخت سازه‌های بلند می‌باشد، بنابراین بایستی توجه ویژه‌ای به حفاظت از این گونه ساختمان‌ها در برابر اثرات مخرب باد و زلزله داشت. یکی از روش‌های متداول جهت کاهش پاسخ‌های ناخوشایند تحت بارهای غیر منتظره زلزله و باد استفاده از میراگر جرمی فعال<sup>1</sup> می‌باشد. یکی از الزامات طراحی ایمن سازه‌ها، پیش‌بینی رفتار آن‌ها در برابر تحریکات خارجی چون زمین لرزه است. این امر می‌تواند از طریق اندازه‌گیری پاسخ سازه به ازای تحریکات خارجی محقق شود. مسلماً در خصوص سازه‌های ساختمانی امکان سعی و خطا و انجام آزمایش بر روی سازه واقعی در شرایط واقعی وقوع زمین لرزه وجود ندارد. بنابراین، راه حل منطقی، شبیه‌سازی شرایط وقوع زمین لرزه برای سازه واقعی یا مدلی برگرفته از سازه اصلی است. البته اینکه پس از ساخت یک ساختمان در مقیاس واقعی به بررسی پاسخ آن در برابر ورودی‌هایی مانند باد یا زلزله پرداخته شود مستلزم هزینه‌های بالا است و مقرون به صرفه نیست. از این رو بهتر آن است که پیش از ساخت چنین سازه‌هایی یک مدل از آن ساخته شود و در سطح آزمایشگاهی به بررسی آن پرداخت. میز لرزه یکی از ابزارهای مفید و موثر در مطالعات مربوط به سازه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. امروزه با ساختن میزهای شبیه ساز زلزله مسئله کنترل سازه‌های

---

<sup>1</sup> Active mass driver

آزمایشگاهی مورد توجه بسیاری از مهندسين کنترل قرار گرفته است. به همين منظور ابتدا يك مدل ۱۰ طبقه واقعي در اجزا محدود مدل شده است، وسپس از طريق تكنيك کاهش مرتبه به مدل دو درجه قابل ساخت آزمایشگاهی تبديل شده است. پس از ساخت مدل، طراحی و پياده سازی کنترل کننده فعال بر روی سازه دو درجه مدل شده تحت تحريك بار لرزه‌ای شبیه‌سازی شده با ميز لرزه انجام شده است. سيستم کنترل فعال بر روی طبقه دوم از سازه نصب شده است. در اين تحقيق از تكنيك پردازش تصوير برای اندازه گيري جابجایی طبقات استفاده شده است. همچنين کنترل کننده های فازی ژنتيك و مد لغزشی برای کنترل جابجایی طبقه دوم از سازه طراحی و بر روی سازه پياده‌سازی شده است. نتايج پياده‌سازی نشان از عملکرد بهتر کنترل کننده مد لغزشی نسبت به کنترل کننده فازی ژنتيك دارد.

کلید واژه ها: ميز شبیه ساز زلزله ،میراگر جرمی فعال ،کنترل کننده فازی ژنتيك ،

پردازش تصوير ،کنترل کننده مد لغزشی

## فهرست

### فصل اول

#### فصل ۱ مقدمه

- ۱-۱- تعریف مساله ..... ۲
- ۲-۱- مروری بر کارهای گذشته در زمینه کنترل فعال سازه ..... ۳
- ۳-۱- مراحل انجام تحقیق ..... ۱۲

#### فصل ۲ مدل سازی

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۴
- ۲-۲- طراحی قاب ده طبقه در متلب ..... ۱۴
- ۳-۲- اعتبار سنجی مدل ..... ۱۶
- ۴-۲- نتایج بدست آمده از روش ITD ..... ۱۷
- ۵-۲- نتایج حاصل از تست با دامنه بالا ..... ۱۸

#### فصل ۳ طراحی سیستم ATMD

- ۱-۳- مقدمه ..... ۲۰
- ۱-۳-۱- مزایای سیستم‌های کنترل فعال ..... ۲۱
- ۲-۳-۱- پیکربندی و ساختار یک سیستم کنترل فعال ..... ۲۲
- ۲-۳-۲- اجزای سیستم AMD طراحی شده ..... ۲۳
- ۱-۳-۲- محرکه الکتریکی ..... ۲۳
- ۳-۳- سیستم مکانیکی AMD ..... ۲۵
- ۱-۳-۳- محاسبات مربوط به چرخ‌دنده شانه‌ای ..... ۲۶
- ۴-۳- سنسورها و مدار کنترلی ..... ۲۸
- ۱-۴-۳- مدار کنترل جهت محرکه ..... ۲۸
- ۲-۴-۳- کنترل جریان محرکه ..... ۳۰
- ۵-۳- اندازه‌گیری جابجایی سازه با پردازش تصویر ..... ۳۲

#### فصل طراحی و پیاده سازی کنترل کننده ها ..... ۳۶

- ۱-۴- مقدمه ..... ۳۷
- ۲-۴- طراحی کنترل کننده فازی ..... ۳۸
- ۳-۴- طراحی کنترل کننده فازی ..... ۳۹



- ۴-۴-بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک..... ۴۱
- ۴-۵-کنترل کننده مد لغزشی..... ۴۴
- ۴-۶-طراحی کنترلر مد لغزشی برای سازه دو درجه آزادی ..... ۵۱
- ۴-۷-طراحی کنترل کننده PID..... ۵۴
- ۴-۷-۱-طراحی PI برای کنترلر جریان [36]..... ۵۵
- ۴-۷-۲-مراحل اجرای کار برای پیدا کردن پارامترهای PID..... ۵۶
- ۴-۸-پیاده سازی کنترل کننده‌ها..... ۵۶

## فصل ۵ نتایج حاصل از پیاده سازی کنترل کننده ها بر روی سیستم ATMD

- ۵-۱-بخش اول ..... ۶۲
- ۵-۲-بخش دوم..... ۶۳
- ۵-۲-۱-مقایسه نتایج حاصل از کنترل کننده غیر فعال (TMD) با کنترل کننده فعال مد لغزشی ۶۴
- ۵-۲-۲-مقایسه کنترل کننده فعال مد لغزشی با TMD..... ۶۶
- ۵-۲-۳-بررسی عملکرد کنترل کننده‌ها در برابر عدم قطعیت پارامتری ..... ۶۸

## فصل ۶ نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد

- ۶-۱-نتیجه‌گیری..... ۷۱
- ۶-۲-پیشنهاد هایی برای ادامه کار..... ۷۲

## فهرست شکل

- شکل ۱-۱: نمودار اجمالی از سیستم کنترل فعال ..... ۴
- شکل ۱-۲: شماتیکی از سیستم کنترل فعال سازه، اجرا شده توسط یانگ و هونینگ ..... ۶
- شکل ۱-۳: جذب کننده ارتعاش ..... شکل ۱-۴: چرخ دنده هلیکال و گیره ..... ۸
- شکل ۱-۵: سیستم فعال جذب کننده ارتعاشات دینامیکی ساخته شده توسط لادیپو واسمیل ..... ۹
- شکل ۱-۶: اجرای کنترل کننده فعال بر روی سازه دو درجه آزادی توسط لادیپو واسمیل ..... ۹
- شکل ۱-۷: میز لرزه هیدرولیکی همراه با سازه مجهز به سیستم کنترل فعال ..... ۱۰
- شکل ۱-۸: اتصال سنسور های وایرلس به کنترلر برای کنترل فعال سازه ..... ۱۱
- 
- شکل ۲-۱: مدل ۱۰ طبقه پیاده سازی شده در متلب ..... ۱۵
- شکل ۲-۲: مدل دو درجه ساخته شده ..... ۱۶
- شکل ۲-۳: نمودار شکل مود برای حالت عددی و آزمایشگاهی ..... ۱۷
- شکل ۲-۴: بررسی خطی یا غیر خطی بودن سازه ..... ۱۸
- شکل ۲-۵: چرخ دنده شانه‌ای ..... ۲۷
- 
- شکل ۳-۱: بلوک دیاگرام از نوع روش کنترلی پسخور و پیش خور ..... ۲۱
- شکل ۳-۲: تجهیزات مورد نیاز در الگوریتم کنترلی مدار باز- بسته ..... ۲۲
- شکل ۳-۳: موتور ۱۲ ولت دی سی آهنربای دائم استفاده شده به عنوان محرکه الکتریکی [26] ..... ۲۵
- شکل ۳-۴: سیستم کنترل فعال طراحی شده ..... ۲۶
- شکل ۳-۵: شماتیک کلی از مدار کنترل دور موتور  $dc$  [27] ..... ۲۸
- شکل ۳-۶: نمایی از عملکرد سنسور  $CNY70$  [۲۸] ..... ۲۹
- شکل ۳-۷: کارت اخذ اطلاعات مدل  $pci1716$  ..... ۳۰
- شکل ۳-۸: بلوک دیاگرام کلی از کنترل جریان موتور ..... ۳۱
- شکل ۳-۹: دیاگرام کلی از پیاده سازی کنترل کننده ها ..... ۳۲
- شکل ۳-۱۰:  $A4TECH WEBCAM 30F mini$  ..... ۳۴
- 
- شکل ۴-۱: سازه در ۴ فاز مختلف ..... ۳۹
- شکل ۴-۲: توابع تعلق اولیه (A) توابع تعلق جابجایی (B) توابع تعلق سرعت (C) توابع تعلق نیرو ..... ۴۱
- شکل ۴-۳: جدول پارتو بدست آمده از بهینه سازی ..... ۴۳
- شکل ۴-۴: توابع تعلق بهینه (A) توابع تعلق جابجایی (B) توابع تعلق سرعت (C) توابع تعلق خروجی ..... ۴۴
- شکل ۴-۵: صفحه فاز در کنترل مد لغزشی ..... ۴۵

- شکل ۴-۶: شرط لغزشی ..... ۴۷
- شکل ۴-۷: تعبیر ترسیمی معادلات (۲-۴) و (۴-۴) ..... ۴۸
- شکل ۴-۸: لرزش ناشی از سوئیچینگ سرعت ناقص ..... ۴۹
- شکل ۴-۹: فرآیند کنترل توسط PID ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۰: شماتیک کلی از پیاده سازی کنترل کننده ها ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۱: پیاده سازی کنترل کننده مد لغزشی در لبویو ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۲: پیاده سازی کنترل کننده مد لغزشی در لبویو ..... ۵۹
- شکل ۵-۱: پاسخ طبقه دوم تحت ورودی هارمونیک (A) فرکانس ۰,۹ هرتز و طول پاندول ۳۱,۸ ..... ۶۳
- شکل ۵-۲: پاسخ طبقه دوم تحت ورودی هارمونیک (A) فرکانس ۰,۹ هرتز و طول پاندول ۴,۷ (B) فرکانس ۲,۳ هرتز و طول پاندول ۳۱,۸ ..... ۶۳
- شکل ۵-۳: نمودار جابجایی طبقه دوم برای زلزله چالفانت (A) جابجایی طبقه دوم (B) RMS خطای جابجایی طبقه دوم ..... ۶۴
- شکل ۵-۴: نمودار برش پایه برای زلزله چالفانت (A) پاسخ برش پایه (B) RMS خطای برش پایه ..... ۶۵
- شکل ۵-۵: نمودار جابجایی نسبی طبقه دوم برای زلزله چالفانت (A) جابجایی نسبی طبقه دوم (B) RMS خطای جابجایی نسبی طبقه دوم ..... ۶۵
- شکل ۵-۶: پاسخ طبقه دوم و RMS طبقه دوم برای زلزله چالفانت (A) جابجایی (B) RMS خطای جابجایی ..... ۶۶
- شکل ۵-۷: پاسخ برش پایه همراه با میزان RMS خطا برای زلزله چالفانت (A) برش پایه (B) RMS برش پایه ..... ۶۷
- شکل ۵-۸: ماکزیمم جابجایی نسبی و RMS خطا جابجایی نسبی برای زلزله چالفانت (A) جابجایی نسبی (B) RMS جابجایی نسبی ..... ۶۷
- شکل ۵-۹: پاسخ طبقه دوم و RMS طبقه دوم برای حالت عدم قطعیت برای زلزله چالفانت (A) عدم قطعیت در جرم طبقات (عدم قطعیت در سختی  $k_1$ ) ..... ۶۹

## فهرست جداول

- جدول ۱: مشخصات اجزای سیستم فعال جذب کننده ارتعاشات دینامیکی ..... ۹
- جدول ۲-۱: مشخصات ستون و تیر قاب ده طبقه ..... ۱۵
- جدول ۲-۲: مشخصات مدل دو درجه ساخته شده ..... ۱۶
- جدول ۲-۳: نتایج شبیه سازی و تست برای فرکانس های اول و دوم ..... ۱۷

جدول ۳- ۱: مشخصات محرکه سیستم AMD..... ۲۵

جدول ۴- ۱: عبارات به کار برده شده برای کنترل کننده فازی..... ۴۰

جدول ۴- ۲: قوائد اگر آنگاه فازی..... ۴۰

جدول ۵- ۱: اطلاعات زلزله چالفانت..... ۶۱

### پیوست

پردازش تصویر..... ۷۷

### منابع

منابع..... ۸۲

# فصل ١

مقدمه

پاسخ‌های حاصل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری سازه‌ها به دلیل پیچیدگی‌های آن و گاه ساده‌سازی‌هایی که انجام می‌شود با واقعیت متفاوت بوده، و امکان بررسی عملکرد سیستم‌های کنترل فعال سازه بر روی سازه‌های واقعی به دلیل هزینه‌بر بودن و محاسبات پیچیده آن وجود ندارد. از این رو بهتر است، برای مطالعه‌ی رفتارهای سازه، نمونه‌ای آزمایشگاهی از یک سازه واقعی ساخته‌شود. برای تحقق این امر نیازمند میز شبیه‌ساز زلزله می‌باشیم. میزهای شبیه‌ساز لرزه با قابلیت شبیه‌سازی ورودی‌های زلزله این امکان را در اختیار مهندسين قرار می‌دهند تا پیش از ساخت سازه‌ی مورد نظر خود در مقیاس واقعی، مدل مربوطه را ساخته و با آزمایش آن بر روی میز لرزه<sup>۱</sup> به بررسی پاسخ آن تحت ورودی زلزله بپردازند. خوشبختانه با ساخته شدن میز شبیه‌ساز زلزله در دانشگاه اراک (میز لرزا) این امکان برای مهندسين عمران و مکاترونیک فراهم شده‌است تا با ساختن مدل‌های مختلف از سازه‌های واقعی و مشخص کردن معادلات آن و تطابق با سازه‌های واقعی، پاسخ‌های سازه تحت تحریک زلزله‌ها و امواج گوناگون را که توسط میز شبیه‌ساز زلزله ایجاد می‌شود مورد بحث و بررسی قرار دهند. بر همین اساس در این پایان‌نامه ابتدا یک مدل ده-طبقه در اجزا محدود مدل شده است و سپس با استفاده از روش کاهش مرتبه ماتریس‌های جرم و سختی مدل دو طبقه آزمایشگاهی متناسب با فرکانس‌ها و شکل مودهای سازه واقعی بدست آمده‌است. پس از آنالیز عددی مدل، مدل از ورقه‌ها و صفحه‌های متناسب با داده‌های عددی ساخته شد. پس از ساخت مدل جهت اطمینان از صحت و تطابق فرکانسهای طبیعی و مود شیپ‌های مدل ساخته شده با فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای بدست آمده از روش اجزا محدود، از روش آنالیز مدال فرکانس‌ها و شکل مودهای مدل را

---

1 Shaking table

بدست آورده‌ایم، که نتایج روش آنالیز مدال نشان از تطابق فرکانس‌ها و مود شیپ‌های مدل ساخته شده با مدل اجزا محدود داشت. پس از پایان یافتن ساخت مدل، میراگر جرمی فعال<sup>۱</sup> با هدف کاهش جابجایی طبقه دوم مدل تحت تحریک بار لرزه‌ای بر روی طبقه دوم از مدل نصب شد. میراگر نصب شده شامل یک محرکه<sup>۲</sup> الکتریکی، ریل رفت و برگشتی و چرخ دنده شانه‌ای می‌باشد. طراحی به گونه‌ای می‌باشد که موتور بر روی ریل نصب می‌باشد و چرخ دنده شانه‌ای حرکت دورانی موتور را به حرکت خطی تبدیل می‌کند. موتور با حرکت افقی خود بر روی طبقه دوم از سازه نیروی کنترلی خود را در خلاف جهت حرکت خود (طبق قانون گشتاور) وارد می‌نماید. نکته قابل ذکر در این تحقیق استفاده از روش پردازش تصویر برای اندازه‌گیری جابجایی طبقات می‌باشد. کنترل کننده‌های پیاده‌سازی شده در این پایان نامه کنترل کننده فازی، فازی بهینه، کنترل کننده مد لغزش می‌باشد. کنترل کننده‌های مورد نظر به کمک نرم افزار لب ویو طراحی و کارت اخذ اطلاعات<sup>۳</sup> پیاده‌سازی می‌گردند. پس از پیاده‌سازی کنترل کننده‌ها نتایج تست آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۱-۲- مروری بر کارهای گذشته در زمینه کنترل فعال سازه

پس از معرفی سیستم‌های غیر فعال، مینایی به پژوهش درباره تئوری سازه‌های هوشمند فعال که قادر به ایجاد یک پاسخ کنترل شده برای تحمل بارهای زلزله هستند، پرداخت. همچنین نوردل نیز استفاده از سیستم‌های فعال برای کاهش پاسخ ارتعاشی سازه در جهت جلوگیری از هرگونه بارگذاری اضافی استثنایی پیشنهاد کرد [۱]. تا زمانی که یائو تئوری کنترل را بر مبنای کنترل سازه‌ای مطرح نکرده بود هیچگونه تحقیقات جمعی و اصولی بر روی کنترل فعال سازه‌ها تا سال ۱۹۷۲ صورت نگرفته بود، به طوری که در

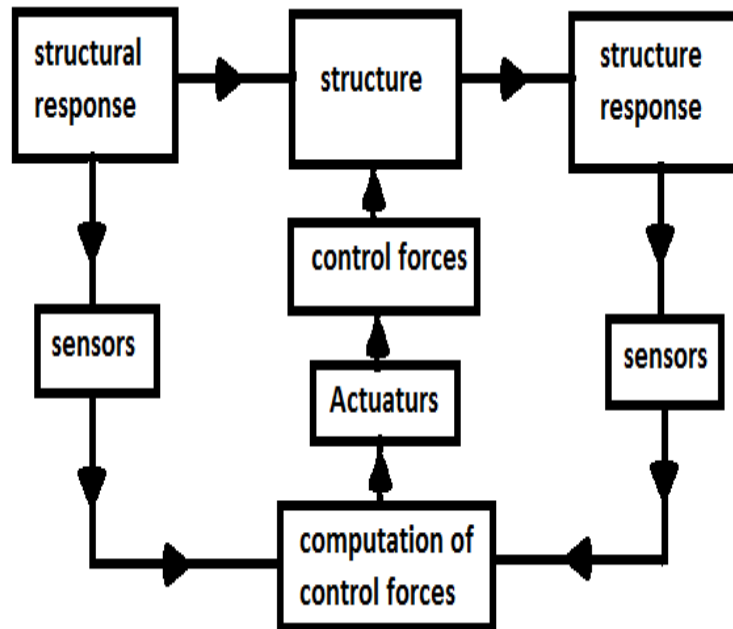
---

1 Active mass driver (AMD)

2 Actuator

3 data acquisition card

تحقیقات یائو [۲] و نشریه‌های پس از آن، پیکربندی اساسی یک سیستم کنترل فعال به طور خلاصه همانند شکل (۱-۱) زیر نمایش داده شده‌است.



شکل ۱-۱: نمودار اجمالی از سیستم کنترل فعال

در این میان اولین ساختمان با تکنولوژی کنترل فعال توسط کئوباشی تجهیز شد [۳] پس از آن مطالعات متعددی در سالهای اخیر بر روی AMD انجام شده که هدف اصلی تمامی آنها طراحی کنترل کننده جهت تعیین نیروی محرک در کاهش اختلالات در سازه می‌باشد به طوری که می‌توان از مطالعات انجام شده توسط سونگ برای ارائه یک نگرش شگرف و

کلی در مورد سیستمهای کنترل فعال توسعه یافته تا سال ۱۹۹۶ نام برد [۱۰۴]

در زیر به چند نمونه از کارهای انجام شده در زمینه کنترل فعال اشاره شده‌است.



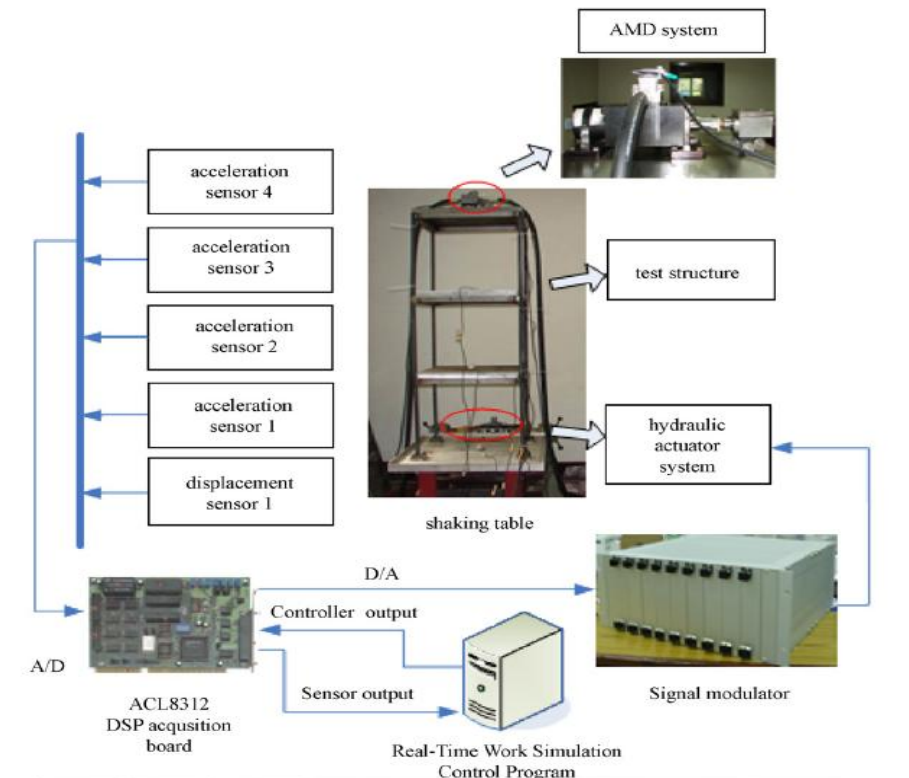
شماره	نام محقق	موضوع مورد مطالعه	زمان تحقیق
۱	ژنگ وراسل [۵]	طراحی کنترل کننده فعال با استفاده از روش رگلاتور خطی درجه دوم <sup>۱</sup> در برابر تحریک باد	۱۹۹۶
۲	یاگیز ، نورکان [۶]	روش کنترل مد لغزشی <sup>۲</sup> برای کنترل ارتعاش یک سیستم ۳ درجه آزادی که با میراگر جرمی تنظیم شده فعال مجهز شده است	۱۹۹۹
۳	بیژن ، محمد [۷]	طراحی یک کنترل کننده فعال براساس روش LQR برای ساختمان ۵ طبقه مرجع تحت تحریک زلزله	۲۰۰۱
۴	بیژن ، محمد [۸]	بررسی یک ساختمان ۷۶ طبقه مرجع در برابر باد شبیه سازی شده در آزمایشگاه تونل باد در سیدنی استرالیا و طراحی کنترل کننده فعال فازی و مقایسه نتایج با روش LQR	۲۰۰۴
۵	چوی و همکاران [۹]	کنترل فعال یک سازه ۶ طبقه با استفاده از جکهای هیدرولیکی در برابر زلزله به روش مودال فازی <sup>۳</sup>	۲۰۰۳
۶	یاکوت [۱۰]	روش فازی لغزشی حالت کنترل (FSMC)، که یکی از الگوریتم های کنترل فعال برای سیستم های غیر خطی می باشد، برای جداسازی لرزه ای سازه تحریک شده تحت زلزله	۲۰۰۵
۷	کوما ، پونام [۱۱]	طراحی کنترل کننده فعال بر اساس الگوریتم درجه دوم خطی جهت بهینه سازی برای تحریک زلزله السنترو	۲۰۰۵
۸	پورزینلی ، لواسانی ، مدارائی [۱۲]	بررسی یک سازه واقعی ۱۱ طبقه در رشت با استفاده از روش کنترل فعال با منطق فازی	۲۰۰۷
۹	زائو ، زینگ [۱۳]	استفاده از میراگرهای مغناطیسی <sup>۱</sup> (MR) در یک سازه تحت تحریک زلزله با استراتژی کنترل on و off	۲۰۰۸

<sup>۱</sup> linear quadratic Gaussian

<sup>۲</sup> Sliding mode control

<sup>۳</sup> Fuzzy logic modal

یانگ ، هونینگ: کنترل بر اساس اصل انتصاب قطب را مورد بررسی قرار دادند. سیستم مورد بررسی یک سازه سه طبقه می باشد، که بر روی یک میز لرزه فیکس شده است. این سازه شامل محرک هیدرولیکی می باشد. شکل (۱-۲) شماتیکی از سیستم طراحی شده توسط یانگ و هونینگ را نمایش می دهد. [۱۴]



شکل ۱-۲: شماتیکی از سیستم کنترل فعال سازه ، اجرا شده توسط یانگ و هونینگ

دیوید ، راسل: بررسی یک ساختمان مرجع ۳ طبقه با مقیاس بزرگ تحت تحریک زلزله<sup>۱</sup> السنترو با بکارگیری از منطق فازی و بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک چند هدفه<sup>۲</sup> در میراگرهای مغناطیسی [۱۵]

چن ، یانگ ، ونلوک: از روش فرکانس بی نهایت<sup>۳</sup> برای کنترل ارتعاشات ناشی از تحریک زلزله استفاده کردند. بر اساس مساله کنترل  $H_{\infty}$ ، به کنترل سازه در حوزه فرکانس بی

<sup>۱</sup> Magnetorheological

<sup>۲</sup> H-infinity

نهایت می‌پردازد. هدف از طراحی کنترلر تضمین پایداری سیستم حلقه بسته<sup>۱</sup> و کاهش اختلال از تحریک زمین لرزه می‌باشد [۱۶]

چانکینک ، جینجا: یک روش بهینه جدید برای کنترل میراگر جرم چندگانه تنظیم‌شده فعال<sup>۲</sup> برای جلوگیری از ارتعاش ساختمان‌های بلند تحت اثر باد ارائه کرده‌اند. یک مدل  $n$  طبقه با سیستم MATMD<sup>۳</sup> و یک روش بهینه سازی مشترک برای بدست آوردن بازخورد حالت افزایش کنترل بهینه و همچنین بدست آوردن پارامترهای سیستم MATMD به کار گرفته‌اند. ترکیبی از سه روش کنترلی  $H_2/H_\infty$  /  $GH_2$  برای کاهش ارتعاشات لرزه‌ای ساختمان ناشی از باد، که محدودیت‌های نیروی محرک و نیز ضربه ناشی از توده جرم در نظر گرفته‌شده، به کار می‌رود. [۱۷]

فلاح ، ابراهیمی: روش کنترل ناظر<sup>۴</sup> به همراه عملگرهای پیزوالکتریک<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار دادند . مدل سه بعدی شامل دو جهت افقی و یک جهت چرخش عمودی در نظر گرفته شده است. محرک پیزوالکتریک در پایین ستون و نیروهای کنترل شده توسط محرک‌ها در معادلات حرکت ساختمان در نظر گرفته شده‌است. روش‌های کنترلی رگولاتور خطی درجه دوم (LQR) ، کنترل فازی ناظر (SFC) و کنترل کننده منطق فازی (FLC) استفاده شده است [۱۸]

---

<sup>۱</sup> closed-loop system

<sup>۲</sup> Multiple active tuned mass damper

<sup>۳</sup> semi-active friction-type multiple tuned mass damper

<sup>۴</sup> H-infinity

<sup>۵</sup> supervisory fuzzy controller

<sup>۶</sup> piezoelectric actuators

سلیم ، ازلی: روش کنترلی PID را برای کنترل فعال سازه ۴ طبقه به کار برده‌اند و نتایج آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این روش نیروی کنترلی فعال<sup>۱</sup> که از طریق سیستم کنترل فعال به سازه وارد می شود، با کنترلر مشتق انتگرال گیر کنترل می‌شود [۱۹]

لادیپو ، اسمیل: روش کنترلی PID را برای کاهش ارتعاشات سازه به کار بردند. همچنین از نرم‌افزار labview برای اجرای سیستم فعال جذب کننده ارتعاشات دینامیکی<sup>۲</sup> با استفاده از اعمال کنترلرهای متفاوت استفاده کردند. نتیجه پیاده سازی کنترلر PID بر روی سیستم ADVA<sup>۳</sup>، سازگاری بالای این سیستم را به فرکانس رزونانس و نیز کاهش دامنه ارتعاشات در تمام فرکانس‌های رزونانس از سیستم چند درجه آزادی را نشان می‌دهد [۲۰]

شکل (۳-۱) جذب کننده ارتعاش و شکل (۴-۱) چرخ دنده هلیکال و گیره به کار برده شده برای ساخت سیستم فعال جذب کننده ارتعاش را نمایش می‌دهد. شکل (۵-۱) نحوه اتصال جذب کننده ارتعاش را به چرخ دنده هلیکال و گیره را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴: چرخ دنده هلیکال و گیره



شکل ۱-۳: جذب کننده ارتعاش

---

<sup>۱</sup> Active Force Control

<sup>۲</sup> Active Dynamic Vibration Absorber

<sup>۳</sup> Active Dynamic Vibration Absorber