

پایان نامه کارشناسی ارشد عمران- گرایش سازه

عنوان:

استفاده از میراگر (نیمه فعال MR) برای کنترل سازه ها در برابر نیروهای جانبی

> <sup>نگارش:</sup> **هدی نصر اله الحسینی**

> > استاد راهنما

دکتر علی کیہانی

شهریور ماه ۱۳۸۶



هواللطيف

تقدیم به پدر گرامی و مادر مهربانم.

iv

چکیدہ:

یکی از روشهای کنترل سازه ها در مقابل ارتعاشات و نیروهای جانبی، استفاده از میراگرها می باشد. دراین پژوهش به مطالعه رفتار میراگر MR پرداخته می شود. این ماده از یک روغن تشکیل شده است که ذرات مغناطیسی در آن شناور هستند. هنگامیکه این ماده در مجاورت میدان مغناطیسی قرار می گیرد، تغییر لزجت داده و از حالت مایع روان به حالت نیمه جامد تبدیل می شود.

تحقیق و مطالعه درمورد خواص این ماده، روشهای مدلسازی آن و روابط موجود برای طراحی آن از جمله کارهای انجام شده است. مدلسازی میراگر بر اساس روش پیشنهادی Spencer و همکارانش انجام شده است. در مرحله بعدی مدلسازی این میراگر در یک سازه سه طبقه به دو روش انجام شده و نتایج مدلسازی های مختلف نشان داده می شود. نیز تاثیر حضور میراگر در کاهش پاسخهای سازه بررسی می شود.

واژه های کلیدی

کنترل سازه ها – میراگر – مگنتورئولوژی – زلزله – ارتعاش – بهسازی – بازسازی

#### فهرست مطالب

#### فصل اول–مقدمه

۱	۱–۱–مقدمه
۴	۲-۱-اهداف
۴	۱ –۳–ساماندهی

#### فصل دوم-كنترل سازه ها

۲-۵-۱-۵-میراگر با روزنه متغیر.....

۲-۵-۲-وسائل کنترلی سختی متغیر.....۲۷ ۲–۵–۳–میراگر نیمه فعال جرم تنظیم شونده......۲ ۲–۵–۴–میراگر ستون مایع تنظیم شونده......۲ ۲۹-۵-۵-میراگر سیال کنترلی.... ۲–۵–۵–۱– میراگر سیال کنترلی الکترورئولوجیکال....۳۰ ۲-۵-۵-۲- میراگر سیال کنترلی مگنتورئولوجیکال....۳۰ فصل سوم-مبراگر مگنتورئولوجیکال ٣٢- ١- صقدمه..... ۳-۲-خواص سیال مگنتو رئولوجیکال..... ۳-۳-ساختار فيزيكي.... ۳–۴–فرمول بندی مدلهای مکانیکی.... ۲-۳-۱-۹ ویسکویلاستیک بینگهام..... ۳-۴-۲-مدل گاموتا و فیلیسکو..... ۳-۴-۳-مدل باس-ون..... ۵۰-۳-۴-مدل پیشنهادی اسینسر و همکارانش.....

۵۴-۳-تعمیم مدل پیشنهادی اسپنسر برای میدانهای مغناطیسی متغیر با زمان..............

- ۳–۶–کارهای انجام شده.....۵۸
- ۵۸.....۵۸-۳-مدلسازی میراگر....
- ۶۱-۳-۲-نتیجه گیری.....

#### فصل اول

#### مقدمه

- در این فصل بطور خلاصه به بررسی روشهای مقاوم سازی سازه ها در برابر نیروهای جانبی پرداخته، معایب و مزایای روشهای متداول و جدید بیان می شود. نیز نگاهی گذرا به اهداف پایان نامه، ساختار نگارشی آن و موضوعات مطرح شده در فصلهای مختلف تحقیق خواهیم داشت.

۱-۱) مقدمه

در هنگام طراحی ساختمان های مهندسی، بیشترین توجه به بارهای جاذبه ای است که همیشه موجود بوده و بنابراین در طول عمر یک سازه بایستی با آنها مقابله شود. بزرگی آنها و جایی که اشغال می کنند و محل وارد شدن بار مشخص است و با زمان نیز تغییر چندانی ندارند و لذا یک ساده سازی استاتیکی برای آنها جوابگو خواهد بود.

از طرف دیگر وقتی با بارهای جانبی روبرو می شویم، روش مشابهی به کار می بریم. برای مثال بارهای ناشی از باد یا زلزله را به عنوان ضریبی از بار قائم مدل می کنیم که این روش، پایه بسیاری از طرحی ها از آغاز قرن بیستم بوده و در بسیاری از موارد نیز نتایج قابل قبولی داشته است. با این حال با در نظر گرفتن ماهیت دینامیکی بارهای جانبی، پیشرفتهای مهمی قابل دستیابی است[۲–۱]. دو راه برای کمک به ساختمان برای تحمل بارهای زلزله وجود دارد: ۱ طراحی ساختمان با مقاومت و سختی کافی و ظرفیت تغییر شکل غیر الاستیک برای تحمل
زلزله. این هدف با اضافه کردن اجزائی مثل دیوار برشی، بادبندها، قاب خمشی، دیافراگم ها و خرپاهای
افقی تأمین می شود تا منجر به سیستمی مقاوم در برابر بارهای جانبی گردد.

این روش همچنین دربرگیرنده شکل ساختمان می باشد. مثلاً ساختمانهای مربعی یا مستطیلی بهتر از سایر شکلها مثل L,U,T عمل می کنند. نکته مهم دیگر، انتخاب مواد استفاده شونده در ساختمان است. بعنوان مثال مصالح شکل پذیر مثل آهن، بهتر از مصالح شکننده همانند آجر عمل می کنند. خاک زیر سازه نیز نکته مهم دیگری است که خصوصیات لرزه ای سازه را شدیداً تحت تأثیر قرار می دهد.

با توجه به اینکه زلزله به مرکز جرم سازه وارد می شود، هرچقدر که یک سازه سنگین تر باشد نیروی زلزله بیشتری به آن وارد می شود. در سازه های بلند این اضافه وزن بیشتر نمود می کند. از نظر اقتصادی افزایش ابعاد سازه ممکن است توجیه پذیر نباشد، همچنین افزایش سختی، سازه را تا حدی صلب و غیر انعطاف پذیر می کند و باعث ضربه زدن به سازه در زلزله های شدید می شود.

نظر به اینکه که این روش به مقاومت داخلی سازه برای اتلاف انرژی تکیه می کند، سطح مشخصی از تغییر شکل و خرابی را باید پذیرفت. علاوه براین سیستمهای معمول فقط تغییر مکان های سازه را کنترل می کنند در صورتیکه کنترل شتاب سازه از نظر راحتی و آرامش ساکنان آن بسیار حائز اهمیت است. بنابراین باید سیستم هایی طراحی شود که علاوه بر تغییرمکان، شتاب سازه را نیز کاهش بدهد. مجموعه این نواقص مهندسین را به استفاده از روش های نوین و مطمئن برای طراحی سازه ها رهنمون می سازد. ۲- روش دوم استفاده از وسایل کنترلی برای کاهش نیروهای عمل کننده بر ساختمان است که هدفشان

این وسائل کنترلی یا میراگرها در قسمتهای مختلف سازه نصب می شوند، بعضی بین پی و کف ساختمان، بعضی در محل اتصال بادبند ها و برخی در پشت بام نصب می شوند. با توجه به آزمایشات و تحقیقاتی که بر روی سازه های مجهز به میراگر انجام گرفته است می توان گفت که این روش برای کاهش ارتعاشات وارد بر سازه ها ناشی از باد یا زلزله بسیار مناسب است.

شاخه ای از مهندسی عمران که به بررسی این اصول می پردازد، کنترل سازه ها<sup>۱</sup> نام دارد. وسائل کنترلی با توجه به میزان مصرف انرژی به سه دسته غیر فعال<sup>۲</sup>، فعال و نیمه فعال<sup>۳</sup> و کنترل هایبرید<sup>۴</sup> تقسیم می شوند. [۲–۱]

در کنترل غیر فعال، وسائل کنترلی برای نیروی مشخصی طراحی و نصب می شوند. در کنترل فعال به نیروهای کنترلی بزرگی برای تحریک وسائل کنترلی نیاز است. با روش کنترل نیمه فعال می توان از مزایای دو روش قبلی بهره جست.

#### ۲–۱) اهداف:

هدف ما نشان دادن قابیت تاثیر میراگر MR در کاهش پاسخ های سازه از قبیل سرعت، جابجایی و شتاب طبقه از طریق مدلسازی میراگر در یک سازه سه طبقه می باشد. همچنین بدست آوردن یک روش کنترلی مناسب که توانایی مدلسازی مجموعه میراگر و سازه را به بهترین وجه داراست.

#### ۱–۳) سازماندهی:

پایان نامه در شش فصل به شرح زیر تنظیم شده است: فصل اول مقدمه است که اطلاعات کلی درمورد پایان نامه می دهد. فصل دوم روش های نوین کنترل سازه ها را معرفی می کند.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Structural control

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Passive Control

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Active and Semi-active Control

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Hybrid Control

در فصل سوم به بررسی بیشتر میراگر مگنتورئولوژی،MR، و مدلسازی آن می پردازیم. فصل چهارم، روشهای کنترل مقاوم برای تحلیل و طراحی سیستمها را بررسی می کند. درفصل پنجم به مدلسازی مجموعه سازه و میراگر به دو روش کنترلی می پردازیم. فصل ششم نیز به جمع بندی و نتیجه گیری اختصاص دارد.

#### فصل دوم

# کنترل سازه ها

- در این فصل به بررسی روشهای کنترلی سازه ها در برابر نیروهای جانبی پرداخته، معایب و مزایای روشهای مختلف جدید بیان می شود. نیز نگاهی گذرا به اهداف پایان نامه، ساختار نگارشی آن و موضوعات مطرح شده در فصلهای مختلف تحقیق خواهییم داشت.

#### ۲-۱) مقدمه

وسائل کنترلی با توجه به میزان مصرف انرژی به سه دسته غیر فعال<sup>۵</sup>، فعال و نیمه فعال<sup>۶</sup> و کنترل هایبرید<sup>۷</sup> تقسیم می شود در شکل (۱–۱) نشان داده شده است.[۲–۱]

<sup>7</sup> Hybrid Control

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Passive Control

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Active and Semi-active Control

سیستم استهلاک انرژی غیر فعال از وسائل و موادی برای بهبود میرایی و سختی سازه استفاده می کند و می تواند برای کاهش خطرات لرزه ای و همچنین بهسازی ساختمانهای قدیمی بکار رود. در حقیقت این سیستمها با توانائی شان در استهلاک انرژی در سازه ای که در آن نصب می شوند، شناخته می شوند.



شکل (۱–۱)- نمای کلی سیستم مطالعه شونده در کنترل سازه ها [۱۵]

سیستم های فعال، نیمه فعال و هایبرید درواقع مدل بهبود یافته سیستمهای کنترل غیر فعال هستند. استفاده از سیستم کنترل فعال و یا ترکیباتی از سیستمهای غیر فعال و فعال برای کنترل سازه در برابر زلزله، در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سیستمهای کنترل فعال، نیمه فعال و هایبرید شامل وسائل انتقال نیرو همراه با کنترل کننده های لحظه ای (Real time Processing) (Controllers) و سنسورهایی (Sensors) در سازه هستند، که به طور موازی با تحریک عمل می کنند و باعث افزایش ایمنی، خدمت رسانی و بهبود رفتار سازه می شوند.

مزیت سیستمهای کنترل نیمه فعال و هایبرید، این است که در هنگام از کار افتادن منبع انرژی، مولفه غیر فعال کنترل همچنان قابل اعتماد و کارآمد است. تا کنون مطالعات جامع زیادی بر روی انواع وسائل کنترلی صورت گرفته است که از جمله آنها می توان به مطالعات هاسنر و همکارانش^[۳]و[۱۰]، اسپنسر و سن<sup>۹</sup>[۴]و[۳۰]، سونگ و اسپنسر<sup>۱۰</sup>[۵]و[۷]و اسپنسر و همکاران<sup>۱۱</sup>[۶]و[۲۴]و[۳۳]و [۳۳]و [۳۷–۵۴]، اشاره کرد.

همچنین مقالات تخصصی تری با تکیه بر تکنیکهای کنترلی در آمریکا و چین تهیه گردیده است[۸–۷]. مطالعات جداگانه ای نیز در مورد وسائل کنترلی غیر فعال[۲۵]، فعال[۱۰–۹] و سیستمهای کنترل نیمه فعال توسط سیمونز و کنستانتینو<sup>۱۲</sup> انجام گرفته است[۹]و[۱۱].

1-1) کنترل غیر فعال<sup>۱۳</sup>

تجهیزاتی که برای عملکرد به منبع انرژی خارجی احتیاجی ندارند، وسائل کنترل غیر فعال نامیده می شوند. این تجهیزات برای بهبود خصوصیات دینامیکی سازه بخصوص سختی و میرایی به آن اضافه گردیده و موجب کاهش پاسخهای سازه می گردند. از آنجا که این سیستم ها با وارد شدن نیروهای خارجی تحت تأثیر قرار نمی گیرند، بسیار قابل اعتمادند. هزینه تعمیر و نگهداری آنها نیز بسیار پایین است. مثالی از وسائل کنترل غیر فعال عبارتند از: [۲۵و۲۵]

۱-۱-۱) سیستمهای جداساز پایه<sup>۱۴</sup>

<sup>8</sup> Housner et al

<sup>9</sup> Spencer Jr. and Sain

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Soong and Spencer

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Spencer Jr.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Symans and Constantinou

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Passive Control

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Base Isolation

سیستم جداساز پایه شامل استفاده از وسائلی است که در جهت افقی قابل انعطاف و در جهت قائم کاملاً سخت هستند که بین فونداسیون و سازه اصلی قرار می گیرند. شکل(۱–۲)



شکل(۲-۲)- سازه با جداسازی لرزه ای در پایه[۱۲]

هدف اصلی جداسازی لرزه ای، آزاد ساختن سازه از شتاب زمین با استفاده از یک پی انعطاف پذیر است. سیستم جداساز مقداری از انرژی ورودی را قبل از انتقال به سازه جذب می کند، در نتیجه تقاضای اتلاف انرژی کم شده و پریود طبیعی سازه را افزایش می دهد[۱۴–۱۳].

انواع جدا کننده ها که هم اکنون در مهندسی ساختمان به کار می روند عبارتند از: [۱۶]و [۴۹]

- ۱- تکیه گاه های لاستیکی هادی<sup>۱۵</sup>(LRB)
- ۲– تکیه گاه های لاستیکی با میرائی زیاد<sup>۱۶</sup>
  - ۳- لایه های تکیه گاهی الاستومری<sup>۱۷</sup>
    - ۴- تکیه گاه های لغزان اصطکاکی<sup>۱۸</sup>
- شکل (۱-۳) نمونه هایی از این جداکننده ها را نشان می دهد.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Lead Rubber Bearings

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> High Damping Rubber Bearings

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Elastomeric Bearing Pads

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Sliding Friction Bearings

شکل (۱–۳–۱) یک مفصل الاستومری را نشان می دهد که از لایه های ناز کی از پلاستیک طبیعی تشکیل شده است که به ورقه های فلزی متصل اند. شکل (۱–۳–۲) یک مفصل پلاستیکی را نشان می دهد که متشکل از پلاستیک طبیعی با میرایی پایین و یک سوراخ مرکزی از پیش تعیین شده است که هسته راهبر در آن قرار می گیرد. در اثر حرکت افقی، هسته راهبر تحت برش خالص تغییر شکل می دهد و با تنش کمی جاری می شود و یک رفتار هیسترتیک را ایجاد می کند که معمولاً در چند سیکل پایدار است.



شکل(۱–۳–۱) تکیه گاه الاستومری شکل(۱–۳–۲) تکیه گاه لاستیکی هادی



شکل(۱–۳–۳) سیستم تکیه گاه پاندولی اصطکاکی ۱۹

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Friction Pendulum System (FPS) bearing

## شکل(۳-۳) انواع جداکننده های معمول در ساختمان[۱۵]

تکیه گاه های لغزان<sup>۲۰</sup>، روش دیگری را برای تهیه المان های لایه ای برای سیستم جداساز تهیه می کند. بیشتر جداسازها از نوع سیستم تکیه گاه پاندولی اصطکاکی می باشد. شکل (۱–۳–۳). ساختمانهای بسیاری در آمریکا، ژاپن، نیوزیلند و چین از این تکنولوژی استفاده کرده اند و نتایج حاصل از کم کردن نیروی منتقل شده از زمین به سازه بسیار رضایت بخش است و به نصف و حتی یک سوم کاهش یافته است. همچنین به کارگیری این وسائل در چین منجر به کاهش هزینه سازه بین ۵ تا ۲۰ درصد در مقایسه با روش های قدیمی شده است[۸].

اولین مورد بکارگیری این سیستم در آمریکا در مرکز FCLJC<sup>۲۱</sup> در کالیفرنیا در سال ۱۹۸۵ بود که شامل سیستمی متشکل از ۹۸ تکیه گاه لاستیکی طبیعی چند لایه بود که با صفحات فولادی تقویت می شد. یکی از نقایص عمده این روش امکان ایجاد لنگرهای واژگونی بزرگ در فونداسیون می باشد که ممکن است باعث ناپایداری جدی شود[۱۶].

## (TMD) میراگرهای جرمی تنظیم شونده<sup>۲۲</sup> (TMD)

میراگرهای جرمی از المان های با جرم زیاد تشکیل می شود که به طور الاستیک به سازه اصلی متصل اند.(شکل ۱–۴) چنین اتصالی باید اجازه حرکت نسبی بین میراگر جرمی و سازه اصلی را بدهد تا نیروهای بزرگ اینرسی که تولید می شود، نیروهای خارجی وارد بر سازه را خنثی کند. [۱]

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Sliding Bearings

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Foothill Communities Law and Justice Center

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Tuned Mass Dampers(TMD)



شکل(۱-۴)- میراگر جرمی تنظیم شونده[۱۵]

برای رسیدن به این هدف، پریود طبیعی جرم افزوده باید به پریود اصلی<sup>۳۳</sup> سازه نزدیک باشد که این اساس کار میراگرهای تنظیم شونده جرمی (TMD) است.

این المانها بیشتر برای کاهش لرزه های افقی ساختمان های بلند و لاغر، آسمان خراش ها، برجهای تلویزیونی، دودکشها و غیره به کار می روند. همانطور که در شکل (۱–۵) نشان داده شده است برای حالت یک ساختمان چند طبقه ممکن است

برای کنترل لرزه در طبقات مختلف سازه نصب شود. [۸و۱]

از مثال های کاربرد این میراگرها می توان به مرکز Center City Crop در نیویورک، ساختمان John Hancock در بوستون، CN Tower TV در تورنتو-کانادا، برج Sydney Tower در استرالیا، ساختمان Hancock در عربستان سعودی، مرکز Bin Quasim Thermal Power Station در پاکستان، پل Yanbu Cement plant در ژاپن اشاره نمود[۸و۲۱و۳۳].

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Fundamental Period



شکل(۱-۵-۱) آونگ با شکل(۱-۵-۲) آونگ وارون با دمپر و فنر



شکل(۱–۵–۳)-آونگ با شکل(۱–۵–۴)-جرم شناور بر تکیه گاه دوار

دسته های معلق





شکل (۱–۵–۵) جرم بر روی شکل (۱–۵–۶) جرم لغزان با دمپر و فنر

تكيه گاه لاستيكي

شکل(۱–۵) انواع مختلف میراگر جرمی[۱۵]

چندین روش برای طراحی و فرمول بندی میراگر هایTMD توسط محققین مختلف ارائه شده است که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

دن هارتوک<sup>۴۲</sup> بر اساس تئوری نقطه ثابت<sup>۲۵</sup> راه حلی برای طراحی میراگر های TMD ارائه داد[۱۹]. فوجینو و اب<sup>۴۶</sup> یک مطالعه پارامتری برای مشخص کردن پارامتر های بهینه انجام دادند[۲۰]. همچنین آنها امکان استفاده از میراگر های چندگانه تنظیمی<sup>۲۷</sup>(MTMD) را برای کنترل بیش از یک مود ارائه کردند.

پینلی و همکارانش<sup>۲۸</sup> قابلیت تأثیر ترکیبات مختلف TMD را بررسی کردند که شامل بررسی ۱) یک TMD ۲) چند TMD (MTMD)، ۳) جرم هماهنگ توزیع شده<sup>۲۹</sup>(DTMD) که شامل چندین TMD موازی با فرکانس هایی در حدود فرکانس اصلی سازه است و ۴) MDTMD که شامل چندین

گروه TMD است که هر گروه فرکانس هایی در اطراف فرکانس یک مود سازه ای داشتند[۲۱]. در این تحقیق نشان داده شده که DTMD و MTMD به نظر می رسد که توانایی غلبه بر مشکل اصلی TMD که همان کمبود سختی است را دارند؛ با این حال به علت کمبود نتایج، تصمیم گیری قطعی در مورد کارآیی DTMD و MTMD ممکن نیست.

(TLD) <sup>۳۰</sup> میراگرهای سیال تنظیم شونده<sup>۳۰</sup> (

<sup>27</sup> Multiple Tuned Mass Damper(MTMD)

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Den Hartog

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Fixed-point-theory

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Fujino and Abe

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Pinelli et al

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Distributed Tuned Mass Damper (DTMD)

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Tuned Liquid Dampers(TLD)

با تغییر کوچکی در TMD به TLD می رسیم که از حرکت سیال<sup>۳۱</sup> در تانک برای استهلاک انرژی استفاده می کند. از جمله مزایای این سیستم می توان به هزینه پایین، راحتی نصب و تنظیم فرکانس مایع در آنها اشاره نمود[۷]و[۳۰].

از جمله کسانی که در این زمینه کار کرده اند میتوان به کاریم[۲۳]، لو و همکاران[۳۴]،هارون و همکاران[۳۵] اشاره کرد. این وسیله در ژاپن برای کنترل لرزش ناشی از باد در برج های هواپیمایی و ساختمان های بلند مورد استفاده قرار گرفته است[۷]. هرچند که این سیستم در کاهش پاسخ های ناشی از باد تا ۷۰ درصد موُثر بوده است، اما به نظر می رسد که TLD ها ناموفق تر از TMT ها عمل می کنند[۲۲].

## (MD) میراگرهای فلزی جاری شونده<sup>۳۲</sup> (MD)

این میراگر ها بر اساس تغییر شکل غیر خطی فلزات و در نتیجه استهلاک انرژی عمل می کنند. این روش ابتدا در نیوزلند و ژاپن و همچنین برای بازسازی ساختمان ها در مکزیک و آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است[۲۵و۲۵]. شکل(۱-۶) نمای یک میراگر X شکل جرم و سختی افزوده<sup>۳۳</sup>(ADAS) را نشان می دهد.



<sup>31</sup> Sloshing of the liquid

<sup>32</sup> Metallic yield Dampers (MD)

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Added Damping And Stiffness(ADAS)

## شکل(۱-۶)- میراگر X شکل (ADAS)[۱۷]

شکل (۱–۷) مورد استفاده این میراگر را در باز سازی برج Casad Dam Intake Tower در برمرتون<sup>۳۴</sup> و

Lawrence Berkeley National Laboratory در دانشگاه برکلی کالیفرنیا را نشان می دهد. [۲۵]



شکل(۱-۷-۱)- ساختمان Lawrence Berkeley National Laboratory



<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Bermerton,WA

شکل(۱–۲–۲)-بازسازی Casad Dam Intake Tower در برمرتون

شکل(۱–۷)- موارد عملی استفاده از میراگر فلزی[۱۷]

۱-۱-۵) میراگرهای سیال ویسکوز<sup>۳۵</sup> (VD)

این میراگر ها اساساً از یک مایع ویسکوز، کوپلیمرها و یا مواد شیشه ای ساخته می شوند که هرگاه تحت تغییر شکل برشی قرار گیرند، انرژی را مستهلک می کنند. همانطور که در شکل (۱–۸) نشان داده شده است، یک میراگر مایع ویسکوز بسیار شبیه به کمک فنر

است و از یک سیلندر حاوی سیالی مثل سیلیکون یا روغن و یک پیستون با سوراخی کوچک تشکیل شده است [۲].



شکل(۱–۸)-مدل شماتیک میراگر ویسکوز [۱۷]

از جمله کسانی که در این زمینه کار کرده اند میتوان به شینزوکا و کنستانتینو[۹]، کانان و همکاران[۴۵] و یانگ و همکاران[۴۹] اشاره کرد. یک دمپر و ویسکوالاستیک معمول در شکل (۱–۹) نشان داده شده است که از یک لایه ویسکوالاستیک چسبیده به ورقه های فلزی تشکیل شده است. این سیال، در نتیجه لرزش سازه ای که باعث بوحود آمدن

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> Viscous fluid Dampers (VD)

حرکت نسبی بین ورقه های فلزی خارجی و ورقه میانی می شود، تغییر شکل برشی داده و در نتیجه اتلاف انرژی انجام می شود. [۹۹]



شکل (۱-۹)نمونه کاربردی میراگر ویسکوز در ساختمان [۱۵]

## (FD) <sup>۳۶</sup> (J-۱-۱) میراگرهای اصطکاکی

این وسائل از نیروی اصطکاک برای استهلاک انرژی استفاده می کنند. برای مثال می توان به میراگر سومیتومو<sup>۳۷</sup> اشاره کرد که دارای پد های اصطکاکی از جنس آلیاژ مس است که با گارفیت پوشیده شده و در سطح داخلی یک سیلندر سر می خورد. شکل (۱–۱۰)



<sup>36</sup> Friction Dampers(FD)

<sup>37</sup> Sumitomo Friction Damper

شکل (۱-۱۰)- میراگر سومیتومو و کاربرد آن در سازه[۱۵] از جمله کسانی که در این زمینه کار کرده اند میتوان به آکبای و آکتان[۱۸]، داودل و چری[۴۶]، فنگ و همکاران[۴۷]، ناگاراجایا و همکاران[۴۸] و فوجیتا و همکاران[۵۰] اشاره کرد.

شکل (۱–۱۱) مثال دیگری از میراگر های اصطکاکی را نشان می دهد که از اصطکاک بین ورقه های فولادی برای استهلاک انرژی استفاده می کنند.



شکل (۱۱–۱۱)- میراگر اصطکاکی (FD) [۱۷].

جدول(۱-۱) مشخصه های اصلی تجهیزات کنترل غیر فعال را نشان می دهد.

Desirable Features	Isikation System	Energy dissipators	Mass damper
Low initial cost			
Effective to resist wind forces			•
Reliability	-	•	
Long durability		-	
Low cost of maintenance		•	
Low cost of replacement		•	
Effective against severe			
Earthquakes	•		
Effective when used with flexible			
Structures or soils			-

جدول(۱-۱)-مقایسه ای بین سیستم های کنترل غیر فعال

## ۳-۱) کنترل فعال"

نمای کلی یک سیستم کنترل فعال در شکل(۱–۱۲) نشان داده شده است. شکل (۱–۱۳) نیز المانهای یک سیستم کنترل فعال را نشان می دهد. [۲–۱]

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> Active Control



شکل (۱-۱۲)- نمای کلی یک سیستم کنترل فعال[۱۵]



تفاوت های اساسی بین سیستم کنترل فعال و غیر فعال وجود دارد که در ذیل به برخی از آنها اشاره می گردد: [۲–۱]

۱)به جای وسائل داخلی مثل جدا کننده ها<sup>۳۹</sup>، مستهلک کننده ها<sup>۴۰</sup> و میراگرهای جرمی<sup>۴۱</sup>، سیستم های فعال از مکانیزمی<sup>۴۲</sup> تشکیل شده است که توسط یک منبع با انرژی زیاد (در حدود ۱۰ کیلو وات) کنترل

- <sup>39</sup> Isolators
- <sup>40</sup> Dissipators
- <sup>41</sup> Mass Dampers
- <sup>42</sup> Mechanism

می شود. بنابر این وسائل کنترل فعال این توانایی را دارند که سازه را وادار به مقابله با نیروهای خارجی کنند؛ در حالیکه وسائل غیر فعال، المانهای مرده هستند.

۲)برای آگاهی از موقعیت سازه در هر لحظه<sup>۴۳</sup>، سنسورهایی در آن نصب می شود.

۳)اطلاعات خروجی سنسورها، با یک کنترل گر پردازش می شود (معمولاً یک کامپیوتر). سپس دستورات دقیق به محرکها<sup>۴۴</sup> داده می شود تا با عکس العمل صحیح، پاسخ سازه را حداقل کنند.

سیستمهای فعال قابلیت پذیرش انواع مختلف شرایط بار گذاری و کنترل مودهای مختلف لرزه ای را دارند، از این رو، از وسائل غیر فعال موترتر عمل می کنند. اما با توجه به قابلیت آنها برای اضافه کردن انرژی به سیستم، ممکن است باعث ناپایداری سازه نیز بشوند. [۲۲]

یکی از معایب سیستمهای کنترل فعال این است که چندان قابل اعتماد نیستند. چون منبع انرژی بالای مورد نیاز این سیستم ها ممکن است در طول زلزله تاُمین نشود. در این صورت قابلیت اعمال انرژی و در نتیجه قابلیت کنترل فعال خود را از دست می دهند. هزینه نصب و نگهداری این سیستم نیز بطور قابل توجهی بیشتر از سیستم های کنترل غیر فعال است. [۲–۱]

### ۱-۲-۱) میراگر جرمی فعال<sup>۴۵</sup>

میراگر جرمی فعال(AMD) وسیله ای است که در کنترل فعال بیشترین مورد استفاده را دارد. از آنجایی که در این میراگرها نیز از سیستم میرایی جرم و فنر استفاده می شود، شبیه میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) است. بعلاوه از یک محرک برای مشخص کردن محل جرم در هر لحظه استفاده می کند تا مقدار میرایی بدست آمده و دامنه فرکانسی عملکرد آن را افزایش دهد[۳۳]. شکل (۱-۱۴)

<sup>43</sup> Status

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> Actuators

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> Active Mass Damper (AMD)



شکل (۱۱+۱)- میراگر جرمی فعال(AMD) [۱۵]

اولین مورد استفاده از میراگر جرمی فعال در کنترل سازه ها در سال ۱۹۸۹ در ساختمان Kyobashi Seiwa در توکیو، ژاپن توسط شرکت Kajima Corporation بود[۲۴]. شکل (۱–۱۵)



شکل (۱۵–۱۵) ساختمانKyobashi Seiwa در توکیو، ژاپن [۲]

به عنوان مثالهای دیگری از کاربرد (AMD) می توان به موارد زیر اشاره کرد:

برج (۱۹–۱۶)، برج مرکزی Applause Tower(Hankyu Chayamachi building) در اوساکا ژاپن، شکل(۱–۱۶)، برج مرکزی Shin-در تایینگ چین و ساختمان-Nanjing Communication در نانجینگ چین و ساختمان-Jei در تایپه در تایوان[۸].



شکل (۱-۱۶-۱)- برج Applause Tower در اوساکا ژاپن



شکل (۱–۱۶–۲)- جزئیات میراگر جرمی AMD

شکل (۱۹–۱۶)-میراگر جرمیAMD بکار رفته در برج Applause Tower در ژاپن[۲]

## **۴**-۱) کنترل هایبرید <sup>۴۶</sup>

برای کم کردن نیروی مورد نیاز وسائل کنترلی فعال و در نتیجه مقدار انرژی مورد نیاز، آنها را با وسائل کنترلی غیر فعال ترکیب می کنندکه به آن سیستم ترکیبی یا هایبرید<sup>۴۷</sup> گفته می شود[۱–۶و۶]. معمول ترین این سیستم ها (HMD) یا میراگر هایبرید جرمی<sup>۴۸</sup> است که از ترکیب TMD و AMD بدست می آید.

در حقیقت HMD ها بیشترین استفاده در مقیاس واقعی در مسائل مهندسی عمران را داشته اند[۸]. مثال هایی از کاربرد این سیستم عبارتند از:

Rihga Royal در اوساکا، Mitsubishi Heavy Industry در یوکوهاما و Kansai International Airport در Shinjuku Park Tower در ساختمان Shinjuku Park Tower در ساختمان Hotel در قدر شیما[۵]. یک ترکیب جالب از میراگر هایبرید در ساختمان V تشکیل شده است. این میراگر توسط توکیو دیده می شود، شکل(۱–۱۷)، که از یک HMD به شکل V تشکیل شده است. این میراگر توسط شرکت Ishikawajima-Harima Heavy Industries ساخته شده است[۲۴].

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> Hybrid Control

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> Hybrid System

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> Hybrid Mass Damper



شكل(۱–۱۷–۱)- ساختمانShinjuku Park Tower



#### شكل(۱-۱۷-۲)-جزئيات ميراگر HMD

شکل(۱–۱۷)-میراگر HMD بکار رفته در ساختمانShinjuku Park Tower و این ای میراگر های فعال-غیر فعال به عنوان دسته دیگری از میراگر های جرمی ترکیبی (HMD) می توان به میراگر های فعال-غیر فعال به عنوان دسته دیگری از میراگر های می توان به میراگر های فعال-غیر فعال تنظیم شونده<sup>۴۹</sup> اشاره کرد که به نام DUOX نام گذاری شده است، شکل (۱–۱۸). این وسیله، ترکیبی از یک میراگر فعال AMD است که بر روی یک میراگر تنظیم شونده TMD قرار می گیرد[۲۴]. یک میراگر فعال AMD است که بر روی یک میراگر تنظیم شونده TMD قرار می گیرد[۲۴]. در طول حرکت سازه ای، جرم AMD در جهت مخالف حرکت TMD حرکت می کند و لذا حرکت وسیله غیر فعال را بیشتر می کند. وقتی جابجایی ساختمان تمام می شود، میراگر AMD باعث میرا شدن حرکت غیر ضروری TMD می شود. این روش کنترلی ابتدا در سال ۱۹۹۳ در ساختمان AMD باعث میرا شدن

در جایی که نیروهای کنترلی بزرگی نیاز نیست سیستم های هایبرید (ترکیبی) قابل اعتمادتر و اقتصادی تر از سیستم های فعال هستند.



### شکل (۱–۱۸)-میراگر جرمی DUOX [۱۷]

## Δ-۱) کنترل نیمه فعال

سیستم های کنترل نیمه فعال توانایی اعمال انرژی به سازه را ندارند اما خصوصیات مکانیکی قابل تنظیمی دارند که عملکرد آنها را بهبود می بخشد[۶–۳] در این سیستم ها بر اساس فیدبک پاسخ اندازه گیری شده و تحریکات زمین، خصوصیات مکانیکی سیستم تغییر می کند.

از آنجایی که نیروی خارجی تنها برای تغییر خصوصیات مکانیکی سیستم مثل سختی و میرایی به کار می رود و برای تولید نیروی کنترلی به کار نمی رود، انرژی مورد نیاز سیستم بسیار پایین است (در حدود چند ده وات).

خصوصیت این سیستم های کنترلی، عملکرد بهتر نسبت به سیستم کنترلی غیر فعال و داشتن انعطاف پذیری سیستم های کنترل فعال بدون نیاز به منبع انرژی بزرگ است. سیستم های کنترلی نیمه فعال در هنگام از دست دادن منبع انرژی خارجی به عنوان سیستم کنترلی غیر فعال عمل می کنند و در نتیجه سیستم های پایدار و قابل اعتمادی هستند. [۱۱] از جمله وسائل کنترلی نیمه فعال می توان موارد زیر را نام برد:

۱-۴-۱) میراگر با روزنه متغیر<sup>۵۱</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> Semi-Active Control

میراگر با روزنه متغیر از یک میراگر سیال هیدرولیکی معمولی تشکیل شده است که با یک شیر الکترو مکانیکی قابل کنترل با روزنه متغیر ترکیب می شود و مقاومت جریان را تغییر می دهد. بنابراین مقدار میرایی سازه را کنترل می کند[۷]و [۲۷-۲۶]. از جمله کسانی که در این زمینه کار کرده اند میتوان به فنگ و شینزوکا[۵۱]، کاواشیما و همکاران[۵۲]،

ساک و پتن[۵۳]، هروات و همکاران[۳۳] و کوراتا و همکاران[۲۹] اشاره کرد. اولین کاربرد این وسیله کنترلی در مقیاس واقعی در پلی در آمریکا در تقاطع ۳۵ نزدیک Purcell اکلاهاما بود[۳۰و۲۸].(شکل ۱-۱۹)



(شکل ۱–۱۹)- میراگر با روزنه متغیر در پل Purcell در اکلاهاما [۳۰]

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Variable Orifice Damper

این پل دوخطه در سال ۱۹۷۱ ساخته شد و در سال ۱۹۷۲ در معرض بار ترافیکی قرار گرفت. هدف اصلی استفاده از وسیله کنترلی، افزایش عمر بهره برداری پل با کم کردن حداکثر تنش در حین عبور کامیون های سنگین بود[۲۸].

همچنین در یک ساختمان ۵ طبقه در شهر شیزوکا در ژاپن از هشت میراگر اریفیس متغیر استفاده شد و نتایج قابل قبولی بدست آمد[۲۹].

(Variable Stiffness Devices) وسائل کنترلی سختی متغیر (Variable Stiffness Devices)

وسائل کنترلی سختی متغیر، دسته دیگری از سیستم های کنترل نیمه فعال هستند که توانایی اصلاح سختی سازه و بنابراین فرکانس طبیعی سازه را دارند[۷]. این وسائل در بادبندهای ساختمان کار گذاشته می شوند و برای تغییر در سختی ساختمان درگیر یا آزاد می شوند. مصرف انرژی آنها بسیار پایین (در حدود ۲۰ وات) بوده و در هنگام از دست دادن منبع انرژی بطور خودکار درگیر شده و در نتیجه سختی ساختمان را افزایش می دهند[۲و۳۲].

از جمله کسانی که در این زمینه کار کرده اند میتوان به سونگ و اسپنسر [۷]، سیمونز و کنستانتینو [۱۱]، کوبوری و همکاران [۳۱] و کاماگاتا و کوبوری [۳۲] اشاره کرد.

اولین استفاده از این وسائل کنترلی در مقیاس واقعی در موسسه Kajima Technical Research اولین استفاده از این وسائل کنترلی در مقیاس واقعی در موسسه Institute



شکل(۱-۲۰) مؤسسه Kajima Technical Research Institute با میراگر سختی متغیر [۲]

۱-۴-۳) میراگر های نیمه فعال جرم تنظیم شونده<sup>۲۵</sup> SATMD این میراگرها برای کم کردن لرزش ناشی از باد طراحی شده اند. تفاوت میراگر های نیمه فعال جرم تنظیم شونده با TMD در این است که میرایی آنها قابل تنظیم است. مدل سازی ها نشان می دهد که عملکرد این وسائل کنترلی بهتر از عملکرد TMD و قابل مقایسه با سطح عملکرد AMD می باشد.همچنین می توان از میراگرهای متغیر همانند AVD<sup>۵۳</sup> با قابلیت تغییر میرایی

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> Semi-Active Tuned Mass Dampers

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> Active Variable Damper
نام برد که در مدل قاب سه طبقه فولادی به کار گرفته شده و نتایج خوبی در کاهش پاسخ سازه داشته اند[۳۳].

نوع دیگر TMD های نیمه فعال،<sup>۹۴</sup>SAIVS-TMD هستند که عملکرد مشابه AMD دارند با این تفاوت که مصرف انرژی آنها پایین تر است[۲۹].

۱–۴–۴) میراگر های ستون مایع تنظیم شونده<sup>۵۵</sup> (TLCD)

این میراگرها نیز همانند TLD ها از لزجت (Sloshing) یک سیال برای کاهش لرزش های سازه استفاده می کنند. از جمله کسانی که در این زمینه کار کرده اند میتوان به لو و همکاران[۳۴]، هروات و همکاران[۳۵]و کاریم و همکاران[۲۳] اشاره کرد.

برای تغییر خصوصیات و در نتیجه فرکانس طبیعی این میراگر، روش های مختلفی پیشنهاد شده است؛ از جمله می توان تغییر طول ستون مایع[۳۴]، تغییر سطح مقطع مخزن و همچنین یک روزنه متغیر داخل ستون مایع[۳۵] را نام برد.

(FD) میراگر های سیال کنترلی<sup>۶</sup>۶ (FD)

یکی از مناسب ترین میراگرهای نیمه فعال، میراگرهای سیال کنترلی هستند که ویسکوزیته آنها قابل تغییر است. قابلیت جالب توجه سیالات استفاده شونده در این میراگرها، توانایی آنها برای تغییر از یک سیال روان به یک ماده نیمه جامد با تنش جاری شدن قابل کنترل در چند میلی ثانیه است؛ که با تغییر در میدان مغناطیسی یا الکتریکی حاصل می شود و آنها را برای استفاده در میراگرهای کنترلی مناسب می کند. [۳۶]

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Semi-Active Variable Stiffness Tuned Mass Dampers

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> Adjustable Tuned Liquid Column Dampers

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> Controllable Fluid Dampers

دو سیال کنترلی که در کنترل سازه ها به کار می رود MR<sup>۵</sup> وAM<sup>۸</sup> هستند. این سیالات از ذرات پلاریزه شده الکتریکی یا مغناطیسی تشکیل شده اند که داخل یک روغن پخش می شوند. از آنجایی که تنها بخش متحرک این میراگرها پیستون است، این وسائل از نظر مکانیکی قابل ساده شدن هستند. از دیگر خصوصیات میراگرهای سیال کنترلی قابلیت اعتماد بالا و سادگی نگهداری آنها می باشد[۳۷–۳۶].

## (ER) میراگر سیال کنترلی الکترو رئولوجیکال (ER)

محققین مختلفی بر روی میراگرهای ER تحقیق کرده اند که از آن جمله می توان به تحقیقات گاموتو و فیلیسکو[۳۸]، گاوین و همکاران[۴۹]، مک کلارمن و همکاران[۴۰]، بورتون و همکاران[۴۱]، کاماس و ورلی[۴۳] و ماکریس و همکاران[۴۴] اشاره نمود.

با این حال به خاطر معایب سیالات ER استفاده های تجاری آنها بسیار کم است. از جمله این معایب می توان موارد زیر را برشمرد:[۴۴–۳۸]

۱) بیشترین تنش جاری شدن که در میراگرهای ER قابل دسترسی است پایین و در حدود ۳ تا ۳/۵ کیلو یاسکال است.

۲) ظرفیت این سیالات با افزوده شدن ناخالصی های معمول در حین ساخت و یا استفاده مثل رطوبت به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

۳)ولتاژ لازم برای عملکرد آنها در حدود ۴۰۰۰ ولت است که ولتاژ بالایی است و ممکن است قابل تهیه نباشد و یا خیلی گران باشد.

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> Magnetorheological Fluids

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> Electrorheological Fluids

## (MR) میراگر سیال کنترلی مگنتو رئولوجیکال (MR)

به نظر می رسد که میراگرهای MR جانشین هایی با انعطاف پذیری بیشتر نسبت به سیالات مشابه(ER) باشند. تنش جاری شدن آنها بیشتر است و ولتاژ مورد نیاز آنها نیز بسیار کمتر (در حدود ۱۲ تا ۲۴ ولت) است. همچنین منبع انرژی بسیار کمتری (کمتر از ۵۰ وات) نیاز دارند[۳۷–۳۶].

از جمله محققین مختلفی که بر روی میراگرهای MR تحقیق کرده اند می توان به تحقیقات کارلوس و اسپنسر[۵۷]، دایک و همکاران [۵۳و۵۴] ،ساک وپتن[۵۳] و اسپنسر و همکاران [۳۶و۵۵و۵۶] اشاره نمود.

اولین استفاده در مقیاس واقعی از این وسائل کنترلی در سال ۲۰۰۱ بود که شامل استفاده از دو میراگر MR سی نیوتنی در موزه ملی علوم و نوآوری توکیو<sup>۹۹</sup> بود،شکل(۱–۲۱). این میراگرها توسط Sanwa Tekki با استفاده از سیال MR ساخته شرکت Lord Corporation بود که بین طبقات سوم و پنجم موزه نصب شد[۶و۲].

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> Tokyo National Museum of Emerging Science and Innovation



شکل(۱–۲۱–۱)- موزه ملی علوم و نوآوری توکیو





شکل(۱–۲۱)- میراگر MR نصب شده در موزه علوم و نوآوری توکیو [۲]

استفاده از میراگرهای MR در پل ها نیز بسیار جدید است. اولین استفاده از این میراگر در پل کابلی دانگتینگ<sup>۰۰</sup> در هونان چین در آوریل سال ۲۰۰۲ بود (شکل ۱–۲۲). این پل در سال ۱۹۹۹ ساخته شد، ولی دیده شد که کابل ها در برابر لرزش ناشی از باد و باران حساس هستند. [۲] خاصیت میرایی بسیار پایین کابل ها باعث پدیده خستگی و در نتیجه کاهش عمر کابل ها و اتصالات و حتی ریختن حفاظ فرسایشی آنها شد. بنابراین دو میراگر MR برای هر کابل، در ۱۵۶ عدد از ۲۲۲ کابل نصب شد.

میراگرهای مورد استفاده، میراگر (Lord SD-1005 MR dampers) با ظرفیت هرکدام ۲/۲۶ کیلو نیوتن است. نتایج اندازه گیری لرزش کابل ها قبل و بعد از نصب میراگر، موُثر بودن آن را نشان داد که پاسخ ها را در حدود ۸۵ تا ۹۴ درصد کاهش داده بود.



شکل (۱-۲۲-۱)- پل کابلی دانگتینگ در هونان چین

<sup>60</sup> cable-stayed Dongting Lake Bridge



شکل (۱-۲۲-۲)- میراگرهای MR بکار رفته در پل

شکل (۱-۲۲)- پل کابلی دانگتینگ در هونان چین و نصب میراگر MR جهت کاهش لرزش پل [۲]

فصل سوم

ميراگر مگنتو رئو لوجيکال (MR)

۳–۱) مقدمه

در این فصل خواص ذاتی سیال MR و نحوه عملکرد آنرا به طور دقیق تر مطالعه می کنیم. همچنین به بررسی روشهای مدلسازی مکانیکی آن جهت کاربردهای عملی می پردازیم و روشهای متداول مدلسازی را معرفی کرده، معایب و مزایای هر روش ذکر می شود. سپس بر اساس کامل ترین مدل موجود، میراگر را مدل می کنیم. این مدلسازی با استفاده از نرم افزار MATLAB و در محیط SIMULINK [۵۹]انجام می شود. در نهایت نتایج مدلسازی انجام شده با مدلسازی آقای اسپنسر و همکارانش[۳۶] مقایسه می شود.

# (Magnetorheological) (MR) خواص سيال مگنتورئولوجيکال (T-۳

این مدل از ذرات بسیار ریزی که دارای خاصیت آهنربایی هستند تشکیل شده که در سیالی به صورت معلق قرار گرفته اند. از همان روغن هایی که در موتورها ریخته می شود می توان به عنوان سیال استفاده کرد. [۵۴–۵۸]

هنگامی که مایع MR در یک میدان مغناطیسی قرار می گیرد ذرات آهنربا دوقطبی شده و به صورت ستون های موازی قرار می گیرد. این حالت ذرات معلق را به صورت یکپارچه در می آورد و جریان مایع را سخت می کند و در نتیجه مقاومت برشی آنرا زیاد می کند. تغییر حالت مایع فقط در چند میلیونیم ثانیه اتفاق می افتد و مقدار سختی آن بستگی به شدت میدان مغناطیسی دارد.

مواد مختلفی نظیر روان کننده های ویسکو الاستیک، موادی که از رسوب ذرات جلوگیری می کنند و موادی برای افزایش عمر دستگاه به مایع MR اضافه می شود. حداکثر قدرت تحمل تنش برشی مایع MR به درجه مغناطیسی بودن ذرات معلق بستگی دارد.

برای تهیه یک مایع با قدرت تحمل برشی زیاد باید از ذرات با درجه مغناطیسی بالا استفاده کنیم. بهترین نوع این ذرات آلیاژ آهن و کبالت با درجه مغناطیسی ۲/۴ تسلا می باشد. از آنجا که این آلیاژ خیلی گران است، بجای آن از آهن خالص با درجه مغناطیسی ۲/۱۵ تسلا استفاده می شود. معمولاً قطر این ذرات ۲ تا ۵ میکرون است. در مقاصد عملی از ذراتی با قطر بزرگتر استفاده می شود ولی این افزایش قطر، مشکلات استفاده از آنها را نیز افزایش می دهد.ذرات ریز، راحت تر به صورت معلق قرار می گیرند؛ ولی تهیه آنها دشوارتر است. قطر ذرات آهن کربنی بیشتر از ۱ تا ۲ میکرون است مایع MR که از این ذرات تهیه می شود قدرت تحمل برشی در حدود ۵ کیلو پاسکال دارند. جدول (۳–۱) مشخصات ۴ نوع سیال MR را نشان می دهد که توسط شرکت Lord تولید

نام تجاری	درصد حجمی آهن	نوع سيال	چگالی(گرم بر میلی
			ليتر)
MRX-126PD	79	Hydrocarbon oil	7.89
MRX-140ND	۴۰	Hydrocarbon oil	T.94
MRX-242AS	47	Water	۳.۸۸
MRX-336AG	۳۶	Silicone oil	۳.۴۷

جدول(۳–۱)- مشخصات ۴ نوع سیال MR ساخته شده توسط شرکت Lord[۵۸]

۳-۳) ساختار فیزیکی

برای استفاده هرچه بهتر از خصوصیات منحصر به فرد میراگرهای MR در کاربردهای کنترلی، باید مدلی معرفی شود که دقیقاً جایگزین کننده رفتار میراگر MR باشد. به منظور بدست آوردن پاسخ میراگر مزبور برای مطالعات شناسایی، مدل نشان داده شده در شکل (۳–۱) طراحی و ساخته شده است. در این مدل از یک محرک<sup>۹</sup> هیدرولیکی دو طرفه ساخت شرکت نویاک<sup>۶۹</sup> برای درایو<sup>۶۳</sup> میراگر استفاده می شود[۳۶].



شکل (۳–۱) سیستم بکار رفته برای آزمایش میراگر MR[۳۶]

این محرک دارای قطر سیلندر ۳/۸ سانتی متر و دامنه ضربه<sup>۶۴</sup> برابر ۳۰/۵ سانتی متر بوده و با ذرات کم اصطکاک تفلون، آب بندی شده است تا اثرات غیر خطی حرکت را کاهش دهد.

یک شیر کنترلی با دامنه فرکانس اسمی (۴۵–۰) هرتز برای کنترل محرک استفاده شد.

برای اندازه گیری جابجایی میله پیستون دمپر از ترانسفورماتور تفاضلی <sup>۵</sup> LVDT اسچویتز<sup>۶۶</sup> استفاده شد. همچنین یک باطری با دامنه عملکرد ۴۵۴۰± نیوتن برای اندازه گیری نیروی خروجی بکار رفت.سیستم اکتساب داده بکار رفته شامل هشت فیلتر ضد اختلاط برنامه پذیر XFM82 با نسبت سیگنال به نویز ۸۰ دسی بل ساخت شرکت زیمنس، یک برد اکتساب دیتا قیاسی با مبدلهای آنالوگ به دیجیتال ۱۶

<sup>66</sup> Schaevitz

<sup>&</sup>lt;sup>61</sup> Actuator

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> Nopak

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Drive

<sup>64</sup> Strok

<sup>&</sup>lt;sup>65</sup> linear variable differential transformer

بیتی، LSDAS-16-AC-mod2 یک برد تایمر شمارشگر CTRTM-05، یک کامپیوتر با پروتکل ۲۰۰۰ و یک نرم افزار Snap-Master ساخت شرکت HEM بامسئولیت محدود می باشد[۳۶و۵۴]. با استفاده از این مدل سازی تجربی قادریم پاسخ های دینامیکی میراگر را در بازه بزرگی از تغییرات جابجایی با زمان سینوسی، پله ای، مثلثی و راندوم، پیش بینی کنیم. میراگر MR تهیه شده، یک میراگر با اریفیس ثابت است. مایع MR بکار رفته دارای فرمول انحصاری Versa Flo<sup>TM</sup> MRX-135GD ، ساخت شرکت لرد<sup>99</sup> و متشکل از ذرات میکرونی آهن مغناطیسی است که در یک روغن هیدروکربنی پراکنده شده است.

همچنین به منظور جلوگیری از ته نشین شدن ذرات و افزایش همگنی سیال، از افزودنی های مناسب استفاده شده است. چگالی این سیال ۳/۲۸ گرم بر سانتی متر مکعب، طول میراگر ۲۱/۵ سانتی متر در حالت کشیده و قطر سیلندر اصلی ۳/۸ سانتی متر است.

سیلندر اصلی شامل پیستون<sup>۸</sup>٬ مدار مغناطیسی<sup>۶۹</sup>٬ مخزن<sup>۷۰</sup> و ۵۰ میلی متر مایع MR است. حداکثر تغییر مکان میراگر<sup>۱۷</sup> برابر ۲/۵± سانتی متر است. همانطور که در شکل (۲–۲) نشان داده شده است، شیر مایع<sup>۷۲</sup> MR داخل پیستون جای دارد که شامل یک مجرای جریان حلقوی با قطر داخلی ۲۷ میلی متر و قطر خارجی ۲۸ میلی متر است.

<sup>67</sup> Lord Corporation

<sup>68</sup> Piston

<sup>69</sup> Magnetic circuit

<sup>&</sup>lt;sup>70</sup> accumulator

<sup>&</sup>lt;sup>71</sup> strok

<sup>72</sup> Fluid valve



شکل (۳-۲) شمای میراگر MR مورد آزمایش [۳۶]

میدان مغناطیسی به صورت شعاعی در عرض ۵/۰ میلی متری عمود بر جریان مایع وارد می شود. کل طول کانال جریان ۱۵ میلی متر است که ۷ میلی متر آن در معرض میدان مغناطیسی اعمالی است. پس کل حجم مایع متاثر از میدان مغناطیسی در هر لحظه، حدود ۳/۰ میلی لیتر است. میدان مغناطیسی می تواند بین ۰ تا ۲۰۰ کیلو آمپر بر متر برای جریان ۰ تا ۱ آمپر در هسته مغناطیسی با مقاومت ۴ اهم تغییر کند.

اندوکتانس<sup>۳۷</sup> کل شیر مایع MR برابر ۴۰ میلی هانری است که ناشی از ثابت زمانی MR برابر ۱۰ میلی ثانیه ای می باشد. ماکزیمم توان مورد نیاز ۱۰ وات است که به میراگر اجازه می دهد که بیش از یک ساعت با یک باطری کوچک دوربین کار کند.

در این مثال، جریان توسط یک منبع ۱۲۰ ولت AC تأمین می شود که جریان ۰ تا ۱ آمپری متناسب با ولتاژ ۰ تا ۳ ولت را تولید می کند. با این منبع انرژی، میراگر در کمتر از ۶/۵ میلی ثانیه پس از قرار گرفتن در میدان مغناطیسی، به تعادل رئولوژی<sup>۴۴</sup> می رسد[۵۵–۵۴].

<sup>73</sup> Inductance

<sup>74</sup> heological equilibriom

این میراگر، توانائی تولید نیرو تا ۳۰۰۰ نیوتون را دارد و در بازه دمائی گسترده ۴۰- تا ۱۵۰+ درجه با تغییراتی کمتر از ۱۰ درصد پایدار است.

با استفاده از مدل نشان داده شده در شکل (۳–۱)، یک سری آزمایشات برای اندازه گیری پاسخ میراگر تحت شرایط بارگذاری ویسکوز انجام شد. در هر آزمایش، محرک هیدرولیکی تحت یک سیگنال سینوسی با فرکانس ثابت هدایت شد. ولتاژ اعمالی به میراگر نیز در یک سطح ثابت نگه داشته شد. محدوده وسیعی از فرکانس، دامنه و سطوح ولتاژ مورد توجه قرار گرفت و داده ها در فرکانس ۲۵۶ هرتز جمع آوری شد . پاسخ میراگر MR به موج سینوسی ۲/۵ هرتز، با دامنه ۱/۵ سانتی متر در شکل (۳–۳) برای چهار سطح ولتاژ ثابت ۰۰ ۲/۷۵، ۱/۵ و ۲/۲۵ ولت نشان داده شده است.

این ولتاژها به ترتیب به جریان های ۰، ۲۵/۰۰ ۵/۰ و ۲۵/. مربوط می شوند. نیروی تولید شده به عنوان تابعی از زمان در شکل(۳–۳–۱) ، مشخصه نیرو-جابجایی در شکل (۳–۳–۲) و چرخه نیرو-سرعت در شکل(۳–۳–۳) نشان داده شده است[۳۶].



شکل(۳–۳–۱) مشخصه نیرو بر حسب زمان



# شکل (۳-۳-۳) نیرو بر حسب سرعت شکل (۳-۳-۲) نیرو بر حسب جابجایی

شکل(۳-۳) نتایج بدست آمده برای ورودی جابجایی سینوسی با دامنه ۱/۵ سانتی متر و فرکانس ۲/۵ هرتز [۳۶] همانطور که در شکل دیده می شود، در ولتاژ صفر ولت، میراگر MR مثل یک وسیله کاملا ویسکوز عمل می کند؛ به این معنی که رابطه نیرو-تغییر مکان تقریبا سهمی شکل و رابطه نیرو-سرعت نیز تقریبا خطی است. هرچه ولتاژ بالاتر می رود، نیروی لازم برای جاری ساختن مایع MR افزایش یافته و رفتاری مانند مواد پلاستیک بینگهام<sup>۵۷</sup> نشان می دهد.در میراگر تحت آزمایش، اثر اشباع MR در ولتاژ بالای ۲/۲۵ ولت رخ می دهد. [۵۵–۵۴]

در شکل (۳–۳) دیده می شود که نیروی تولید شده میراگر نسبت به صفر متقارن نیست. این تأثیر به خاطر حضور یک مخزن در میراگر است که از نیتروژن تحت فشار ۳۰۰ پاسکال بر اینچ مربع پر شده است. این مخزن به جلوگیری از تشکیل حفره<sup>۹۶</sup> در مایع کمک می کند[۳۶].

از یک دیدگاه، مخزن مثل یک فنر در میراگر عمل می کند. برای ایجاد مدل موُثر از میراگر MR، سختی ناشی از مخزن نیز باید در نظر گرفته شود. مدل های پارامتری و غیر پارامتری برای مدل سازی رفتار

<sup>&</sup>lt;sup>75</sup> Bingham Plastic behavior

<sup>&</sup>lt;sup>76</sup> cavitation

میراگر سیال کنترلی، در نظر گرفته شده اند.در بخش بعدی، موتر بودن چندین مدل ایده آل مکانیکی را برای پیش بینی پاسخ میراگرMR نمونه، ارزیابی می کنیم.

۴-۳) فرمول بندی مدل های مکانیکی

تا کنون محققین زیادی بر روی مدل سازی مکانیکی میراگرهای MR مطالعه کرده اند. مک کلامروچ و گاوین<sup>۷۷</sup> [۴۰]، یک روش غیر پارامتری برای مدل سازی میراگر های سیال MR ارائه کردند، با این فرض که جملات شتاب و سرعت میراگر را می توان به صورت چند جمله ای چبیشف<sup>۸۸</sup> نوشت. یکی از مشکلات این روش این است که مدل های ارائه شده خیلی پیچیده اند. کاماس و ورلی<sup>۲۹</sup>[۴۳] و ماکریس و همکارانش ۸۰[۴۴و۴۱] با استفاده از اصول مکانیک، مدل پارامتری را برای تشریح مشخصات مایع های ER ارائه دادند. همچنین مدل های پارامتری بر اساس ایده آل سازی های مکانیکی ساده توسط گاموتا و فیلیسکو<sup>۱۸</sup>[۳۸] برای توضیح رفتار سیالات کنترلی و میراگرهای مایع کنترلی ارائه شده است.

<sup>۸۲</sup> مدل ویسکوپلاستیک بینگهام<sup>۸۲</sup>

<sup>77</sup> McClamroch and Gavin

<sup>&</sup>lt;sup>78</sup> Chebychev

<sup>79</sup> Kamath and Werely

<sup>&</sup>lt;sup>80</sup> Makris et al

<sup>&</sup>lt;sup>81</sup> Gamota and Filisko

<sup>&</sup>lt;sup>82</sup> Bingham Viscoplastic Model

رفتار تنش-کرنش یک مدل ویسکوپلاستیک بینگهام، معمولاً برای تعریف رفتار میراگر MR و ER استفاده می شود[۴۱]. در این مدل، ویسکوزیته پلاستیک به عنوان شیب خط تنش برشی اندازه گیری شده در برابر داده های نرخ کرنش برشی، تعریف می شود. بنابراین برای مقدار مثبت نرخ برش،  $\dot{\gamma}$ ، تنش کلی به صورت زیر داده می شود:

$$\tau = \tau_{y(field)} + \eta \dot{\gamma} \tag{1-7}$$

که در آن (*field* تنش برشی تولید شده توسط میدان مغناطیسی یا الکتریکی و η ویسکوزیته جریان است. بر اساس این مدل از رفتار رئولوژی مایع ER، استن وی و همکارانش [۶۰] مدل مکانیکی ایده آل شده ای را برای رفتار یک میراگر ER پیشنهاد کرد که بر مدل بینگهام دلالت می کند. مدل بینگهام از المان اصطکاکی کولمب تشکیل شده است که به صورت موازی با یک میراگر ویسکوز قرار دارد.شکل(۳-



شکل(۳–۴) مدل بینگهام یک دمپر جریان کنترل پذیر [۶۰] در این مدل برای سرعت های غیر صفر پیستون،  $\dot{x}$ ، نیروی تولید شده توسط میراگر به صورت زیر است:  $F = f_c sign(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0$  (۲–۳)

که  $c_0$  ضریب میرایی و  $f_c$  نیروی اصطکاک است که به تنش برشی مایع بر می گردد. یک فاصله  $^{n}$  در نیروی  $f_0$  برای محاسبه میانگین غیر صفر موجود در نیروی اندازه گیری شده، به علت حضور مخزن لحاظ گردید.

برای نشان دادن توانایی این مدل در پیش بینی رفتار میراگر MR، مدل تحت داده های پاسخ سینوسی ۲/۵ هرتز شکل(۳–۳) قرار گرفت. در این حالت ولتاژ مقدار ثابت ۱/۵ ولت بود. پارامتر های انتخاب شده عبار تند از:  $f_c = -97$  نیوتن،  $f_c = -97$  نیوتن، ماه و یادت و ماه بر سانتی متر و  $f_c = -96$  نیوتن. شکل(۳–۵) مقایسه بین پاسخ های پیش بینی شده و پاسخ های تجربی را نشان می دهد. هرچند به نظر می رسد رفتار نیرو- جابجایی به صورت قابل قبولی مدل شده است، پاسخ نیرو-سرعت و تغییرات نیرو نشان می دهد که رفتار میراگر به خصوص در سرعت های نزدیک صفر به درستی مدل نشده است[77].



شکل(۳–۵–۱) مشخصه نیرو بر حسب زمان

<sup>83</sup> Offset



شکل(۳–۵) مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدل بینگهام با نتایج پیش بینی شده[۳۶]

در کل این مدل رفتار غیر خطی نیرو-سرعت را در حالی که شتاب و سرعت علامت مخالف دارند، به درستی نشان نمی دهد. هرچند این مدل ممکن است برای تحلیل پاسخ کافی باشد، اما برای تحلیل کنترل کافی نیست. توجه شود که این مدل ارتباط یک به یکی بین نیرو و سرعت برقرار می کند اما داده های تجربی جمع آوری شده یک به یک نیست. این رفتار باید در مدل ریاضی درنظر گرفته شود تا بتواند به خوبی خصوصیات ماده را برای کاربرد های کنترلی مشخص کند.

۳-۴-۲) مدل گاموتا و فیلیسکو<sup>۴۸</sup> گاموتا و فیلیسکوبا توجه به پیش بینی رفتار مواد ER، مدل بسط یافته ای از مدل بینگهام ارائه کردند که با مدل ویسکوپلاستیک نشان داده شده در شکل (۳-۶) داده می شود[۳۸]. این مدل متشکل از یک مدل بینگهام در سری هایی با یک مدل استاندارد جامد خطی است. معادله مشخصه چنین مدلی به صورت زیر داده می شود:

<sup>&</sup>lt;sup>84</sup> Gamota and Filisco Model



شکل (۳-۶) مدل پیشنهادی توسط گاموتا و فیلیسکو [۳۸]

$$F = k_{1}(x_{2} - x_{1}) + c_{1}(\dot{x}_{2} - \dot{x}_{1}) + f_{0}$$
  
=  $c_{0}\dot{x}_{1} + f_{c}sign(\dot{x}_{1}) + f_{0}$   
=  $k_{2}(x_{3} - x_{2}) + f_{0}$  |F| >  $f_{c}$  (Y-Y)

$$F = k_1 (x_2 - x_1) + c_1 \dot{x}_2 + f_0$$

$$= k_2 (x_3 - x_2) + f_0$$

$$|F| \prec f_c$$

$$(f-T)$$

که در آن  $c_0$  ضریب میرایی مدل بینگهام،  $k_1$  و  $k_2$  و  $c_1$  نیز از جسم جامد خطی گرفته شده اند. توجه شود که هنگامیکه  $f_c \to |F|$  است. باز هم پارامتر های مدل در (۲–۳) و (۲–۴) برای تطبیق بر داده های ۸۵ هرتز نشان داده شده در شکل (۳–۱)، انتخاب شده اند. برای حالتی که ولتاژ در (منبع جریان) برابر ۱/۵ ولت است، پارامتر های انتخاب شده در جدول(۳–۱) نشان داده شده است :

 $c_0 = 5000 \text{ N.sec/cm}$  $k_1 = 5 \times 10^4 \text{ N/ cm}$  $c_1 = 1300 \text{ N.sec/cm}$  $k_2 = 2 \times 10^6 \text{ N/ cm}$  $f_c = 670 \text{ N}$  $f_0 = -95 \text{ N}$ 

جدول (۳-۱) پارامترهای انتخابی برای مدل گاموتا و فیلیسکو [۳۶]

مقایسه ای بین پاسخهای پیش بینی شده و پاسخ های تجربی مربوط، در شکل (۳–۷) نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود، این مدل بر خلاف مدل بینگهام، توانایی نشان دادن رفتار نیرو-سرعت میراگر را به خوبی دارا می باشد.



شکل(۳–۷) مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدل گاموتا و فیلیسکو با نتایج تخمین زده شده [۳۶]

با این حال معادلات مشخصه (۳-۳) و (۳-۴) بسیار سخت و غیر انعطاف پذیر هستند و این مسأله، کاربرد آنها را در روشهای عددی مشکل می کند. انتگرال گیری عددی معادلات (۳-۳) و (۳-۴) برای پارامتر های داده شده، به بازه زمانی<sup>۸۵</sup> از درجه <sup>۶</sup>- ۱۰ ثانیه نیاز دارد. ابهامات عددی این مدل، مهمترین نقطه ضعف آن است. [۳۸]

۳-۴-۳) مدل باس- ون<sup>۴۸</sup>

مدلی که از نظر عددی مشکلی ندارد و بطور گسترده برای مدل سازی سیستم های هیسترتیک استفاده شده است، مدل باس-ون است. این مدل کاملاً چند کاربردی است و توانایی نشان دادن بازه بزرگی از رفتار هیسترتیک را داراست. نمای کلی این مدل در شکل (۲–۸) نشان داده شده است[۶۱].



شکل(۸-۲) مدل میراگر MR باس- ون[۶۱]

نیرو در این سیستم توسط معادله زیر داده می شود:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0 (x - x_0) + \alpha z \tag{(\Delta-T)}$$

که متغیر 
$$z$$
 به صورت زیر تعریف می شود:

$$\dot{z} = -\gamma \left| \dot{x} \right| z \left| z \right|^{n-1} - \beta \dot{x} \left| z \right|^n + A \dot{x}$$
(9-7)

<sup>85</sup> Time step

<sup>&</sup>lt;sup>86</sup> Bouce-Wen Model

نیروی  $f_0$  مربوط به مخزن می تواند بطور مستقیم بصورت تغییر شکل لحظه ای  $x_0$  برای فنر خطی  $k_0$  به مدل اضافه شود. برای تطابق مدل باس-ون با پاسخهای اندازه گیری شده تجربی میراگر، شکل(۳–۱)، پارامتر های مدل بصورت جدول (۳–۲) تعیین می شوند:

جدول(۳–۲) پارامترهای انتخابی برای مدل باس-ون [۳۶]

$\alpha = 880 \text{ N/cm}$	$\gamma = 100 \text{ cm}^{-2}$
n = 2	$\beta = 100 \text{ cm}^{-2}$
$c_0 = 50 \text{ N.sec/cm}$	$x_0 = 3.8 \text{ cm}$
$k_0 = 25$ N/cm	A = 120

مقایسه ای بین پاسخ های پیش بینی شده و داده های تجربی، در شکل (۳-۹) نشان داده شده است[۳۶].



مدل باس- ون، رفتار نیرو-جابجایی میراگر را بخوبی پیش بینی می کند و رفتاری را ارائه می دهد که بیشتر به پاسخ های تجربی نزدیک است. با این حال پاسخ غیر خطی نیرو-سرعت مدل، نحوه عملکرد آنرا در ناحیه ای که شتاب و سرعت هم علامتند و مقدار سرعت ها کوچک است، بخوبی نشان نمی دهد. (مثل مدل بینگهام)

(Spencer et al.) مدل پیشنهادی اسپنسر و همکارانش (Spencer et al.) به صورت  
برای پیش بینی بهتر پاسخ میراگر در این ناحیه، نسخه بهبود یافته سیستم در شکل (۳–۸)، به صورت  
شکل (۳–۱۰) پیشنهاد شده است[۳۶]. برای رسیدن به معادلات مشخصه این مدل، تنها بخش پایینی  
مدل را در نظر بگیرید. نیروها در هر یک از طرفین میله صلب مساوی هستند، بنابراین:  
$$c_1 \dot{y} = \alpha z + k_0 (x - y) + c_0 (\dot{x} - \dot{y})$$

که متغیر z به صورت زیر تعریف می شود:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y})$$
(A-T)



شکل(۳–۱۰) مدل مکانیکی پیشنهادی اسپنسر برای میراگر MR[۳۶]

از حل (۲-۲) برای y داریم:

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y) \}$$
(9-7)

نیروی کلی تولید شده توسط سیستم با جمع کردن نیروها در قسمتهای بالایی و پایینی سیستم در شکل (۳-۱۰) بصورت زیر بدست می آید:

$$F = \alpha z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) + k_1 (x - x_0)$$
 (1.-7)

با توجه به رابطه (۳-۷) نیروی کلی را میتوان به صورت ذیل نیز محاسبه کرد:

$$F = c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_0) \tag{11-7}$$

در این مدل سختی مخزن با  $k_1$  و میرایی ویسکوز در بیشترین سرعت با C<sub>0</sub> نشان داده شده است. C<sub>1</sub> اثر جمع شدگی را نشان می دهد که در داده های تجربی در سرعتهای پایین وجود دارد.  $k_0$  برای کنترل سختی در سرعت های بالا و x<sub>0</sub> جابجایی لحظه ای فنر  $k_1$  را نشان می دهد. پارامترهای مدل در معادلات (۳–۹) و (۳–۱۰) به صورت زیر انتخاب می شوند[۳۶]:

$\alpha = 963 \text{ N/cm}$	$\gamma = 200 \text{ cm}^{-2}$
$c_0 = 53$ N.sec/cm	$k_1 = 5.4$ N/cm
$k_0 = 14$ N/cm	$\beta = 200 \text{ cm}^{-2}$
$c_1 = 930 \text{ N.sec/cm}$	n = 2
A = 120	$x_0 = 3.8 \text{cm}$

مقایسه ای بین پاسخ های پیش بینی شده مدل و داده های تجربی در شکل (۲–۱۱) نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود، این مدل رفتار میراگر را در تمام نواحی بسیار خوب پیش بینی می کند.



شکل(۳–۱۱) مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی اسپنسر با نتایج تخمین زده شده [۳۶]

علاوه بر نتایج مشخص شده در نمودارها که حاکی از برتری این مدل بر مدل های قبلی است، یک مطالعه کمی از خطاها بین هر مدل و داده های تجربی انجام شده است. برای هر مدل، خطا بین نیروی پیش بینی شده و نیروی به دست آمده به عنوان تابعی از زمان، جابجایی و سرعت در طول دو سیکل کامل محاسبه شده است؛ اصطلاحات زیر برای نشان دادن خطاها به کار می رود:

$$E_{t} = \frac{\varepsilon_{t}}{\sigma_{F}} \quad , \qquad E_{x} = \frac{\varepsilon_{x}}{\sigma_{F}} \quad , \qquad E_{\dot{x}} = \frac{\varepsilon_{\dot{x}}}{\sigma_{F}} \tag{11-7}$$

$$E_{t} = \frac{\varepsilon_{t}}{\sigma_{F}} \qquad (11-7)$$

$$E_{t} = \frac{\varepsilon_{t}}{\sigma_{F}} \qquad (11-7)$$

$$\varepsilon_t^2 = \int_0^T \left(F_{\exp} - F_{pre}\right)^2 dt \tag{17-7}$$

$$\varepsilon_x^2 = \int_0^T \left(F_{\exp} - F_{pre}\right)^2 \left|\frac{dx}{dt}\right| dt$$
(14-7)

$$\varepsilon_{\dot{x}}^{2} = \int_{0}^{T} \left( F_{\exp} - F_{pre} \right)^{2} \left| \frac{d\dot{x}}{dt} \right| dt$$

$$\sigma_{F}^{2} = \int_{0}^{T} \left( F_{\exp} - \mu_{F} \right)^{2} dt$$
(18-7)
(18-7)

خطاهای نرمال شده حاصل در جدول (۳-۴) داده شده اند. در تمام موارد خطاهای محاسبه شده برای مدل اخیر به شکل قابل توجهی کوچکتر از مقادیر محاسبه شده برای مدل های دیگر است؛ که نشان می دهد این مدل پیشنهادی بر سایر مدل های میراگر MR که قبلاً در نظر گرفته شده بود ارجحیت دارد.

Model	$E_t$	$E_x$	$E_{\dot{x}}$
Bingham Model	0.154	0.0398	0.133
Gamota and Filisko Model	0.196	0.0717	0.300
Simple Bouc-Wen Model	0.167	0.0585	0.135
Proposed Bouc-Wen Model	0.0351	0.0228	0.0455

جدول(۳–۴) نرم های خطا برای مدلهای میراگر MR [۳۶]

پارامتر هایی که تا اینجا آورده شد بر اساس پاسخ میراگر در حالت ولتاژ ثابت و در نتیجه میدان مغناطیسی ثابت بود. با اینحال عملکرد بهینه یک سیستم کنترلی که از چنین وسیله ای استفاده می کند هنگامی بهبود می یابد که میدان مغناطیسی متناوباً بر اساس پاسخ اندازه گیری شده تغییر کند. در مرحله بعدی یک حالت عمومی سازی برای مدل کردن وسیله هنگامی که میدان مغناطیسی و جابجایی ها تابع هایی منحصر به فرد از زمان هستند، در نظر گرفته می شود. از آنجایی که مدل اسپنسر بیشترین تطابق را با داده های تجربی دارد، از این مدل استفاده می کنیم.

۵-۳) تعمیم مدل پیشنهادی اسپنسر برای میدانهای مغناطیسی متغیر با زمان

برای بدست آوردن مدلی که برای میدان مغناطیسی متغیر مناسب است، می بایستی تابعی وابستگی پارامتر ها به ولتاژ یا جریان اعمالی مشخص شود. برای مثال تنش جاری شدن مایع MR مستقیماً به قدرت میدان مغناطیسی بستگی دارد بنابراین پارامتر α در معادلات (۳–۹) و (۳–۱۰)، تابعی از ولتاژ اعمالی در نظر گرفته می شود. از روی نتایج تجربی نشان داده شده در شکل (۳–۱) به نظر می رسد که سطح ثابت تنش جاری شدن با ولتاژ اعمالی تغییر می کند و مقدار اولیه غیر صفر دارد. بخشی از این مقدار اولیه به مایع بر می گردد و بخشی نیز به اصطکاک بین پیستون و میله مربوط می شود. ثابت های میرایی ویسکوز نیز به صورت خطی با ولتاژ اعمالی تغییر می کند؛ بنابراین معادلات به شکل زیر فرض می شود:

 $\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad , \quad c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}u \quad , \quad c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (1 \forall - \forall)$ 

که خصوصیت دینامیکی سیال MR تا رسیدن به تعادل رئولوژی، با فیلتر درجه اول زیر داده می شود: $\dot{u} = -\eta(u-v)$ 

۷ ولتاژ اعمالی به مخزن است. مقادیر بهینه هر یک از ۱۴ پارامتر نام برده شده، باید برای یک مدل مشخص MR تعیین شود. برای بدست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای فوق، یک بهینه سازی خطی توسط اسپنسر انجام شد[۳۶]. بهینه سازی با بکارگیری الگوریتم برنامه ریزی درجه دوم که در نرم افزار MATLAB قابل دسترس است صورت گرفت و نتایج در جدول (۳–۵) آورده شده است:

Parameter	Value	Parameter	Value
$C_{0a}$	21 N.sec/cm	$lpha_{ m a}$	140 N/cm
$C_{0b}$	3.50 N.sec/cm.V	$lpha_{ m b}$	695 N/cm.V
$\mathbf{K}_{0}$	46.9 N/cm	γ	363 cm <sup>-2</sup>
$C_{1a}$	283 N.sec/cm	β	363 cm <sup>-2</sup>
C <sub>1b</sub>	2.95 N.sec/cm.V	А	301
$K_1$	5 N/cm	n	2
$X_0$	14.3 cm	η	190 sec <sup>-1</sup>

جدول(۳–۵) پارامترهای مدل تعمیم یافته[۳۶]

برای نشان دادن کارایی این مدل که از پارامتر های جدول (۳–۵) استفاده می کند، آنرا تحت یک آزمایش به شرح زیر قرار داده و نتایج را با نتایج تجربی مقایسه می کنیم؛

این آزمایش شامل اعمال یک جابجایی مثلثی به میراگر می باشد. سرعت نسبتاً ثابت است و ولتاژ به صورت پله ای از صفر تا ۲/۲۵ ولت در میانه بازه تغییر می کند. جابجایی و ولتاژ اعمالی در شکل (۳–۱۲) نشان داده شده است[۳۶].



شکل(۳-۱۲-۱) نمودار جابجایی اعمالی بر حسب زمان



هنگامیکه پله در ولتاژ رخ می دهد، انتظار می رود نیروی اندازه گیری شده به مقدار جدیدی جهش داشته باشد و در همان جا بماند. شکل (۳–۱۳) پاسخ های پیش بینی شده را با پاسخ های تجربی برای ورودی نشان داده شده در شکل (۳–۱۲) مقایسه می کند.



شکل(۳–۱۳) مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدل تعمیم یافته اسپنسر با نتایج تخمین زده شده [۳۶]

همانطور که دیده می شود مدل بطور موُثری رفتار وسیله را پیش بینی می کند. مقادیر خطا داده شده در معادله (۳–۱۱) به صورت زیر بدست می آید:

 $E_x = 0.118$  ,  $E_x = 0.260$  ,  $E_t = 0.286$ همچنین این آزمایش مشخص می کند که میراگر تقریباً در مدت ۶ میلی ثانیه پس از اعمال ولتاژ پله ای به تعادل رئولوژی می رسد.

> ۳–۶) کارهای انجام شده برای بررسش نقش میراگر در سازه و مطالعه رفتار آن ابتدا به مدلسازی میراگر می پردازیم.

۳–۶–۱) مدلسازی میراگر با استفاده از روش عموی اخیر، به مدلسازی میراگر MR پرداختیم. مدلسازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شد. پارامترهای استفاده شده در مدل مطابق جدول (۳–۵) انتخاب می شود با این تفاوت که برای از بین بردن انحراف اولیه<sup>۸۷</sup> ناشی از حضور مخزن، جابجایی اولیه میراگر (x0) برابر صفر درنظر گرفته شد.

جابجایی و ولتاژ اعمال شده در شکل (۳–۱۴) نشان داده شده است که سعی شده بیشترین تطابق را با ورودیهای مدل (شکل ۳–۱۲)، داشته باشد.

<sup>87</sup> Initial offset



شکل(۳-۱۴) ورودی های بکار رفته برای میراگر MR

شکل (۳–۱۵) مدل میراگر شبیه سازی شده در MATLAB را نشان می دهد.



شکل(۳–۱۵) شبیه سازی انجام شده در MATLAB برای میراگر MR



نتایج بدست آمده در شکل (۳-۱۶) آورده شده است.



شکل(۲–۱۶) نتایج بدست آمده از شبیه سازی میراگر MR

۳-۶-۲) نتیجه گیری:

همان طور که دیده می شود، نتایج نمودار نیرو بر حسب زمان و جابجایی بر حسب زمان تطبیق بسیار خوبی با نتایج مدلسازی اسپنسر [۳۶] (شکل ۳–۱۳) دارد. نظر به جلوگیری از سختی محاسبات و اتلاف وقت، جابجایی مثلثی بکار رفته در شبیه سازی ما دارای نقاطی غیر مشتق پذیر و تیز می باشد، در صورتی که جابجایی اعمال شده در مدل اسپنسر [۳۶] ، فاقد قله های تیز و در تمام نواحی مشتق پذیر است. به همین دلیل پاسخ نمودار سرعت-زمان بدست آمده (شکل ۳–۱۹) اختلاف جزئی با نتیجه شبیه سازی اسپنسر [۳۶] دارد.

فصل چهارم

كنترل مقاوم

**۱-۴**) مقدمه

تحلیل و طراحی سیستمها و فرآیندها از جمله مهمترین مسائل علم کنترل به شمار می رود. قدم اول در این مسئله مدلسازی می باشد که هدف آن یافتن مدل تجربی یا ریاضی مناسبی است که در بررسی ها و محاسبات جایگزین سیستم یا فرآیند واقعی<sup>۸۸</sup> شود.

به دلایل مختلف از جمله طبیعت پیچیده و غیر خطی سیستمها، عدم استفاده از مدلهای پیچیده در محاسبات و همچنین تغییر احتمالی مشخصات سیستمها یا فرآیندها، مدلهای انتخاب شده هر گز به طور دقیق بر سیستم اصلی منطبق نیستند، بنابراین وجود عدم قطعیت در مدل سیستمها امری بدیهی به نظر می رسد.

با توجه به این حقیقت، در علم کنترل مبحثی به نام کنترل مقاوم<sup>۸۹</sup> مطرح می گردد. هدف کنترل مقاوم در حقیقت تحلیل و طراحی سیستم به گونه ای است که در دنیای واقعیت و به هنگام مواجه شدن با عدم قطعیت<sup>۹۰</sup> عملکرد مطلوب خود را حفظ نماید.

با توجه به روشها و نظریات مطرح شده در کنترل می توان روند پیشرفت علم کنترل را از لحاظ تاریخی به سه دوران تقسیم بندی کرد.

دوران اول که در محدوده سالهای ۱۹۳۰ تا ۱۹۶۰ میلادی واقع شده است، به دوران کنترل کلاسیک مشهور می باشد. تکنیکهای آنالیز این دوران عبارت بودند از نمودارهای بود<sup>۹۱</sup>، نایکوئیست<sup>۹۲</sup> و مکان ریشه ها<sup>۹۴</sup>. کنترل کننده های متداول این دوران ها<sup>۹۳</sup>. کنترل کننده های متداول این دوران بودند. این روشها هنوز هم در دنیای صنعت کاربرد فراوانی دارند.

- <sup>90</sup> Uncertainty
- <sup>91</sup> Bode
- <sup>92</sup> Nyquist

- <sup>94</sup> Lead controller
- <sup>95</sup> Lag controller

<sup>88</sup> Actual process

<sup>89</sup> Robust control

<sup>&</sup>lt;sup>93</sup> Root locus

دوران دوم که بین سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ میلادی بوده و به دوران کنترل مدرن معروف شده است به <sup>۹۷</sup> LQR <sup>۱۹</sup> تکنیکهای آنالیز و طراحی فضای حالت<sup>۹۹</sup> اختصاص دارد. روشهای طراحی این دوران از جمله LQR <sup>۱۹</sup> بخاطر عدم توجه به مساله عدم قطعیت در مدل سیستمها در دنیای واقعیت با مشکلات متعددی روبرو هستند. دوران سوم کنترل که به دوران کنترل مقاوم مشهور می باشد از حدود سالهای ۱۹۸۰ آغاز شد. روشهای معرفی شده در این دوران با توجه به در نظر گرفتن مساله عدم قطعیت به تدریج جای خود را در صنعت با مشکلات متعددی روبرو مستند. دوران سوم کنترل که به دوران کنترل مقاوم مشهور می باشد از حدود سالهای ۱۹۸۰ آغاز شد. روشهای معرفی شده در این دوران با توجه به در نظر گرفتن مساله عدم قطعیت به تدریج جای خود را در صنعت باز می کنند.

#### ۲-۴)) ضرورت استفاده از روشهای کنترل مقاوم

بسیاری از روشهای متداول تحلیل و طراحی کنترل سیستمها همچون روشهای کلاسیک و بهینه بر مبنای مدل نامی سیستمها پایه گذاری شده اند. بنابراین در صورت بروز هر گونه تغییر و انحراف از مدل نامی ممکن است کنترل کننده نتواند عملکرد مطلوبی داشته باشد.

در بعضی از روشهای مذکور اثر تغییر پارامترهای سیستم تا حدودی در نظر گرفته می شود، اما چون به عنوان یک هدف اصلی در تحلیل یا طراحی سیستم دنبال نمی شود، کارایی این روشها را فقط در برابر تغییرات سیگنال کوچک<sup>۹</sup> تضمین می نماید.

مدلهایی که برای نمایش سیستمهای واقعی شبیه سازی می شوند، بدلایل مختلف رفتار کاملا منطبقی با رفتار سیستم واقعی ندارند و بدیهی است که یک روش تحلیل یا طراحی در صورتی کاربرد عملی خواهد داشت که به انواع اغتشاشات<sup>۹۹</sup> ورودی سیستم، منابع عدم قطعیت و انحرافات موجود در مدل سیستم توجه کافی داشته باشد. این مساله باعث پدید آمدن مفهوم کنترل مقاوم شد.

<sup>&</sup>lt;sup>96</sup> State-space

<sup>&</sup>lt;sup>97</sup> Linear Quadratic Regulator

<sup>&</sup>lt;sup>98</sup> Small signal

<sup>99</sup> Disturbances
کنترل مقاوم در حالت کلی عبارت است از تحلیل و طراحی کنترل کننده های ثابت برای مدل نامی سیستم را در بر سیستمها در حضور اغتشاشات و عدم قطعیتهای مختلف. لذا کنترل مقاوم تنها مدل نامی سیستم را در بر نمی گیرد بلکه به مجموعه ای از مدلهای سیستم توجه می کند که از ترکیب مدل نامی با انحرافات و عدم قطعیتهای مدل بوجود می آید.

کنترل مقاوم به دو بخش اصلی تحلیل و طراحی تقسیم می شود. در تحلیل دو نگرش کلی وجود دارد: ۱- فرض بر این است که دامنه و یا ساختار عدم قطعیتها مشخص می باشد و لذا هدف تحلیل، تحقیق پایداری و عملکرد مناسب در حضور کلیه عدم قطعیتهای مجاز سیستم می باشد.

۲- فرض می شود که ساختار احتمالی عدم قطعیتها مشخص می باشد بنابراین هدف تحلیل یافتن حداکثر عدم قطعیتهای مجاز سیستم می باشد به شرطی که پایداری و عملکرد سیستم حلقه بسته در حد مطلوب حفظ شود.

این نگرش گاه تحت عنوان محاسبه حاشیه پایداری و عملکرد نیز مطرح می گردد. حسن عمده این نگرش این است که با کمک آن می توان قابلیت و کارایی روشهای مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود. تئوری تحلیل مقادیر تکین با ساختار µ قادر است با هر یک از این دو نگرش فوق عمل تحلیل را انجام دهد.در مساله طراحی هدف آن است که با در نظر گرفتن محدوده و ساختار عدم قطعیت در سیستم، کنترل کننده ای بیابیم که در حضور عدم قطعیتهای مجاز علاوه بر تضمین پایداری حلقه بسته مشخصه های عملکردی مطلوبی نیز داشته باشد.

تئورری کنترل ∞H و µ هر دو این هدف را در طراحی دنبال می کنند، اما برتری روش µ نسبت به روشمای دیگر کنترل مقاوم مانند ∞H بهینه این است که محافظه کاری کمتری دارد. در اینجا بطور مختصر می توان منابع و عوامل عدم قطعیت در سیستم را بصورت ذیل بر شمرد: ۱- عدم تعیین دقیق پارامترهای مدل بعلت محدودیتهای اندازه گیری و محاسبات ۲- ساده سازی و کاهش درجه مدلها از طریق حذف دینامیکهای کم اهمیت و سریع
۳- غیر خطی بودن معادلات و خطای ناشی از خطی سازی
۴- عدم شناخت کافی از سیستم فیزیکی و در نتیجه بروز خطا در مدلسازی بعلت دینامیکها و تاخیرات مدل نشده سیستم
۵- صرفنظر کردن از دینامیکها و تاخیرات مدل و عملگرها و سنسورها در خارج از حوزه فرکانسی دلخواه(بدلیل مدل سازی سیستمها در باند فرکانسی معین و محدود)
۶- تغییر نقطه کار سیستم و در نتیجه تغییر پارامترها و ساختار آن
۲- خطای سنسورها یا تخمین گرهای حالت در انجام سریع و دقیق فرمان اعمالی به آنها
۲- خطای سنسورها یا تخمین گرهای حالت در انجام سریع و دقیق فرمان اعمالی به آنها
۲- خطای محاسبات در تحلیل و طراحی و تاخیر در زمان محاسبه
۲- خطای محاسبات در تحلیل و طراحی و تاخیر در زمان محاسبه
۲- خطای محاسبات در تعیش بیش بینی نشده
۲- خطای محاسبات در این قسمت به معرفی چند روش رایج کنترل مقاوم به ترتیب آنالیز ۹ LQG و برای ساختار متغیر ۱۰ پرای یک سازه با در اینها محاسبه

آزادی و لحاظ کردن اثر دمپرها ارائه خواهیم کرد.

<sup>&</sup>lt;sup>100</sup> Variable structure

 $\mu$  کنترل مقاوم ( $\pi$ -۴)

۴-۳-۱) مقدمه

در سال ۱۹۸۲، دویل<sup>۱۰۱</sup> به معرفی مقادیر تکین<sup>۱۰۲</sup> با ساختار پرداخت[۱]. این مقادیر ابزاری برای تحلیل و طراحی کنترل کننده مقاوم برای سیستمهای خطی می باشد و پایداری و عملکرد مقاوم را به صورت مستقیم و در حضور عدم قطعیتهای سیستم بررسی می نماید.

کاربرد µ برای حالتی مطرح شد که عدم قطعیت در یک ماتریس و به صورت قطری-بلوکی مدل شود. هر چند اخیراً روشهایی برای مدل سازی عدم قطعیت ساختار کامل و غیر قطری ارائه گردیده است که مدل کامل عدم قطعیت قطری-بلوکی استاندارد حالت خاصی از آن محسوب می شود.

در نگاه اول ممکن است مساله µ با ساختار غیر استاندارد مشکل به نظر آید ولی براحتی می توان آنرا به شکل استاندارد باز آرایی نمود. البته در نظر گرفتن مدل ساختار کامل که بطور مجزا برای هر یک از مولفه های ماتریس تابع تبدیل سیستم عدم قطعیت در نظر می گیرد حجم محاسبات را بالا می برد ولی محافظه کاری در طراحی کنترل کننده را به حداقل می رساند.

این مساله در حالتی صادق است که سیستم دارای عدم قطعیت بی ساختار باشد یعنی اکثر عناصر ماتریس تابع تبدیل سیستم دارای عدم قطعیت باشند. در حالتی که فقط عناصر روی قطر اصلی این ماتریس دارای عدم قطعیت و تغییرات بقیه عناصر قابل صرفنظر باشد عدم قطعیت با ساختار خواهد بود و در این حالت مدل عدم قطعیت ساختار کامل با مدل عدم قطعیت بی ساختار و با ساختار برابر خواهد شد و بنابراین محافظه کاری وجود نخواهد داشت. عدم قطعیت با ساختار تنها در حالتی امکان پذیر است که تعداد ورودیها و خروجیهای ماتریس عدم قطعیت مدل برابر و ماتریس آن مربعی و در نتیجه عدم قطعیت هر خروجی تنها تابعی از یک ورودی متناظر باشد.

<sup>&</sup>lt;sup>101</sup> Doyle

<sup>&</sup>lt;sup>102</sup> Singular value

برخی محققین برای کاهش حجم محاسبات حالت ضعیف تری را نسبت به حالت ساختار کامل برای مدل سازی در نظر می گیرند. بدیهی است که در این حالت میزان محافظه کاری افزایش می یابد. بدین ترتیب حالت استاندارد قطری-بلوکی بیشترین محافظه کاری را نسبت به حالت دیگر مدلسازی عدم قطعیت خواهد داشت، اما سرعت محاسبات را افزایش می دهد.

متاسفانه معمولا نمی توان µ را بطور دقیق محاسبه نمود ولی برای بدست آوردن حدود بالا و پایین آن روشهای مختلفی ارائه گردیده است.

با این همه، محافظه کاری روش µ نسبت به روشهای دیگر کنترل مقاوم مانند m∞ بهینه کمتر می باشد و به راحتی توانایی تحلیل و طراحی کنترل کننده برای انواع سیستمها در حضور عدم قطعیت بی ساختار و با ساختار را داراست.

# ۴-۳-۴) مروری بر کارهای گذشته

در همان سالی که ،دویل به معرفی µ پرداخت، حاشیه های پایداری<sup>۱۰۳</sup> سیستم چند متغیره<sup>۱۰۴</sup> با فیدبک و با فرض عدم قطعیت قطری بررسی و در سال بعد شروط عدم قطعیت برای پایداری مقاوم تشریح شد. اما اولین سنتز µ به منظور طراحی کنترل کننده در سال ۱۹۸۵ و با استفاده از روش تکرار D-K توسط دویل صورت پذیرفت[۲].

درهمان سال با استفاده از روشهای محاسبه مقادیر ویژه<sup>۱۰۵</sup> و تکین، شروط لازم و کافی برای پایداری سیستمهای دارای عدم قطعیت با ساختار بیان گردید. در این مقالات عدم قطعیت ساختار کامل در نظر گرفته شده است. اما برای بررسی شروط، حالت ضعیف تری اعمال گردیده است.

<sup>&</sup>lt;sup>103</sup> Stability margin

<sup>&</sup>lt;sup>104</sup> Multivariable system

<sup>&</sup>lt;sup>105</sup> Eigen value

 $\mu$  در سال ۱۹۸۶ چهارچوب هندسی برای توصیف و حل مسئله  $\mu$  ارائه شد. در این روش فهم مسئله  $\mu$ محسوس تر گردید و محدوده مقدار  $\mu$  با اشکل هندسی ترسیم شد. در همان سال روشی کارآمد برای محاسبه  $\mu$  به همراه گسترش خواص و مفاهیم آن ارائه شد.

[۳] به محاسبه دقیق حاشیه های پایداری سیستم چند متغیره در سال ۱۹۸۸ پرداخت و همزمان روش محاسبه µ در حالتی که بلوکهای اسکالر تکراری باشند ارائه گردید. پس از آن روش قدرتمندی برای محاسبه µ ارائه و گام موثری در بدست آوردن مقادیر دقیق آن برداشته شد[۴].

عدم قطعیت ممکن است از بلوکهای حقیقی یا مختلط و یا مخلوطی از آن دو تشکیل شده باشد. در سال ۱۹۹۰ روشی برای محاسبه µ در حضور عدم قطعیتهای حقیقی و مختلط بیان شد. اولین نرم افزاری که مباحث تحلیل و طراحی، µ را برای بررسی سیستمها بکار گرفت در سال ۱۹۹۱ توسط چند تن از معروف ترین محققان این رشته ارائه گردید. این نرم افزار جعبه ابزار tools می باشد که تحت MATLAB اجرا می شود. در همان سال تحلیل مقاوم در حضور عدم قطعیتهای غیر قطری و پارامتری بیان شد.

تحقیقی که µ را از طریق تعداد کاهش یافته ای از متغیرهای بهینه بدست می آورد در سال ۱۹۹۲ ارائه شد. یک مقاله آموزشی طولانی در سال ۱۹۹۳ منتشر شد که در آن مروری بر همه مباحث مقادیر تکین با ساختار با تاکید بر چشم انداز ریاضی آن بصورت دسته بندی شده ارائه گردید[۵].

در این مقاله مباحث محدودیتهای محاسبه µ، روشهای آنالیز مقاوم بودن<sup>۹٬۰</sup> µ برای سیستمهای خطی، خواص مقاوم بودن سیستمهای دارای فیدبک خطی، تستهای پایداری و عملکرد مقاوم، روشهای مدلسازی سیستمها برای آنالیز و سنتز مقاوم، مساله طراحی µ، کاربرد LFT و مقایسه روشهای حوزه فرکانسی و فضای حالت بیان گردیده است.

<sup>&</sup>lt;sup>106</sup> Robustness

در سال ۱۹۹۴ ثابت شد که همیشه محاسبه دقیق µ امکان پذیر نیست و در بعضی از نقاط تحلیل ممکن است هرگز به مقدار اصلی µ دسترسی پیدا نکنیم، لذا تلاش ها بر روی محاسبه حدود بالا و پایین آن متمرکز شد.

در سال ۱۹۹۵ حدود  $\mu$  مخلوط محاسبه و در سال بعد خواص آن تشریح گردید. ارائه ویژگیها و طریقه محاسبه  $\mu$  در حالت ساختار کامل گامی بلند در رفع محافظه کاری در روش  $\mu$  بود که در سال ۱۹۹۶ در مقاله ای از چن<sup>۱۰۷</sup> به چاپ رسید[۶].

بعلت بحث سنگین این روش، صرفا به مطالعه آن پرداخته و وارد جزئیات نمی شویم.

## ۴-۴) طراحی کنترل کننده LQG <sup>۱۰۸</sup>

# ۴-۴-۱) مقدمه: فیلتر کالمن، تئوری موفق در کاربردهای مختلف

فیلتر کالمن<sup>۱۰۹</sup> در عمل یکی از موفق ترین روشهای تخمین می باشد. بحث مبسوطی را در این زمینه در کتب مربوط به کنترل دیجیتال می توان یافت که روئیتگرهای متغیر با زمان و بهینه را مورد بررسی قرار می دهد.

فیلتر کالمن در سال ۱۹۹۴ به عنوان موفق ترین یا کارآمد ترین تئوری در میان تئوریهای متنوع کنترل در انجمن علمی IEEE برگزیده شد. این تئوری که توسط کالمن در سال ۱۹۶۰ به سختی به عنوان پایان نامه دکتری پذیرفته شد و چند بار برای چاپ در مجلات مورد داوری مردود شناخته شد، پس از ۳۵ سال و پس از بکارگیری موفق در کاربردهای مختلف تئوری تخمین<sup>۱۱۰</sup>، ناوبری<sup>۱۱۱</sup> و هدایت، پردازش

- 107 Chen
- <sup>108</sup> Linear Quadratic Gaussian
- <sup>109</sup> Kalman Filter
- <sup>110</sup> Estimation Theory
- <sup>111</sup> Navigation

سیگنال<sup>۱۱</sup>٬ پردازش تصویر<sup>۱۱</sup>۳ و پیش بینی و رفع خطا<sup>۱۱۴</sup> به این درجه اعتبار نائل گردید. اما دلایل این موفقیت در دو اصل این تئوری نهفته است که به آن می پردازیم.

## الف)عدم نياز به مدل دقيق و مقاوم بودن

اگر در فرمول بندی مسئله دقت کنیم، با توجه به وجود ۵، w و درنظر گرفتن نویز فرآیند یا عدم قطعیت آن و نویز اندازه گیری، رویتگر بهینه ای با توجه به این عدم قطعیتها w طراحی می شود که واریانس خطای تخمین را کمینه کند. حال در صورتی که w را بزرگتر از ۵ در نظر بگیریم، این بدان معناست که اطلاعات ما از مدل کم بوده ولی فیدبک اطلاعاتی که از خروجی می گیریم دقیق است.

با این ترتیب با عدم تکیه به مدل و با اعمال درجه اعتبار بیشتر نسبت به اطلاعات ورودی، تخمین گر بهینه به خوبی عمل خواهد نمود. از طرف دیگر اگر خروجیها با نویز بسیاری همراه بوده و یا از درجه اعتبار زیادی برخوردار نباشند، در صورتی که بتوان مدل مناسبی برای فرآیند استخراج نمود، باز هم به تخمین متغیر های حالت سیستم و یا فیلتر کردن بهینه خروجیها نائل خواهیم شد.

# ب)عدم محدودیت در اجرا

حل رویتگر بهینه، مانند کنترل بهینه است، اما از لحاظ پیاده سازی با یکدیگر اختلاف اساسی دارند. در کنترل کننده بهینه محصول محاسبات بهره فیدبک حالت k می باشد که به صورت U=-kx بر روی سیستم واقعی بایستی پیاده سازی شود.

<sup>&</sup>lt;sup>112</sup> Signal processing

<sup>&</sup>lt;sup>113</sup> Image processing

<sup>&</sup>lt;sup>114</sup> Fault detection

از طرف دیگر عملگر ها عموما دارای محدودیت دامنه و فرکانس عملکرد می باشند و لذا نمی توان بهره فیدبک را به اندازه دلخواه بزرگ نمود و بدین ترتیب سرعت عملکرد پاسخ را نمی توان به شکل مطلوب و بدون محدودیت تنظیم نمود. در صورتی که در پیاده سازی فیلتر کالمن، کلیه عملیات لازم برای تحقق فیلتر بر روی میکروپروسسور با کامپیوتر صورت می گیرد و لذا هیچگونه محدودیت فیزیکی در افزایش بهره رویتگر و تنظیم سرعت همگرائی خطای تخمین وجود ندارد. لذا در این طراحی تنها مصالحه بین بهره رویتگر و تنظیم سرعت همگرائی خطای تخمین وجود ندارد. لذا در این طراحی میها مصالحه بین تنظیم معمولا طراحی فیلتر کالمن به صورت بهینه پاسخگوی کاربردهای متعددی می باشد.

در این قسمت به بررسی روشهای طراحی بر مبنای تئوری کنترل بهینه و در این میان LQG می پردازیم. نکته قابل توجه اینکه ما در اینجا تنها به نتایج اساسی حاصل از این قضیه توجه می نماییم که برای جزئیات بیشتر می توان به سیوان<sup>۱۱</sup>، اندرسون و موری<sup>۱۱</sup>، دیویس و وینتر<sup>۱۱</sup>، کنفرانس برق آمریکا۱۱۸، استروم و ویتنمارک۱۱۹، فرانکلین و پاول۱۲۰، بانکس۱۲۱ و بسیاری از کارهای دیگر اشاره نمود[۸-۷].

۴-۴-۲) طراحی

فرض کنید که نمایش فضای حالت سیستمی به صورت ذیل داده شده باشد. (۴–۱)

 $\dot{X} = AX + BU + \Gamma w$ y = CX + vZ = MX

<sup>115</sup> Sivan

<sup>&</sup>lt;sup>116</sup>Anderson & Moori

<sup>&</sup>lt;sup>117</sup>Davis & Vinter

<sup>&</sup>lt;sup>118</sup> IEEE

<sup>&</sup>lt;sup>119</sup> Astrom & Wittenmark

<sup>&</sup>lt;sup>120</sup> Franklin & Powell

<sup>121</sup> Banks

که در رابطه اخیر U بردار سیگنال کنترلی، y بردار خروجی های اندازه گیری شده (اما آغشته به نویز) و Wو U نویزهای سفید (فرآیندهای اتفاقی گوسی با میا نگین صفر) می باشند که با زمان غیر همبسته بوده ، ولی ممکن است با یکدیگر همبسته باشند. در این حالت داریم:

$$E\left\{ww^{T}\right\} = w \ge 0$$
 ,  $E\left\{vv^{T}\right\} = V \succ 0$  (۲-۴)  
خاطر نشان می گردد که در این بخش فرض کرده ایم که Wو U با یکدیگر غیر همبسته بوده و به بیان  
دیگر:

$$E\left\{wv^{T}\right\} = 0 \tag{\mathcal{T}-\mathcal{F}}$$

مسئله کنترلی در در اینجا پیشنهاد یک قانون کنترل فیدبکی جهت مینیمم کردن تابع هزینه ذیل می باشد.

$$J = \lim_{T \to \infty} E \left\{ \int_{0}^{T} \left( Z^{T} Q Z + U^{T} R U \right) dt \right\}$$
(f-f)

که Z ترکیب خطی از حالت سیستم و  $0 \prec R=R$ ,  $0 \le Q^T$  ماتریسهای وزنی می باشند. حل مسئله LQG با توجه به اصل مجزاسازی<sup>۱۲۲</sup> به دو مرحله تفکیک می گردد. در مرحله اول ابتدا یک تخمین بهینه  $\hat{X}$  از حالت X توسط تئوری کالمن فیلتر بدست می آوریم، به گونه ای که تخمین بهینه  $\hat{X}$  از حالت X مینیمم گردد. شکل(۴–۱) بلوک دیاگرام مربوط به فیلتر کالمن را نشان می دهد که ساختاری همانند یک رویتگر دارد. وجه تمایز رویتگر مزبور با دیگر رویتگرها در انتخاب ماتریس بهره K<sub>f</sub> می شود.

<sup>&</sup>lt;sup>122</sup> Separation Principle



مرحله دوم استفاده از تخمین  $\hat{X}$  برای حل مسئله کنترل درجه دوم خطی دترمنیستیک می باشد. برای این منظور فرض کنید که  $(\Delta-4)$   $(\Sigma^{T}QZ + U^{T}RU)dt$   $U = -K_{c}X$  (V-4)  $U = -K_{c}X$  (V-4) (V-4)

. بی رو بر رو بی رو بی رو بی بر رو بی بر و بسیاری از ساختارهای ممکن در دنیای واقعی وجود دارد که هیچکدام از آنها را نمی توان به آسانی با یک نمایش ریاضی نشان داد. در این حالت نیز می توان از LQG به عنوان روشی برای طراحی کنترلر ترکیبی بهره جست با این تفاوت که ماتریسهای we ve Qe Re ای که در فرمولاسیون ظاهر می گردند بعنوان پارامترهای تنظیم کننده<sup>۱۲۳</sup> مورد توجه واقع می شوند. به بیان دیگر این ماتریسها باید بگونه ای تنظیم گردند که یک طراحی رضایت بخشی حاصل گردد. بلوک دیاگرام مربوط به طرح مزبور در شکل(۴–۲) نمایش داده شده است.

<sup>123</sup> Tuning Parameter

<sup>124</sup> Positive semi definite



شکل(۴–۲)

مختلفی برای حل معادلات ریکاتی(۴–۹) و (۴–۱۱) وجود دارند که در اینجا تنها به روش اشاره شده توسط مک فارلن<sup>۱۲۵</sup> و پاتر<sup>۱۲۶</sup> اشاره می کنیم که مزیت تنها، نیازمندیهای مربوط به جبر خطی را دارد[۹]. برای این منظور ماتریس همیلتونین<sup>۱۲۷</sup> (با ابعاد 2*n*×2*n* که در آن n تعداد متغیرهای حالت می باشد) را در نظر بگیرید.

$$H = \begin{bmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -M^T QM & -A \end{bmatrix}$$
(1Y-F)

ماتریس فوق دارای این خاصیت است که اگر  $\lambda$  یک مقدار ویژه آن باشد آنگاه  $\lambda$ - نیز برای آن به تعداد مشابه وجود دارد. اینک فرض کنید u ماتریس بردارهای ویژه H به گونه ای تنظیم گردد که سمت چپ ترین n ستون، منطبق با مقادیر ویژه با قسمتهای حقیقی منفی و سمت راست ترین n ستون منطبق با مقادیر ویژه با قسمتهای حقیقی مثبت باشد. (اگر (A,B,Q<sup>1/2</sup>M) مینیمال باشد، H هیچ مقدار ویژه ای بر روی موهومی ندارد). اینک U را به قسمتهای  $n \times n$  تبدیل می کنیم.

<sup>&</sup>lt;sup>125</sup> MacFarlane

<sup>&</sup>lt;sup>126</sup> Potter

<sup>&</sup>lt;sup>127</sup> Hamiltonian matrix

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix}$$
(1 $\Upsilon$ - $\Upsilon$ )

بنابراین حل معادله (۴–۹) بصورت ذیل داده می شود.  

$$P_c = U_{2l}U_{11}^{-1}$$
 (۱۴–۴)  
همچنین اگر A با A با TA، B با TO، R بوسیله V و M<sup>T</sup>QM بوسیله TWT جایگزین گردد و الگوریتم مشابهی  
بکارگیریم به نتایج مشابهی برای معادله (۴–۱۱) می رسیم. بایستی توجه نمود اگر (A, $\Gamma$ W<sup>1/2</sup>,C) مینیمال  
باشد، آنگاه هیچ مقدار ویژه ای بر روی موهومی وجود ندارد.  
اگر رابطه( ۴–۷) را در (۴–۵) جایگزین نماییم خواهیم داشت:  
 $\dot{X} = (A - BK_c) X$  (10–1)  
همانطور که دیده می شود معادله اخیر حاکی از آن است که ریشه های  $(A - BK_c)$ ، مقادیر ویژه نیم

صفحه چپ H بوده که خود حاکی از پایداری مجانبی طرح فیدبک حالت خواهد بود. با در نظر گرفتن معادلات مربوط به فیلتر کالمن داریم:

$$\varepsilon = X - \hat{X} \tag{1A-F}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_c & BK_c \\ 0 & A - K_f C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma W \\ \Gamma W - K_f v \end{bmatrix}$$
(19-F)

رابطه اخیر نشان می دهد که مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته جبران شده-LQG اجتماع مقادیر ویژه طرح فیدبک حالت بهینه و طرح فیلتر کالمن بوده و لذا طرح کلی بطور داخلی پایدار می باشد (تحت شرایط مفروض).

4-4) کنترل ساختار متغیر

## ۴–۵–۱) مقدمه

برای اولین بار در دهه ۶۰ میلادی محققین روسی تئوری کنترل لغزشی<sup>۱۲۸</sup> را با استفاده از کاربرد ریاضی فیلیپوف<sup>۱۲۹</sup> مطرح نمودند[۱۰]. بعد از انتشار اولین مقالات در زمینه کنترل لغزشی، لیست کارهای مرتبط با آن بنحوی افزایش یافت که هم اکنون از جایگاه خاصی در هر دو کنترل خطی و غیر خطی برخوردار می باشد. مولفین بسیاری این طرح را به صورت پیوسته زمان و گسسته زمان بررسی کرده اند که اهداف

ریشه اصلی کنترل ساختار متغیر تئوری بنگ بنگ کنترل بوده و به این علت ساختار متغیر نامیده می شود که ساختار کنترلر به طور دلخواه و مطابق با یک سری از قوانین، برای به دست آوردن رفتار مطلوب سیستم تغییر داده می شود و همین امر باعث غیر خطی بودن قانون کنترل منتجه می گردد. قانونی که بر تغییر ساختار کنترلر نظارت می کند بوسیله توابعی از متغیرهای حالت، انتخاب شده بوسیله

تمامی این کارها کنترل مقاوم سیستمهای خطی و غیر خطی مختلف بوده است [۱۹–۱۱].

طراح، داده می شود. هنگامی که این معادله به صفر تنظیم شد، تابع مورد نظر، سطحی را در فضای حالت تعریف می کند که به آن سطح لغزش گفته می شود و این سطح بر عمل کلیدزنی کنترلر نظارت می کند.

<sup>&</sup>lt;sup>128</sup> Sliding Mode Control (SMC)

<sup>129</sup> Filippov

به بیان ساده تر، هدف قانون کنترل در اینجا، نگه داشتن حالات سیستم بر روی سطح مورد نظر است، تازمانی که سیستم حتی در حضور عدم قطعیتهای پارامتری واغتشاشات به نقطه تعادل برسد. این استراتژی از دو دیدگاه برای کاربردهای کنترل سازه مهم می باشد: ۱- این روش نیازمند دانش دقیقی از مدل سازه و میراگر نیست. ۲-تحت شرایط خاصی، عملکرد سسیستم به اغتشاشات خارجی کراندار غیر حساس می باشد. اهمیت این خواص به این دلیل است که محاسبه دقیق دینامیک میراگر مشکل بوده و بعلاوه، اثر بارهای اعمال شده به سازه را می توان به عنوان اغتشاشات خارجی در طراحی کنترلر لحاظ کرد.

## ۴–۵–۲) مروری بر کارهای گذشته

اخیرا کنترل سازه ها به سرعت در هر دو زمینه تئوری و عملی رشد پیدا کرده است. ایزولاسیون نوسانات با بکارگیری

تکیه گاه های لاستیکی<sup>۳۰</sup> یکی از رایجترین روشهای کنترل غیر فعال نوسانات می باشد. همچنین روشهای کنترلی نیمه فعال در بسیاری ازکارهای قبلی مطالعه شده است.

یوشیدا و فوجی<sup>۱۳۱</sup> یک روش کنترلی نیمه فعال که ضریب میرایی ویسکوز برای کتنرل نوسانات تغییر می کرد ارائه نمودند[۱۵].

محققین کاربرد کنترلرهای فعال را جهت ایزوله کردن سازه از نوسانات القا شده از طریق زلزله پیشنهاد دادند که در این میان می توان به میراگر جرمی تنظیمی ترکیبی فعال-غیز فعال<sup>۱۳۲</sup> پیشنهادی توسط

<sup>&</sup>lt;sup>130</sup> rubber bearing

<sup>&</sup>lt;sup>131</sup> Yoshida and Fujio

<sup>&</sup>lt;sup>132</sup> active–passive composite tuned mass damper

فوکوشیما<sup>۱۳۳</sup> اشاره کرد که جهت کاهش اثرات باد و نوسانات حاصل از زلزله در ساختمانهای بلند بکار می رفت[۱۶].

نظر به وجود عدم قطعیتهایی همچون نوسانات پارامتری، اغتشاشات خارجی، نیروی اصطکاک و دینامیکهای مدل نشده<sup>۳۳</sup> در ساختمان ها و پارامترهای سیستم، روشهای کنترلی مقاوم برای کنترل فعال سازه پیشنهاد داده شدند[۸۸–۱۷]. دان چو<sup>۳۵</sup> کاربرد مود لغزشی را برای پایدار سازی یک سیستم تعلیق الکترومغناطیسی بهمراه نتایج تجربی ارائه داد[۱۹]. نکته قابل توجه در این روش ایجاد نوسانات فرکانس بالا<sup>۹۳</sup> است که موجب تخریب اجزا مکانیکی می شد. برای همین منظور سابانوویک<sup>۹۳</sup> یک روش سودمند برای کاربردهای کنترل مود لغزشی با نوسانات فرکانس بالای آزاد ارائه داد[۲۰]. از اولین کاربردهای مود لغزشی در زمینه مهندسی سازه می توان به کار یانگ<sup>۱۳۸</sup> اشاره نمود[۲۲–۲۱].

از آنجایی که سازه های واقعی دارای ترمهای غیر خطی هستند این روش امروزه از اهمیت ویژه ای برخوردار است[۲۴–۲۳]. همچنین یاگیز<sup>۱۳۹</sup> کاربرد مود لغزشی را برای یک سیستم سازه با ATMD پیشنهاد داد[۲۵].

## ۴-۵-۳) فرمولاسیون مسئله

با توجه به توضیحات مختصر ارائه شده در بالا مراحل طراحی کنترل لغزشی به شرح ذیل بیان می گردد. فرض کنید که معادلات مربوط به سیستم در فضای حالت به فرم ذیل داده شده باشد.

 $\dot{X} = AX + BU + \Delta b(x)$ ,  $|\Delta b(x)| \le k$  (Y - F)

<sup>&</sup>lt;sup>133</sup> Fukushima et al

<sup>&</sup>lt;sup>134</sup> Un-modeled dynamic

<sup>&</sup>lt;sup>135</sup> Dan cho

<sup>&</sup>lt;sup>136</sup> Chattering

<sup>&</sup>lt;sup>137</sup> Sabanovic

<sup>&</sup>lt;sup>138</sup> Yang

<sup>&</sup>lt;sup>139</sup> Yagiz

انتخاب مجموعه ای از m تابع بردار حالت سیستم می باشد. اینک یک خروجی جدید به نام تابع سوئیچ  
کننده همانند ذیل تعریف می کنیم. شکل سطح مزبور در (۴–۳) آورده شده است.  

$$s = \lambda X$$
 (۲۱–۴)  
در رابطه اخیر  $\lambda$  اسکالر بوده و بیانگر بردار شیب سطح لغزش برای نیروی کنترلی می باشد. با تنظیم  
معادله (۴–۲۱) به صفر و گرفتن مشتق زمانی آن همانند (۴–۲۲) داریم:  
 $\dot{s} = \lambda \dot{X}$  (۲–۲۲)  
 $c + (7-1)$  به صفر و گرفتن مشتق زمانی آن همانند (۴–۲۲) داریم:  
 $\dot{s} = \lambda \dot{X}$  (۲–۲۲)  
 $\dot{s} = \lambda \dot{X}$  (۲–۲۲)  
 $\dot{s} = x^T \lambda^T \lambda X > 0$  (۲–۴)  
 $V = \frac{1}{2}s^Ts = \frac{1}{2}X^T \lambda^T \lambda X > 0$  (۲–۴)  
 $V = \frac{1}{2}s^Ts = \frac{1}{2}X^T \lambda^T \lambda X > 0$  (۲–۴)  
 $\dot{V} = s\dot{s} = s(\lambda AX + \lambda BU)$  (۲–۴)  
 $\dot{V} = s\dot{s} = s(\lambda AX + \lambda BU)$  (۲–6)  
 $\dot{V} = \delta \text{ for } s = 0$   
 $\dot{S} = \delta \text{ for } s = 0$ 

با این فرض که $\Delta b(x)$  بیانگر عدم قطعیت موجود می باشد. گام اول در طراحی کنترلر ساختار متغیر،

$$u\begin{cases} \prec \beta(x) & \text{for } s \succ 0 \\ = \beta(x) & \text{for } s=0 \\ \succ \beta(x) & \text{for } s \prec 0 \end{cases}, \quad \beta(x) = -(\lambda B)^{-1} \lambda AX$$
(19-4)
$$\beta(x) = -(\lambda B)^{-1} \lambda AX$$
(20)
$$\beta(x) = -($$

$$U = -(\lambda B)^{-1} \lambda A X - \eta (\lambda B)^{-1} sign(s)$$
(YY-F)

قسمت اول بردار ورودی کنترلی تضمین کننده آن است که حالت سیستم بر روی سطح لغزش باقی می ماند و از صفر قرار دادن رابطه (۴–۲۴) تعیین می گردد. قسمت دوم نیز برای جبران عدم قطعیتها و اغتشاش است به نحوی که حالت سیستم به سمت سطح لغزش رانده شود.

نکته قابل توجه آن است که  $\eta > 0$  بوده و توسط باند اغتشاش تعیین می گردد. ساختار سیستم شامل میراگر MR و سازه و کنترلر در شکل (۴–۴) نشان داده شده است.



شکل(۴-۳) سطح لغزش



شکل(۴-۴) بلوک دیاگرام مربوط به سیستم شبیه سازی شده

در اینجا به عنوان نمونه به یکی از روشهای تعیین بردار کنترلی  $\beta(x)$  اشاره می کنیم. روشهای متعددی همچون LQR جایابی قطب و ... وجود دارد که ما تنها به روش LQR اکتفا می نماییم. با انتخاب تابع هزینه مشابه (۴–۶) و انتخاب ماتریس های وزنی Q وR ، و حل مسئله LQR بردار کنترلی  $\beta(x)$  بصورت ذیل بدست خواهد آمد.

$$\beta(x) = -FX \tag{(1.4)}$$

اگر پاسخ سیستم بر روی سطح لغزش که از (۴–۲۶) بدست آمد با رابطه اخیر معادل نماییم، بهره فیدبک F بصورت

$$F = \left(\lambda B\right)^{-1} \lambda A \tag{79-F}$$

بوده و در نتیجه ماتریس لغزش λ را می توان به راحتی از رابطه اخیر محاسبه نمود. در عمل اجرای کنترل کننده های ساختار متغیر به لرزش کنترل<sup>۱۴۰</sup> با فرکانس بینهایت می انجامد. در این حالت تاخیر کوچک، اما غیر صفر در کلید زنی کنترل باعث می شود که به هنگام کلید زنی، مسیر اندکی از سطح کلید زنی خارج شود. لازم بذکر است که ناپیوستگی بزرگتر کنترل، لرزش کنترل بیشتری را در پی خواهد داشت.

بنابراین مصالحه روشنی بین عدم قطعیت بیش از مقدار ورودی کنترلی و اندازه طبیعت کنترل وجود دارد. اما نکته حائز اهمیت این است که در برخی حالات، لرزش باعث تحریک مدهای فرکانس بالا شده و دینامیک مدل نشده در سیستم را تحریک می کند که منجر به از دست رفتن کیفیت عملکرد می شود. اما در بعضی حالات، کنترل می تواند برای کلید زنی در یک فرکانس خارج از فرکانسهای تشدید سیستم برقرار گردد و لرزش قابل قبول است. یک روش موجود برای غلبه بر اثرات نامطلوب لرزش کنترل، معرفی

<sup>&</sup>lt;sup>140</sup> Control chatering

لایه مرزی در اطراف سطح لغزش و تقریب کنترل کلید زنی بوسیله یک کنترل پیوسته داخل این لایه مرزی است.

#### References

- Doyle, J.C., "Analysis of feedback system with structured uncertainty," IEEE proc. Part D, Vol. 129, pp. 242-250, 1982.
- Doyle, J.C., "Structured Uncertainty in Control System Design," Proc. 24th Conf.on Decision and Control, Fort Lauderadale, Florida, pp. 260-265. 1985.
- Packard, A.K. and Doyle, J.C., "Structured singular value with repeated scalar blocks, "Proc. American Control conf. Atlanta, Georgia, pp. 1213-1218, 1988.
- 4. Maciejowski, J. M., "Multivariable feedback design," 1989.
- Packard, A.K. and Doyle, J.C., "the Complex structured singular value," Automatica, Vol. 29, pp. 71-109, 1993.
- Chen, J. and et al, "Structured singular values with non-diagonal structures: Charactrization and computation," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 41, pp. 1507-1516, 1996.
- Davis M.H.A. and Vinter R.B., "Stochastic Modelling and Control.," London: Chapman & Hall, (1985).
- IEEE (1971). "Specical Issue on the LQE Problem," IEEE Transactions on Automatic Control, AC-16, 527-869.
- 9. Potter, J.E., "Matrix quadratic solutions," Siam Journal on Applied Mathematics, 14, pp. 496-501, 1966.
- Filippov, A.F., "Differential Equations with Discontinuous Right Hand Sides," Am. Math. Soc. Transl., vol. 42, pp. 199-231, 1964.
- Monsees, G., "Discrete-Time Sliding Mode Control," Thesis, 2002. ISBN 90-77017-83-6.

- 12. Wai, R.J., Lin, C. M., Hsu, C.F., "Adaptive fuzzy sliding-mode control for electrical servo drive," Fuzzy Sets and Systems 143.pp.295–310, 2004.
- Lin, C.K., "Nonsingular Terminal Sliding Mode Control of Robot Manipulators Using Fuzzy Wavelet Networks," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 14, No. 6, December 2006.
- Gao, W., Wang, Y. and Homaifa, A., "Discrete-Time Variable Structure Control Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no. 2, pp. 117-122, April 1995.
- Yoshida, K. and Fujio, T., "Semi-active base isolation for a building structure," in: Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conference, Nevada, 1999.
- 16. Fukushima, T., Kobori, M., Sakamoto, N., Koshika, I., Nishimura, K., and Sasaki, "Vibration control of a tall building using active-passive composite tuned mass damper," Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, 1996.
- Ohniki, O., Nonami, K., Nishimura, H. and Ariga, Y., "Sliding mode control of multi-degree-of-freedom structure by means of sensorless active dynamic vibration absorber," Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, 1996.
- Guclu, R., "Fuzzy logic control of vibrations of analytical multi-degree-of-freedom structural systems," Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences 27 (3),pp. 157–167, 2003.
- 19. Dan Cho, D., "Experimental results on sliding mode control of an electromagnetic suspension," Mechanical Systems and Signal Processing 7 (4), pp. 283–292, 1993.
- Sabanovic, A., "Chattering free sliding mode," 1st Turkey Automatic Control Symposium, Istanbul, 1994.
- Yang, J.N., Li, Z., Wu, J.C. and Young, K.D., "A discontinuous control method for civil engineering structures," 9th VPI&SU Symposium on Dynamics and Control of Large Structures, Blacksburg, VA, pp. 167–180, 1993.

- 22. Yang, J.N., Wu, J.C., Agrawal, A.K. and Hsu, S.Y., "Sliding mode control with compensator for wind and seismic response control," Earthquake Engineering and Structural Dynamics 26 (11), pp. 1137–1156, 1997.
- 23. Adhikari, R. and Yamaguchi, H., "Sliding mode control of buildings with ATMD," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.26, pp. 409–422, 1997.
- Singh, M.P. and Matheu, E.E., "Active and semi-active control of structures under seismic excitation," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 193–213, 1997.
- 25. Yagiz, N., "Sliding mode control of a multi-degree-of-freedom Sstructural Ssystem with Aactive Ttuned Mmass Ddamper," Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Vol. 25, pp. 651–657, 2001.

26. Dyke, S.J., Spencer Jr. B.F., Quast, P. and Sain, M.K., "The Role of

Control Structure Interaction in Protective System Design," J. Engng. Mech., ASCE, Vol.

121, Pages 322-338

فصل پنجم

# معرفی روش بهینه مدلسازی سازه ومیراگر (MR)

در این فصل به مطالعه مدل سازی میراگر MR در یک سازه آزمایشی مدل<sup>۱۴۱</sup> سه طبقه با بکار گیری روش رویتگر<sup>۱۴۲</sup> یا کنترل بهینه<sup>۱۴۳</sup> پرداخته و کارآیی میراگر را در کم کردن پاسخ های سازه کنترل شده در مقایسه با حالت بدون میراگر بررسی خواهیم کرد.

سپس به مدل سازی همان سازه با بکار گیری روش کنترل مود لغزشی<sup>۱۴۴</sup> می پردازیم و نتایج را با روش اسپنسر و همکارانش مقایسه می کنیم.

### ۵-۱) مقدمه:

در سال های اخیر توجه خاصی به موضوع کنترل سازه ها شده است. سیستم هایی که در کنترل سازه ها استفاده می شود بطور کلی شامل سیستم های کنترلی فعال، غیر فعال، هایبرید و نیمه فعال می باشند. سیستم کنترل فعال نیاز به انرژی زیادی برای عکس العمل در برابر نیروهای جانبی نظیر باد و زلزله دارد. سیستم غیر فعال نیاز به انرژی زیادی برای عکس العمل در برابر نیروهای جانبی نظیر باد و زلزله دارد. سیستم غیر فعال نیز دارای محدودیت هایی می باشد. به عنوان مثال توان مقابله با ارتعاشات شدید را ندارد و در یک محدوده خاص از ارتعاشات کارآیی دارد. سیستم نیمه فعال مشکلات جانبی هر دو سیستم ندارد و در یک محدوده خاص از ارتعاشات کارآیی دارد. سیستم نیمه فعال مشکلات جانبی هر دو سیستم ندارد و در یک محدوده خاص از ارتعاشات کارآیی دارد. سیستم نیمه فعال مشکلات جانبی هر دو سیستم ندارد و در یک محدوده خاص از ارتعاشات کارآیی دارد. سیستم نیمه فعال مشکلات جانبی هر دو سیستم ندارد و در یک محدوده خاص از ارتعاشات کارآیی دارد. سیستم نیمه فعال مشکلات جانبی هر دو سیستم ندارد و در یک محدوده خاص از ارتعاشات کارآیی دارد. سیستم نیمه فعال مشکلات جانبی هر دو سیستم ندارد و در یک محدوده خاص از ارتعاشات کارآیی دارد. سیستم نیمه فعال مشکلات جانبی هر دو سیستم برای را بر طرف کرده است؛ یعنی با انرژی کم کار می کند و عملکرد آن به ارتعاشات پایین محدود نیست. در میان سیستم های کنترلی مگنتو رئولوجیکال،MR، یکی از سیتری وسائل کنترلی هستند. عکس العمل سریع، مصرف انرژی خیلی کم میراگر های MR به همراه بهترین وسائل کنترلی هستند. عکس العمل سریع، مصرف انرژی خیلی کم میراگر های MR به همراه سادگی تجهیزات و هزینه کم نگهداری این میراگر، آنها را به سیستم های بسیار مناسب برای کاربرد در کنترل سازه ها تبدیل کرده است.

<sup>&</sup>lt;sup>141</sup> Test Structure

<sup>142</sup> Observer Method

<sup>&</sup>lt;sup>143</sup> Clipped Optimal Control

<sup>&</sup>lt;sup>144</sup> Sliding Mode Control (SMC)

در این فصل به مدلسازی میراگر در سازه می پردازیم و موثر بودن آن را در کاهش پاسخ سازه به دو روش کنترلی بررسی می کنیم، نظر به عدم دسترسی به آزمایشگاه سازه دقیق، از مشخصات سازه مورد آزمایش اسپنسر و همکارانش استفاده می کنیم[۲۶].

۵-۲) معرفی سازه مورد آزمایش:

سازه مورد آزمایش در شکل (۵–۱) نشان داده شده است. این سیستم یک سازه آزمایشی سه طبقه است که در مطالعات کنترلی قبلی نیز در آزمایشهای دینامیک سازه و کنترل آزمایشگاه مهندسی زلزله،<sup>۱۴۵</sup>(SDC/EEL)، در دانشگاه نتردام<sup>۱۴۶</sup> توسط آقای اسپنسر و همکارانش استفاده شده است. مشخصات این سازه بطور کامل در مرجع [۲۶] آمده است.



<sup>&</sup>lt;sup>145</sup> (Structural and Dynamic Control/Earthquake Engineering Library)

<sup>&</sup>lt;sup>146</sup> (Notre Dame)

## شکل(۵-۱) سازه مورد آزمایش و طریقه نصب میراگر MR [۳۷]

همانطور که در شکل نشان داده شده است، یک میراگر MR بین طبقه اول و زمین قرار دارد؛ بنابراین تغییر مکان آن با تغییر مکان طبقه اول مساوی است(x = x<sub>1</sub>). میراگر MR مورد استفاده، میراگر مدل سازی شده در فصل ۳ است که پارامترهای آن در جدول (۳-۳) تعریف گردیده است.

سنسورهایی بین طبقه اول تا طبقه سوم نصب شده اند که شتاب های مطلق طبقات و همچنین جابجایی میراگر را اندازه گیری می کنند؛ با داشتن این تغییر مکان ها و نیروی اندازه گیری شده در مرحله قبلی، نیروی کنترلی مورد نیاز که بایستی به سازه وارد شود محاسبه می گردد.

# ۵-۳) معرفی روش مدل سازی رویتگر<sup>۱۴۷</sup>:

مهمترین قسمت کار مدلسازی، چگونگی مدل سازه و اتصال میراگر به آن می باشد. به این منظور باید مشخصات سازه و میراگر را بصورت مناسب با برنامه کنترلی تلفیق کرد. در این قسمت از یک کنترلر بهینه<sup>۱۴۸</sup> استفاده می کنیم. دیاگرام یلوکی این روش کنترلی در شکل (۵–۲) نشان داده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>147</sup> Observer Method

<sup>&</sup>lt;sup>148</sup> Clipped Optimal Control



شکل(۵-۲) دیاگرام بلوکی سیستم کنترلی بهینه [۳۷]

امروزه بیشتر روش های معمول کنترل فعال سازه در برابر زلزله، بر اساس یکی از دو روش زیر عمل می کنند:

 ۱) فیدبک کامل<sup>۱۴۹</sup>؛ که شامل اندازه گیری تمام جابجایی ها و سرعت های سازه است. اندازه گیری دقیق جابجایی ها و سرعت ها در کاربرد های عملی در مقیاس واقعی بسیار مشکل است؛ به خصوص در طول زلزله که پی ساختمان با زمین حرکت می کند.
 ۲) فیدبک شتاب<sup>۱۰۰</sup>؛ که شامل اندازه گیری شتاب سازه در نقاط مشخص است. از آنجایی که شتاب سنج ها توانایی اندازه گیری شتاب را بطور ساده تر و در هر نقطه دلخواه از سازه دارند، روش های کنترلی فیدبک شتاب به سرعت در حال توسعه هستند.

<sup>&</sup>lt;sup>149</sup> Full State Feedback

<sup>&</sup>lt;sup>150</sup> Acceleration Feedback

اساس کار این روش در حقیقت همان کنترل فیدبکی شتاب است. با این فرض که پاسخ های سازه در محدوده خطی باقی می ماند، معادله حرکت سازه را می توان به صورت زیر نوشت:

$$Msx^{-} + Csx^{-} + Ksx = \Gamma f - Ms\Lambda x^{-}g \quad (1-\Delta)$$

که در آن  $x^{"}s$  شتاب یک بعدی زمین است؛ f نیروی کنترلی اندازه گیری شده بین سازه و میراگر است. که از معادلات (۳–۱۰) و (۳–۱۱) قابل دستیابی است. x ، بردار جابجایی سه طبقه سازه است. ماتریسهای Cs، Ms و Cs، Ms نیز به ترتیب مربوط به جرم، میرایی و سختی سازه است. این مشخصات به طور کامل در ضمیمه ۱ آورده شده است. معادله (۱–۵) را در فضای حالت می توان به صورت زیر نوشت:  $z = Az + Bf + Ex^{"}_{s}$ 

#### (۲-۵)

که z بردار حالت است. معادله خروجی های اندازه گیری شده بصورت زیر داده می شود:y = Cz + Df + v (۳-۵)

که در آن y بردار خروجی های اندازه گیری شده و v بردار نویز اندازه گیری است. حال به طراحی کنترلر می پردازیم؛ بک کنترلر بهینه خطی  $K_c(s)$  به این صورت طراحی می شود که بر اساس بردار پاسخ اندازه گیری شده f و نیروی اندازه گیری شده f از مرحله قبل، نیروی کنترلی  $f_c$  را تولید می کند و با معادله زیر نشان داده می شود:

$$f_c = L^{-1} \{-K_c(s) L\left(\begin{bmatrix} y \\ f \end{bmatrix}\right)\}$$
 (4- $\Delta$ )

که در آن {L{0} تبدیل لاپلاس است.

نیروی تولید شده توسط میراگر MR قابل کنترل نیست؛ اما ولتاژ v اعمال شونده به مخزن قابل تغییر است. برای تحریک میراگر MR جهت تولید نیروی بهینه  $f_c$ ، سیگنال ولتاژ v به صورت زیر انتخاب می شود:

$$v = V_{\max} H\{(f_c - f)f\} \qquad (\Delta - \Delta)$$

که در آن  $V_{\max}$  ولتاژ مربوط به حالت اشباع میدان مغناطیسی در میراگر است و  $\{0\}H$  تابع پله ای هویساید می باشد. هنگامیکه میراگر نیروی کنترلی بهینه را تولید می کند،  $(f = f_c)$ ، ولتاژ باید در همین سطح بماند.اگر نیروی تولیدی میراگر کمتر از نیروی بهینه است و هر دو نیرو در یک جهت اند، ولتاژ اعمالی به مخزن به بالاترین سطح افزایش پیدا می کند تا نیروی تولیدی میراگر را افزایش دهد.در غیر این صورت، ولتاژ اعمالی صفر در نظر گرفته می شود.

الگوریتم انتخاب سیگنال ولتاژ بطور شماتیک در شکل (۵–۳) نشان داده شده است.



شكل(۵-۳) الگوريتم انتخاب سيگنال ولتاژ [۳۷]

۵-۴) مدلسازی و طراحی بر مبنای رویتگر:

هرچند که کنترل گر  $K_c(s)$  از روش های مختلفی قابل دستیابی است، در اینجا از روش LQG استفاده می شود. علت این انتخاب، کاربرد موفق این روش در سایر کاربردهای کنترل سازه است. اساس کار این روش، کنترل فیدبک شتاب است. شتاب زمین،  $x^{\circ}_{s}$ ، برای طراحی، نویز سفید در نظر گرفته می شود. تابع هزینه  $^{101}$  نیز به شکل زیر فرض

می شود:

$$J = \lim_{T} \frac{1}{T} E[\int_{0}^{T} \{ (Cz)'Q(Cz) + rf_{c}^{2} \} dt ] \qquad (\$-\Delta)$$

$$Q_{33}=1 \quad Q_{33}=1 \quad e^{-17}$$

معادله کنترلر به صورت زیر است:
$$K_{c}(s) = [sI - (A - LC)]^{-1}\hat{B}$$
 (۲-۵)

که در آن

$$K = B'P/r \quad g \quad \hat{B} = [L \quad B - LD] \qquad (\Lambda - \Delta)$$

P پاسخ معادله جبری ریکاتی زیر است:

$$0 = PA + A'P - PB'BP/r + C'QC \qquad (9-\Delta)$$

~
-
_
-
_

$$L = (CS)' \qquad (1 \cdot -\Delta)$$

و S پاسخ معادله جبری ریکاتی زیر است:

$$L = (CS)' \qquad (1 \cdot -\Delta)$$

<sup>&</sup>lt;sup>151</sup> performance inde

$$0 = SA' + AS - SC'CS + yEE' \quad (11-\Delta)$$

محاسبات K و L در نرم افزار MATLAB انجام شد.

بر این اساس مدلسازی در MATLAB انجام شد. دیاگرام مدل ساخته شده در شکل (۵-۴)قابل ملاحظه است:



شکل(۵-۴) مدلسازی سیستم سازه و میراگر به روش رویتگر

# ۵-۵)نتایج روش کنترلی رویتگر:

نتایج مدلسازی مرحله قبل در شکلهای زیر نشان داده شده است که جابجایی و شتاب طبقات را برای دو حالت کنترل شده

به رنگ آبی و کنترل نشده (بدون میراگر) را به رنگ قرمز نشان میدهد. همانطور که انتظار می رود پاسخ های سازه پس از نصب میراگر به شکل قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. برای اعمال جابجایی به سیستم از طیف زلزله ال سنترو ۱۹۴۰<sup>۱۵۲</sup> استفاده می شود. ولتاژ ورودی نیز مطابق معادله (۵–۵) وارد می شود. همانطور که در فصل ۳ شرح داده شد، ولتاژ سطح اشباع برای میراگر مدل شده، ۲/۲۵ ولت است.



شکل(۵-۴)ورودی جاجایی طرح، طیف زلزله El Centro

<sup>&</sup>lt;sup>152</sup> El centro N-S component,1940



شکل(۵-۶) مقایسه نتایج شتاب طبقه سوم به روش رویتگر







شکل(۵-۹) مقایسه نتایج جابجایی طبقه سوم به روش رویتگر

۵-۶) مدلسازی سازه و میراگر بر اساس روش مود لغزشی:
 ۱ساس کار این روش به طور کامل در فصل ۴ ذکر شده است، معادلات (۴-۲۰)تا(۴-۲۹)، در این مرحله سازه و میراگر را به روش کنترلی مود لغزشی مدلسازی می کنیم.
 ورودی های جابجایی و ولتاژ مطابق مرحله قبل است، (به ترتیب شکل های(۵-۴)و(۴-۴)). لازم بذکر است که در این مدل، ماتریسهای وزنی Q و R و مقادیر η و F به صورت ذیل در نظر گرفته شد:

 $F = \begin{bmatrix} -3.1640e + 010 & -2.2341e + 010 & -7.5201e + 008 & -2.5029e + 006 & -4.4832e + 008 & -3.8361e + 008 \end{bmatrix}$ (17- $\Delta$ )

بر این اساس مدلسازی در MATLAB انجام شد. دیاگرام مدل ساخته شده در شکل (۵–۱۰) قابل ملاحظه است:



شکل(۵-۱۰) مدلسازی سیستم سازه و میراگر به روش مود لغزشی
نتایج مدلسازی انجام شده در شکلهای زیر نشان داده شده است که جابجایی و شتاب طبقات را برای دو حالت کنترل شده

به رنگ آبی و کنترل نشده (بدون میراگر) را به رنگ قرمز نشان میدهد. این بار نیز پاسخ های سازه پس از نصب میراگر به شکل قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.



شكل(۵–۱۱) مقايسه نتايج شتاب طبقه سوم به روش مود لغزشي









شكل(۵-۱۳) مقایسه نتایج جابجایی طبقه دوم به روش مود لغزشی

شكل(۵-۱۴) مقایسه نتایج جابجایی طبقه سوم به روش مود لغزشی

همانطور که انتظار می رود، پاسخ های سازه در این روش نیز به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. در بخش بعدی به مقایسه دو روش کنترلی ذکر شده می پردازیم و خصوصیات آنها را بررسی می کنیم.

فصل ششم

نتيجه گيري

در فصل ۵ نشان دادیم که چگونه میراگر های نیمه فعال مگنتو رئولوجیکال،MR، عملکرد سازه را بهبود می دهند.

در این پایان نامه، از دو نوع سیستم کنترلی برای تحقیق رفتار میراگر MR استفاده شد. روش اول، روش روش روش روش این پایان نامه، از دو نوع سیستم کنترلی برای یک کنترلر بهینه خطی<sup>۱۵۵</sup> در ترکیب با یک حلقه کنترل نیرو<sup>۱۵۴</sup>، یا کنترل بهینه<sup>۱۵۴</sup> است. در این روش یک کنترلر بهینه خطی<sup>۱۵۵</sup> در ترکیب با یک حلقه کنترل بیرو<sup>۱۵۴</sup>، طراحی می شود تا ولتاژ مورد نیاز میراگر MR تنظیم گردد. این ولتاژ طوری تنظیم می شود که بتواند نیروی خروجی لازم برای میراگر را به درستی تخمین بزند.

از مزایای این روش این است که کنترلر بر اساس فیدبک شتاب<sup>۱۵۷</sup> عمل می کند که کاربرد عملی آن را در مقیاس واقعی ممکن می سازد همچنین کنترل شتاب سازه از نظر راحتی زندگی ساکنین، بسیار حائز اهمیت است.

روش دوم که در این رساله به آن پرداخته شد، استفاده از کنترل مود لغزشی<sup>۱۵۸</sup> می باشد. برای مقایسه بهتر، نتایج دو روش کنترلی و سازه کنترل نشده را یکجا می آوریم:

<sup>&</sup>lt;sup>153</sup> Observer Method

<sup>&</sup>lt;sup>154</sup> Clipped Optimal Control

<sup>&</sup>lt;sup>155</sup> Linear Optimal Controller

<sup>&</sup>lt;sup>156</sup> Force Feedback Loop

<sup>&</sup>lt;sup>157</sup> Acceleration Feedback

<sup>&</sup>lt;sup>158</sup> Sliding Mode Control (SMC)





شکل(۶–۲) مقایسه نتایج جابجایی طبقه دوم

شکل(۶-۳) مقایسه نتایج جابجایی طبقه سوم



شکل(۶–۴) مقایسه نتایج شتاب طبقه سوم

همانطور که دیده می شود صرفنظر از نوع سیستم کنترلی بکار رفته، میراگرهای MR نقش موثری در کاهش پاسخهای شتاب و جابجایی سازه دارند.

برای مقایسه بهتر روش مود لغزشی و روش مشاهده گر، نتایج این دو روش را به طور جداگانه در نمودارهای زیر بررسی می کنیم:



شکل (۶-۶)مقایسه نتایج جابجایی طبقه دوم به روش رویتگر و روش مود لغزشی



شکل(۶-۸)مقایسه نتایج شتاب طبقه سوم به روش رویتگر و روش مود لغزشی



شکل(۶-۹)مقایسه نتایج نیروی تولید شده میراگر به روش رویتگر و روش مود لغزشی از جمله خصوصیات میراگر MR که قبلا به آن اشاره شد، توانایی پاسخ سریع به تحریکات خارجی است. این مسأله با توجه به شکل (۶–۹) کاملا مشهود است. همانطور که دیده می شود، ماکزیمم پاسخ سازه در ۸/. ثانیه از اعمال زلزله اتفاق می افتد. در این لحظه نیرو افزایش پیدا می کند و سپس به سرعت کاهش می یابد.

از جمله مزایای روش مود لغزشی نسبت به روش رویتگر، می توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- در روش مود لغزشی ۵۰ درصد عدم قطعیت در مدل سیستم وارد کردیم که به همان پاسخ های روش رویتگر می رسیم. این امر نشان می دهد که روش مود لغزشی یک روش کنترلی مقاوم است که حاکی از قدرت این روش در دفع اغتشاشات ناخواسته و در این بین خطای مدلینگ می باشد. ۲- از معایب روش رویتگر، پیچیدگی محاسبات و مدل مبنا بودن روش مزبور است. به بیان دیگر با اعمال کمی اغتشاش ناخواسته در مدل سیستم روش مزبور دیگر جوابگو نخواهد بود. در صورتیکه در روش مد لغزشی با محاسباتی کمتر و در مدت زمان کوتاه تر به پاسخ مطلوب می رسیم.

۳- در محاسبه ماتریس مربوط به سطح لغزش، از روش های کنترل بهینه و فیدبک حالت استفاده می شود.

۴- به علت ماهیت غیر خطی سیستم مد لغزشی، این روش قابل اعمال برای سازه های واقعی است که در عمل مدلی غیر خطی بر آنها حاکم می باشد.

با توجه به مجموع عوامل بالا، استفاده از روش مود لغزشی برای مطالعه و تحلیل عملکرد میراگرهای نیمه فعال مگنتو رئولوژی در سازه ها پیشنهاد می شود.