

اللَّهُ الرَّحْمَنُ الرَّحِيمُ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

بررسی جداسازهای لرزه‌ای فعال

دانشجو: محسن برآبادی

استاد راهنما

دکتر علی کیهانی

استاد مشاور

دکتر رامین امینی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه

تیرماه ۸۹

تصویب نامه

تشکر و قدردانی

در ابتدا لازم می‌دانم از راهنمایی‌ها و زحمات بی‌دریغ و دلسوزانهٔ استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر کیهانی کمال تشکر را داشته باشم که مسلماً اگر راهنمایی‌ها و مساعدت‌های ایشان نبود این پایان‌نامه به ثمر نمی‌رسید.

همچنین از جناب آقای دکتر امینی که استاد مشاور اینجانب در این پایان‌نامه بودند و همیشه با برخورد شایسته، اینجانب را مورد عنایت و راهنمایی قرار می‌دادند، قدردانی می‌نمایم. در پایان از تمام دوستانی که تجارب خود را خالصانه با بنده به اشتراک می‌گذاشتند و یاور بنده بودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

تعهدنامه

چکیده

در این تحقیق تأثیر سیستم جداساز لرزه‌ای فعال بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های چند درجه آزادی تحت اثر دو نوع زمین‌لرزه حوزه‌نزدیک و حوزه‌دور، مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای یکی از موثرترین راه‌های کنترل ارتعاشات سازه و کاهش این ارتعاشات می‌باشد. از آنجاییکه سازه‌ها تحت تأثیر شرایط مختلف بارگذاری جانبی قرار می‌گیرند، استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای غیرفعال نمی‌تواند تأثیر ایده‌آلی بر روی سازه در شرایط مختلف داشته باشد؛ لذا به نظر می‌رسد استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای فعال راه‌حل مناسبی برای حل این مشکل ارائه دهد. الگوریتم‌های مختلفی برای کنترل سیستم‌های فعال وجود دارد که در این تحقیق از الگوریتم تنظیم‌کننده خطی درجه دوم (LQR) استفاده شده است. در ابتدا یک سازه پنج درجه آزادی مدل شده بوسیله نرم‌افزار MATLAB، در سه حالت بدون جداساز لرزه‌ای، با جداساز لرزه‌ای غیرفعال و با جداساز لرزه‌ای فعال و همچنین تحت تأثیر دو نوع زلزله حوزه‌دور و حوزه‌نزدیک مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت بدون جداساز لرزه‌ای و با جداساز لرزه‌ای غیرفعال، فرمول‌بندی ریاضی از طریق معادلات ماتریسی و در حالت با جداساز لرزه‌ای فعال، فرمول‌بندی از طریق معادلات فضای حالت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم کنترل فعال تأثیر مطلوبی بر کنترل لرزه‌ای سازه دارد. پس از آن برای بررسی عملکرد جداسازهای لرزه‌ای در سازه‌های بلندمرتبه، یک سازه چهارده درجه آزادی مورد مطالعه قرار گرفته و پاسخ‌های آن با سازه پنج درجه آزادی مقایسه شده است که نشان‌دهنده آن است که جداسازهای لرزه‌ای در سازه‌های بلندمرتبه تأثیر ایده‌آلی در کنترل لرزه‌ای سازه ندارند. لازم به ذکر است در روش LQR که الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد، برای بدست آوردن ماتریس‌های وزنی Q و R بهینه برای هر نوع زلزله و مدل متفاوت، بر روی ماتریس‌های وزنی مطالعه پارامتریک انجام شده و با توجه به خواسته‌های طراحی، Q و R تعیین شده است.

کلمات کلیدی: جداساز لرزه‌ای فعال، کنترل لرزه‌ای، زلزله حوزه‌نزدیک، زلزله حوزه‌دور، LQR.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه	۱
۱-۱ - طرح مسئله	۲
۱-۱-۱ - مقدمه	۲
۲-۱-۱ - مفاهیم	۴
۳-۱-۱ - اهمیت تکنولوژی سازه‌های هوشمند در علم عمران	۵
۲-۱ - انواع روش‌های حفاظت لرزه‌ای سازه	۷
۱-۲-۱ - روش سختی	۸
۲-۲-۱ - روش میرایی	۹
۳-۲-۱ - روش جداسازی	۱۵
۳-۱ - تاریخچه جداسازهای لرزه‌ای	۲۱
فصل دوم : کنترل لرزه‌ای	۲۵
۱-۲ - مقدمه	۲۶
۲-۲ - طبقه‌بندی روشهای کنترل لرزه‌ای	۲۷
۳-۲ - تجهیزات کنترل لرزه‌ای	۲۹
۴-۲ - کنترل لرزه‌ای فعال	۳۲

۳۴	فصل سوم : کنترل مدرن.....
۳۵	۱-۳ - مقدمه.....
۳۵	۲-۳ - مفاهیم.....
۴۰	۳-۳ - کنترل مقاوم.....
۴۱	۱-۳-۳ - تاریخچه.....
۴۲	۲-۳-۳ - ضرورت استفاده از کنترل مقاوم.....
۴۲	۳-۳-۳ - فرآیند تحلیل و طراحی در کنترل مقاوم.....
۴۳	۴-۳ - فیدبک حالت.....
۴۳	۱-۴-۳ - فرآیند طراحی کنترل کننده.....
۴۴	۲-۴-۳ - بررسی فیدبک حالت.....
۴۵	۳-۴-۳ - کنترل فیدبک حالت بهینه : LQR.....
۴۶	۵-۳ - رویتگر حالت [۱۰].....
۴۷	۱-۵-۳ - رویتگر مقدماتی.....
۴۸	۲-۵-۳ - رویتگر مرتبه کامل.....
۴۹	۳-۵-۳ - رویتگر بهینه : فیلتر کالمن.....
۵۲	فصل چهارم : مدلسازی و تحلیل نتایج.....
۵۳	۱-۴ - مقدمه.....
۵۵	۲-۴ - فرمول بندی ریاضی.....

۵۵	..... ۴-۲-۱ - معادلات ماتریسی
۵۸	..... ۴-۲-۲ - معادلات فضای حالت
۶۰	..... ۴-۳ - شبیه‌سازی مدل (Simulink)
۶۰	..... ۴-۳-۱ - حالت بدون جداساز لرزه‌ای (Fixed Structure)
۶۱	..... ۴-۳-۲ - حالت با جداساز لرزه‌ای غیرفعال (Passive BI)
۶۲	..... ۴-۳-۳ - حالت با جداساز لرزه‌ای فعال (Active BI)
۶۴	..... ۴-۴ - مطالعه پارامتریک ماتریس‌های وزنی Q و R
۸۱	..... ۴-۵ - بررسی نتایج تحلیل
۸۳	..... ۴-۵-۱ - تحلیل و بررسی نتایج بر روی مدل شماره ۱
۹۷	..... ۴-۵-۲ - تحلیل و بررسی نتایج بر روی مدل شماره ۲
۱۱۱	..... فصل پنجم : نتیجه‌گیری
۱۱۴	..... پیشنهادات
۱۱۵	..... مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مخزن مرتفع آب با تجهیزات میرایی ۶
- شکل ۲-۱: شمای کلی میراگر جرمی تنظیم شده ۱۰
- شکل ۳-۱: انواع میراگر جرمی تنظیم شده ۱۱
- شکل ۴-۱: انواع میراگر سیال تنظیم شده ۱۱
- شکل ۵-۱: میراگرهای اصطکاکی ۱۲
- شکل ۶-۱: میراگر اصطکاکی سومیتومو و جزئیات آن ۱۳
- شکل ۷-۱: نمونه‌ای از میراگر فلزی جاری شونده ۱۴
- شکل ۸-۱: میراگرهای ویسکوالاستیک ۱۴
- شکل ۹-۱: میراگرهای سیال ویسکوز ۱۵
- شکل ۱۰-۱: استفاده از روش جداسازی برای جداکردن سازه از مولفه افقی نیروی زلزله ۱۵
- شکل ۱۱-۱: تکیه‌گاه الاستومری ۱۶
- شکل ۱۲-۱: تکیه‌گاه لاستیکی سربی ۱۸
- شکل ۱۳-۱: تکیه‌گاه لاستیکی دمپینگ بالا ۱۹
- شکل ۱۴-۱: تکیه‌گاه پاندولی اصطکاکی ۲۰
- شکل ۱۵-۱: تکیه‌گاه گلدانی ۲۱
- شکل ۱-۲: طبقه‌بندی روشهای کنترل لرزه‌ای ۲۸
- شکل ۲-۲: نمای کلی سیستم کنترل لرزه‌ای به روش CCM ۲۸
- شکل ۳-۲: نمای خارجی دو برج بلندمرتبه با سیستم کنترل لرزه‌ای به روش CCM ۲۹
- شکل ۴-۲: نمای کلی اعمال میراگر جرمی ۳۰

- شکل ۲-۵: نمای کلی اعمال سیستم CCM به روش فعال و غیرفعال..... ۳۱
- شکل ۲-۶: نمای کلی اعمال سیستم مهاربندی به روش غیرفعال و نیمه‌فعال..... ۳۱
- شکل ۲-۷: نمای کلی اعمال سیستم جداساز لرزه‌ای به روش غیرفعال و نیمه‌فعال..... ۳۲
- شکل ۲-۸: اجزاء اصلی حلقه کنترل فعال..... ۳۳
- شکل ۳-۱: نمایش یک سیستم حلقه-باز و حلقه-بسته..... ۳۷
- شکل ۳-۲: نمایش کلی سیستم کنترل..... ۳۸
- شکل ۴-۱: طرح کلی مدل مورد استفاده..... ۵۳
- شکل ۴-۲: مدل شماتیک سازه پنج درجه آزادی بدون جداساز لرزه‌ای..... ۵۶
- شکل ۴-۳: مدل شماتیک سازه پنج درجه آزادی با جداساز لرزه‌ای غیرفعال..... ۵۸
- شکل ۴-۴: مدل شماتیک سازه پنج درجه آزادی با جداساز لرزه‌ای فعال..... ۶۰
- شکل ۴-۵: شبیه‌سازی مدل شماره ۱ مربوط به حالت بدون جداساز لرزه‌ای..... ۶۱
- شکل ۴-۶: شبیه‌سازی مدل شماره ۱ مربوط به حالت با جداساز لرزه‌ای غیرفعال..... ۶۲
- شکل ۴-۷: شبیه‌سازی مدل شماره ۱ مربوط به حالت با جداساز لرزه‌ای فعال..... ۶۳
- شکل ۴-۸: نیروی کنترل تقاضا تحت زلزله السنترو..... ۶۸
- شکل ۴-۹: تغییر مکان بام نسبت به پایه تحت زلزله السنترو..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: تغییر مکان پایه تحت زلزله السنترو..... ۷۰
- شکل ۴-۱۱: نیروی کنترل تقاضا تحت زلزله کوبه..... ۷۱
- شکل ۴-۱۲: تغییر مکان بام نسبت به پایه تحت زلزله کوبه..... ۷۲
- شکل ۴-۱۳: تغییر مکان پایه تحت زلزله کوبه..... ۷۳
- شکل ۴-۱۴: نمودار هیستریزس نیروی کنترل-جابجایی پایه مدل شماره ۱ (El Centro)..... ۷۹
- شکل ۴-۱۵: نمودار هیستریزس نیروی کنترل-جابجایی پایه مدل شماره ۱ (Kobe)..... ۷۹

- شکل ۴-۱۶: نمودار هیستریزس نیروی کنترل-جابجایی پایه مدل شماره ۲ (El Centro) ۸۰
- شکل ۴-۱۷: نمودار هیستریزس نیروی کنترل-جابجایی پایه مدل شماره ۲ (Kobe) ۸۰
- شکل ۴-۱۸: شتاب‌نگاشت زلزله El Centro و Hachinohe ۸۲
- شکل ۴-۱۹: شتاب‌نگاشت زلزله Kobe و Northridge ۸۲
- شکل ۴-۲۰: تغییرمکان پایه در مدل شماره ۱ Hachinohe & El Centro ۸۳
- شکل ۴-۲۱: تغییرمکان پایه در مدل شماره ۱ Northridge & Kobe ۸۴
- شکل ۴-۲۲: تغییرمکان نسبی بام در مدل شماره ۱ El Centro & Hachinohe ۸۷
- شکل ۴-۲۳: تغییرمکان نسبی بام در مدل شماره ۱ Northridge & Kobe ۸۸
- شکل ۴-۲۴: شتاب وارده به پایه در مدل شماره ۱ Hachinohe & El Centro ۹۱
- شکل ۴-۲۵: شتاب وارده به پایه در مدل شماره ۱ Northridge & Kobe ۹۲
- شکل ۴-۲۶: شتاب وارده به بام در مدل شماره ۱ Hachinohe & El Centro ۹۳
- شکل ۴-۲۷: شتاب وارده به بام در مدل شماره ۱ Northridge & Kobe ۹۴
- شکل ۴-۲۸: تغییرمکان پایه در مدل شماره ۲ Hachinohe & El Centro ۹۷
- شکل ۴-۲۹: تغییرمکان پایه در مدل شماره ۲ Northridge & Kobe ۹۸
- شکل ۴-۳۰: تغییرمکان نسبی بام در مدل شماره ۲ Hachinohe & El Centro ۱۰۱
- شکل ۴-۳۱: تغییرمکان نسبی بام در مدل شماره ۲ Northridge & Kobe ۱۰۲
- شکل ۴-۳۲: شتاب وارده به پایه در مدل شماره ۲ Hachinohe & El Centro ۱۰۵
- شکل ۴-۳۳: شتاب وارده به پایه در مدل شماره ۲ Northridge & Kobe ۱۰۶
- شکل ۴-۳۴: شتاب وارده به بام در مدل شماره ۲ Hachinohe & El Centro ۱۰۷
- شکل ۴-۳۵: شتاب وارده به بام در مدل شماره ۲ Northridge & Kobe ۱۰۸

فهرست جداول

- جدول ۱-۴ : مشخصات مدل شماره ۱، Kelly و همکاران (۱۹۸۷)..... ۵۳
- جدول ۲-۴ : مشخصات مدل شماره ۲، H.Yazici & R.Guclu..... ۵۴
- جدول ۳-۴ : مقدار نیروی کنترل بیشینه تقاضا برای مدل شماره ۱..... ۷۴
- جدول ۴-۴ : مقدار تغییرمکان بیشینه بام نسبت به پایه برای مدل شماره ۱..... ۷۴
- جدول ۵-۴ : مقدار تغییرمکان بیشینه پایه برای مدل شماره ۱..... ۷۴
- جدول ۶-۴ : مقدار نیروی کنترل بیشینه تقاضا برای مدل شماره ۲..... ۷۵
- جدول ۷-۴ : مقدار تغییرمکان بیشینه بام نسبت به پایه برای مدل شماره ۲..... ۷۵
- جدول ۸-۴ : مقدار تغییرمکان بیشینه پایه برای مدل شماره ۲..... ۷۵
- جدول ۹-۴ : مقادیر نرمالیزه شده به تفکیک انواع مدل و زلزله..... ۷۸
- جدول ۱۰-۴ : بررسی تغییرمکان بیشینه پایه در مدل شماره ۱..... ۸۵
- جدول ۱۱-۴ : بررسی تغییرمکان بیشینه بام نسبت به پایه در مدل شماره ۱..... ۸۹
- جدول ۱۲-۴ : بررسی شتاب بیشینه وارده به پایه در مدل شماره ۱..... ۹۵
- جدول ۱۳-۴ : بررسی شتاب بیشینه وارده به بام در مدل شماره ۱..... ۹۶
- جدول ۱۴-۴ : بررسی تغییرمکان بیشینه پایه در مدل شماره ۲..... ۹۹
- جدول ۱۵-۴ : بررسی تغییرمکان بیشینه بام نسبت به پایه در مدل شماره ۲..... ۱۰۳
- جدول ۱۶-۴ : بررسی شتاب بیشینه وارده به پایه در مدل شماره ۲..... ۱۰۹
- جدول ۱۷-۴ : بررسی شتاب بیشینه وارده به بام در مدل شماره ۲..... ۱۱۰

فصل اول

مقدمه

“In **theory**, there is no difference between theory and practice; But, in **practice**, there is.”
Jan L.A. van de Snepscheut

۱-۱- طرح مسئله

مسئله اصلی که در طراحی سازه برای تأمین مقاومت لرزه‌ای آن وجود دارد به حداقل رساندن خسارت‌های وارده به سازه و همچنین اجزاء غیرسازه‌ای آن است [۱]. این مسئله می‌تواند با کاهش تغییرمکان بین‌طبقه‌ای و شتاب طبقات سازه صورت پذیرد؛ چراکه تغییرمکان بین طبقه‌ای زیاد موجب خسارت دیدن عناصر سازه‌ای و شتاب بالای طبقات باعث خسارت دیدن اجزاء غیرسازه‌ای از جمله تجهیزات، لوازم داخلی و ... می‌شود. تغییر مکان بین‌طبقه‌ای را می‌توان با افزایش سختی سازه کاهش داد که در نتیجه آن شتاب طبقات بالا می‌رود. شتاب طبقات را نیز می‌توان با کاهش دادن سختی سازه و نرم کردن سیستم سازه‌ای پایین آورد که در نتیجه آن تغییر مکان بین طبقه‌ای زیاد می‌گردد. بنابراین می‌بایستی از مکانیزمی استفاده کرد که این دو عامل را بطور همزمان کاهش دهد.

۱-۱-۱- مقدمه

یکی از گسترده‌ترین سیستم‌های حفاظت لرزه‌ای قابل قبول و به‌کاربرده‌شده در سازه‌ها، جداسازهای لرزه‌ای پایه می‌باشد. مفهوم جداساز لرزه‌ای بسیار ساده است؛ سیستم جداساز با انعطاف‌پذیری افقی که بین سازه و پی ایجاد می‌کند سازه را از مؤلفه‌های افقی زلزله جدا می‌سازد. مکانیزم اصلی سیستم‌های جداساز شامل دو قسمت است: افزایش زمان تناوب اصلی سازه، ایجاد میرایی اضافی برای استهلاک انرژی وارده [۲]. این دو مشخصه می‌تواند به ترتیب شتاب طبقات و تغییر مکان بین‌طبقه‌ای را کاهش دهد.

اولین تجهیزات به‌کاربرده‌شده در این سیستم، جداسازهای لاستیکی بود. مشکلی که در این سیستم با گذشت زمان و مشاهده عملکرد آن در انواع زلزله‌ها بخصوص زلزله‌های حوزه نزدیک و از نوع پالس سرعت‌بالا، نمود پیدا کرد تغییرمکان‌های بزرگ پایه بود. با ادامه مطالعات و تحقیقات در این زمینه، برای غلبه بر این مشکل از جداسازهای غیرخطی از قبیل تکیه‌گاه لاستیکی-سربی، اصطکاکی و

لاستیکی با میرایی بالا استفاده شد. مزیت این تجهیزات، کاهش دادن نیروهای لرزهای و دارا بودن میرایی کافی بطور همزمان است. اگرچه این نوع جداسازها باعث بالا بردن نیروهای وارده به سازه می‌شوند که شتاب سازه و تغییرمکان بین طبقه‌ای را افزایش می‌دهد [۳]؛ ولی در عین حال تاثیر بسزایی در کاهش تغییر مکان پایه دارند. این قبیل سیستمهای جداساز به دلیل عملکرد و رفتار واحد در انواع زلزله‌ها و عدم قابلیت تطبیق با تغییرات پاسخ سازه‌ای تحت تاثیر زلزله‌های مختلف، سیستمهای جداساز لرزه‌ای غیرفعال خوانده می‌شوند. این موضوع، نیاز به وجود یک سیستم هوشمند که بتواند در مقابل انواع زلزله‌های با مشخصات متفاوت، عملکرد متناسبی از خود نشان دهد را بیش از پیش آشکار کرد.

سیستمهای جداساز لرزه‌ای فعال راه‌حل مناسبی برای کنترل همه‌جانبه سازه در انواع زلزله‌ها می‌باشند. این سیستمها ترکیبی از جداسازهای لرزه‌ای غیرفعال و عملگرهای فعال هستند [۴]. به این ترتیب با بهره‌گیری از مزایای سیستمهای جداساز غیرفعال از یک طرف، و برطرف کردن نقائص آن بوسیله کنترل هوشمند از طرف دیگر، یک ترکیب نسبتاً ایده‌آل را خواهیم داشت.

تحقیقات گسترده بر روی کنترل پاسخ سازه‌ای در حدود سال‌های 1960 انجام گرفت. فجایع ویرانگری همچون زلزله Northridge (1994) در ایالات متحده، زلزله Hyogoken-Nanbu (1995) در ژاپن و زلزله Chi-Chi (1999) در تایوان، موجب شتاب گرفتن کاربرد تکنولوژی‌های کنترل پاسخ در سازه‌ها شد. بطور ویژه در ژاپن و چین، بر پایه گسترش علوم و تحقیقات جهانی و با پیشرفت تکنولوژی کامپیوتر که امکان بررسی عملکرد پاسخ سازه‌های کنترل‌شده را ممکن می‌ساخت، تجهیزات کنترلی جدید گسترش پیدا کردند [۴].

۱-۱-۲- مفاهیم

الف) پاسخ سازه : رفتار سازه و مؤلفه‌هایش (مانند ستون، تیر، صفحه‌ها و ...) در برابر نیروهای استاتیک و بارهای دینامیک را پاسخ سازه‌ای می‌نامند؛ مانند تغییرمکان در برابر نیروهای استاتیک و ارتعاش تحت بارهای دینامیک [۵].

ب) روش‌های معمول طراحی سازه : روش معمول طراحی سازه، تأمین مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده با قابلیت شکل‌پذیری مناسب است. این نوع طراحی سازه با چند عامل محدودکننده روبرو است :

- این سازه‌ها برای استهلاک انرژی دینامیکی که به آنها وارد می‌شود، به میرایی مصالح و اتصالاتشان وابسته هستند که مقدار این میرایی در مقابل نیروهای وارده بسیار پایین است. در این نوع سازه‌ها برای غلبه بر این مشکل هیچ راهکاری در نظر گرفته نشده است؛ مانند سازه‌های بتن‌آرمه و فلزی رایج.

- این سازه‌ها ظرفیت مقاومتی و استهلاکی ثابتی دارند که در نتیجه نمی‌توانند با تغییرات تحریکات محیطی مانند باد و زمین‌لرزه، سازگار شوند.

- به‌طور کلی این سازه‌ها برای مقاومت در مقابل بارهای وارده تنها به سختی‌شان وابسته هستند [۵].

پ) سیستم‌های سازه‌ای هوشمند : امروزه چالش اصلی مهندسی سازه، طراحی بهتر سازه‌ها در برابر تأثیرات ویرانی ناشی از زلزله و طوفان‌های شدید است. محدودیت‌های روش‌های معمول طراحی سازه، محققان را برای پیدا کردن یک روش جایگزین و راه‌حل مناسب ترغیب کرد. تحقیقات علمی گسترده منجر به کشف مواد مصنوعی و طبیعی جدیدی شد که خواصی غیرمعمول داشتند. این مواد،

سیستم‌های هوشمندی که بطور خودکار خودشان را با تغییرات محیطی هماهنگ می‌کنند را به‌وجود آوردند که به سیستم‌های سازگار معروفند. این اکتشافات و اضافه شدن سیستم‌های سازگار و مصالح و تجهیزات هوشمند به سازه‌ها، نهایتاً منجر به ظهور مفهوم جدیدی به نام سازه‌های هوشمند شد. این نوع سازه‌ها می‌توانند خود را مانیتور کنند و با محیط سازگار شوند [۵].

یک سیستم سازه‌ای هوشمند، قابلیت درک و حس کردن تغییرات محیطی، تشخیص معایب و مشکلات در موقعیت‌های بحرانی، ذخیره و فراخوانی اطلاعات اندازه‌گیری‌شده و در نهایت پیدا کردن دستورالعمل مناسب برای بهبود عملکرد سیستم و یکپارچگی سازه را دارا می‌باشد [۵]. سیستم‌های سازه‌ای هوشمند، مفهوم جدیدی هستند که تأثیر زیادی در بهبود عملکرد سازه‌ها در برابر این تأثیرات داشته‌اند. این سیستم‌ها انرژی و نیروهای ویرانگر وارده به سازه را جذب و خنثی می‌کنند و به این طریق خرابی‌های سازه‌ای را بطور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. این سیستم‌ها در حال حاضر مراحل تکامل و توسعه را با سرعت طی می‌کنند [۵].

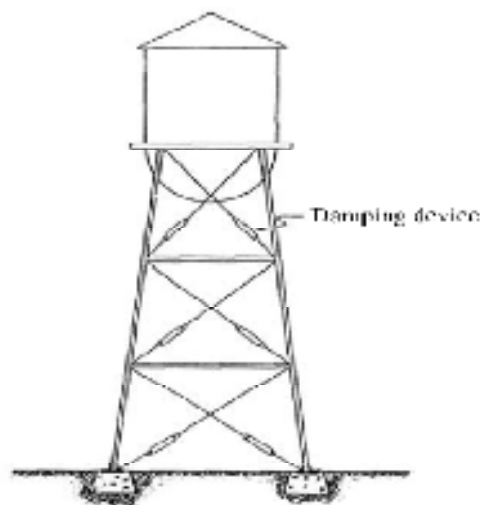
۱-۱-۳- اهمیت تکنولوژی سازه‌های هوشمند در علم عمران

“Measure what is measurable, and make measurable what is not so.” *Galileo Galilei*

سازه‌های عمرانی مانند ساختمان‌ها، پل‌ها، برج‌ها و ... ممکن است در معرض نیروهای وارده بطور شدیدی ارتعاش کنند و یا حتی ویران شوند. همانطور که گفته شد اکثر این سازه‌ها برای مقابله با این نیروها به سختی‌شان وابسته هستند. این سازه‌ها غیرفعال هستند و نمی‌توانند در مقابل تغییرات نیروی زلزله و باد خود را سازگار کنند. برای مقابله با تحریکات قویتر، افزایش در مقاومت و شکل‌پذیری سازه موردنیاز است؛ اما مقاومت بالا و مصالح سازه‌ای انعطاف‌پذیر معمولاً هزینه‌های بالایی را در بر خواهند داشت. تکنولوژی سازه‌های هوشمند می‌تواند یک راه‌حل مناسب برای بالابردن ایمنی سازه، افزایش خدمت‌پذیری و بهبود عملکرد آن باشد. امروزه این سیستم‌ها در سازه‌ها عمرانی زیر

به کار برده می شوند :

- سازه‌های تحت تحریکات غیرمعمول مانند طوفان‌ها و زلزله‌های شدید.
 - سازه‌های با اهمیت زیاد و نیازمند به تدابیر ایمنی بالا مانند بیمارستان‌ها، ایستگاه‌های آتش‌نشانی و نیروگاه‌ها.
 - سازه‌هایی که تحت اثر تحریکات محیطی بزرگ و دامنه ارتعاشات زیاد، به منظور حفظ آرامش ساکنین و همچنین ایمنی سازه، نیازمند ملاحظات خدمت‌پذیری ویژه‌ای هستند.
- تجهیزات اضافه‌شده به سازه‌ها برای خنثی کردن ارتعاشات، تاریخچه طولانی دارد. میراگرهای غیرفعال در اوایل قرن بیستم به وجود آمدند. یک کاربرد ابتدایی این تجهیزات در سازه‌های مهندسی عمران، در برج‌های مرتفع مخازن آب بوده‌است. نمونه‌ای از آن در شکل ۱-۱ نمایش داده شده‌است.



شکل ۱-۱: مخزن مرتفع آب با تجهیزات میرایی

میراگرهای غیرفعال به کار برده شده در این سازه‌ها در دهه ۱۹۷۰ مرسوم بوده‌اند و بطور وسیعی برای دفع ارتعاشات در اتومبیل‌ها، سازه‌های فضاکار و عمرانی استفاده می‌شدند. پس از آن تکنولوژی کنترل مدرن و سیستم‌های سازگار در زمینه مکانیک و صنایع الکتریکی توسعه پیدا کردند.

منشأ پیدایش مفهوم کنترل سازه‌ای در دهه 1950 به وسیله محققان ژاپنی (Kobori & Minai) بود. به دنبال آن با تلاش زیاد محققان و همچنین گسترش علوم، دستاوردهای بزرگی در تکنولوژی سازه‌های هوشمند برای کنترل پاسخ لرزه‌ای به دست آمد. این تلاش‌ها را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد :

- مدل کردن سیستم کنترل و گسترش الگوریتم‌ها جهت بهبود و گسترش قابلیت کاربرد تئوری کنترل مدرن در سازه‌های بزرگ .

- گسترش تحقیقات آزمایشگاهی و تجهیزات کنترل، همچنین بالا رفتن قابلیت کارآمدی میراگرها و عملگرها در تولید نیروهای بزرگ موردنیاز برای کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای سازه .

- به‌کاربردن مصالح هوشمند در سازه‌ها؛ مانند الکترورنولوژیکال^۱ یا مگنتورنولوژیکال^۲، لایه‌های پیزوالکتریک^۳، آلیاژهای حافظه‌شکلی^۴ و حسگرهای فیبر نوری .

- بررسی بر روی قابلیت اجراء در سازه‌های مقیاس واقعی .

- گسترش و پیشرفت استانداردهای طراحی [۵] از قبیل :

- Federal Emergency Management Agency (FEMA) : 1991 (FEMA 140), 1997 (FEMA 302), 2000 (FEMA 368), and 2003 (FEMA 450)
- ASCE-7 standards (1991)
- Uniform Building Code (UBC) issued by the International Conference of Building Officials (ICBO) (September 1986)
- Structural Engineers Association of Northern California (SEAONC)

۱-۲- انواع روش‌های حفاظت لرزه‌ای سازه

بسته به نوع مسئله، کاهش ارتعاش از راه‌های مختلفی قابل دسترسی است. معمولترین آنها

1- Electro Rheological : ER
2-Magneto Rheological : MR
3-PZT
4-Shape Memory

استفاده از سختی^۱، میرایی^۲ و جداسازی^۳ است [۶] :

۱- استفاده از سختی عبارتست از تغییر فرکانس پاسخ سازه به مقداری بیشتر از فرکانس

تحریک کننده.

۲- استفاده از میرایی که ممکن است به صورت غیرفعال، نیمه فعال یا فعال به سازه اعمال شود.

۳- استفاده از جداسازی شامل جلوگیری از ازدیاد و انتشار اختلالات وارده به بخش های

حساس سیستم است.

۱-۲-۱- روش سختی

یکی از سیستم های معمول محافظت سازه ای استفاده از روش طراحی ساختمان با مقاومت و

سختی کافی و به کار گرفتن ظرفیت تغییرشکل غیر الاستیک برای تحمل زلزله است. این هدف با

اضافه کردن عناصری مانند دیوار برشی، بادبندها، قاب خمشی و دیافراگم ها تأمین می شود تا منجر به

سیستمی مقاوم در برابر بارهای جانبی گردد. در این روش همچنین شکل ساختمان یکی از عوامل

تأثیرگذار در طراحی است. مثلاً ساختمان های متقارن مرکزی (مربع یا مستطیلی شکل) بهتر از سایر

شکل ها (T, U, L, \dots) عمل می کنند. نکته مهم دیگر، نوع مصالح استفاده شده در ساختمان است. برای

مثال مصالح شکل پذیر مثل آهن، بهتر از مصالح شکننده مانند آجر، عمل می کنند.

بطور کلی در این سیستم، سازه بوسیله ترکیبی از انعطاف پذیری و جذب انرژی در مقابل

نیروهای وارده مقاومت می کند. معمولاً میزان دمپینگ در این نوع سازه ها بسیار پایین است و در

نتیجه میزان انرژی که در خلال رفتار الاستیک سازه مستهلک می شود بسیار ناچیز است؛ بنابراین در

زلزله های شدید سازه وارد فاز غیرالاستیک شده که این امر نهایتاً منجر به تشکیل مفاصل پلاستیک

موضعی می شود. به این ترتیب با بالا رفتن خاصیت انعطاف پذیری و جذب انرژی در این مفاصل،

1-Stiffening
2-Damping
3-Isolation

خرابی‌های موضعی بوجود می‌آید [۷].

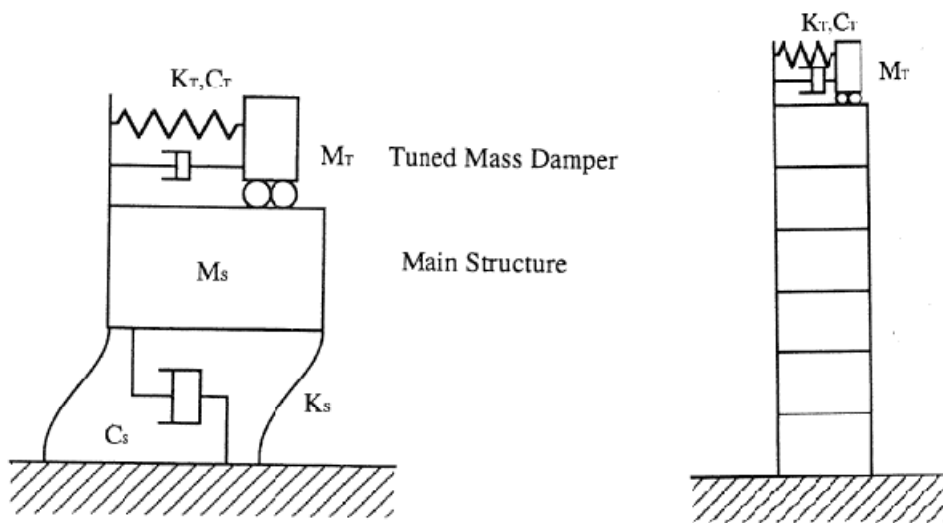
با توجه به اینکه این روش به مقاومت داخلی سازه برای اتلاف انرژی تکیه می‌کند، سطح مشخصی از تغییرشکل و خرابی را باید پذیرفت. علاوه بر این سیستم‌های معمول فقط تغییر مکان‌های سازه را کنترل می‌کنند؛ در صورتیکه کنترل شتاب سازه که از لحاظ راحتی و آرامش ساکنان بسیار حائز اهمیت است، در نظر گرفته نمی‌شود.

۱-۲-۲- روش میرایی

استفاده از میرایی ممکن است به صورت غیرفعال با استفاده از انواع میراگرها، المان‌های الاستومری و مغناطیسی انجام شود؛ همچنین می‌توان از مبدل‌های انرژی برای تغییر حالت انرژی ارتعاشی به انرژی الکتریکی که مستهلک‌کننده و ذخیره‌کننده انرژی در شبکه‌های الکتریکی است، استفاده نمود (بهره‌برداری از انرژی). در سال‌های اخیر، استفاده از میراگرهای فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال در کنترل سازه‌ها، بطور وسیعی گسترش پیدا کرده است. در اینجا به چند نمونه از انواع این میراگرها اشاره می‌کنیم :

الف) میراگرهای جرمی تنظیم‌شده^۱ : میراگرهای جرمی از المان‌های با جرم زیاد تشکیل می‌شود که بطور الاستیک به سازه اصلی متصل می‌شوند. چنین اتصالی باید اجازه حرکت نسبی بین میراگر جرمی و سازه اصلی را بدهد تا نیروهای بزرگ اینرسی تولیدشده، نیروهای خارجی وارد بر سازه را خنثی کند. برای رسیدن به این هدف، بایستی پریود طبیعی جرم افزوده شده به پریود اصلی سازه نزدیک باشد. این خاصیت اساس کار میراگرهای جرمی تنظیم‌شده هستند. شکل ۱-۲ میراگر جرمی تنظیم‌شده شماتیک را نمایش می‌دهد. این سیستم بیشتر برای کاهش لرزه‌های افقی ساختمان‌های بلند و لاغر، آسمان‌خراش‌ها، برج‌های مخابراتی و امثال آن به کار می‌روند [۸].

1-Tuned Mass Damper : TMD

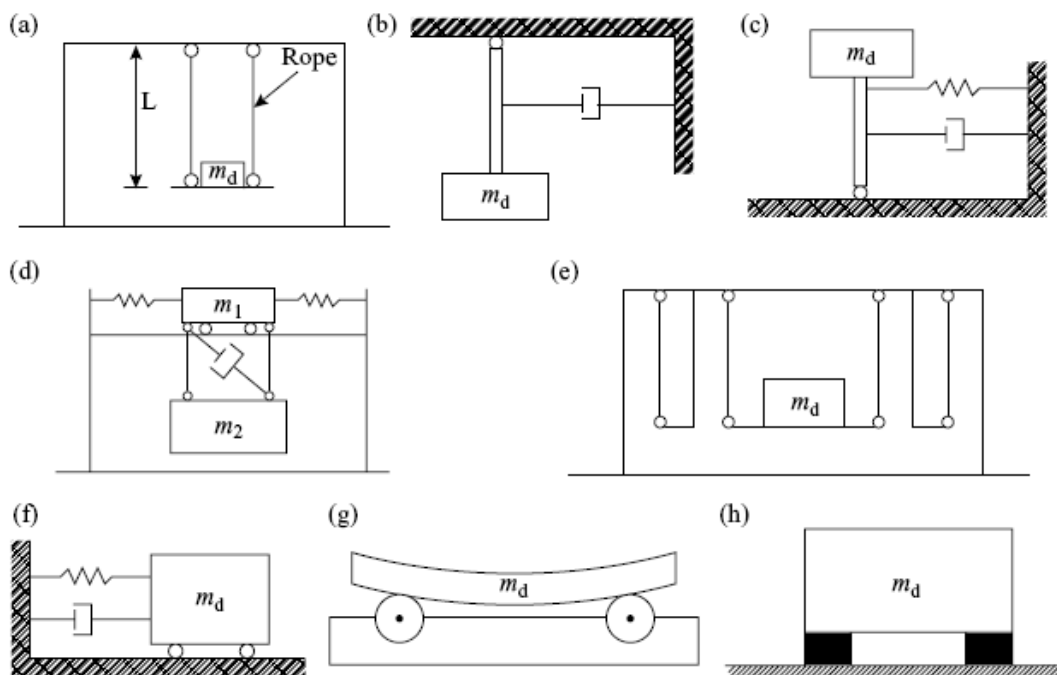


شکل ۲-۱: شمای کلی میراگر جرمی تنظیم شده

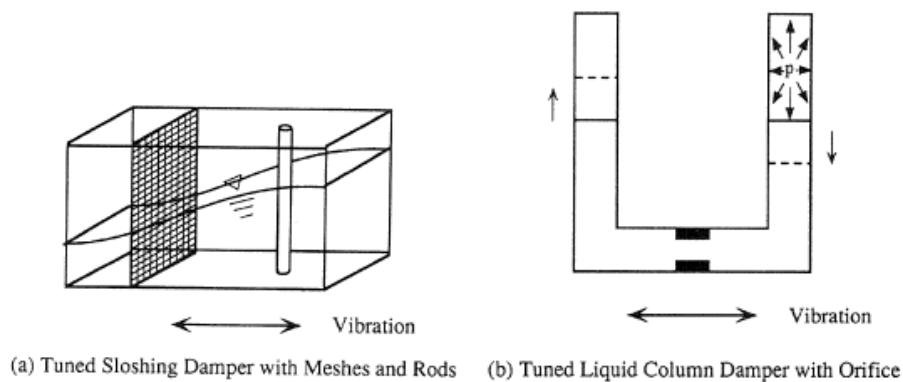
نمونه‌های این سیستم در ساختمان City Crop Center در نیویورک، برج Sydney Tower در استرالیا و در سایر کشورها از جمله کانادا، عربستان، پاکستان و ژاپن به کار رفته‌اند. میراگر جرمی تنظیم شده انواع مختلفی دارد که در شکل ۳-۱ برخی از آنها به نمایش گذاشته شده است [۷].

ب) میراگرهای سیال تنظیم شده^۱: این نوع میراگرها که بطور وسیعی در تعادل کشتی‌ها استفاده می‌شدند، اخیراً در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها به کار برده می‌شوند. در این نوع میراگر، از حرکت و آشفته‌گی جرم آب یا سایر سیال‌های مشابه در ظرف محتوی آن، به عنوان ذخیره‌کننده و مستهلک‌کننده انرژی استفاده می‌شود. اساس کار TLD همانند TMD بر جذب انرژی جنبشی سازه اصلی استوار است. نمونه‌هایی از انواع میراگرهای سیال تنظیم شده در شکل ۴-۱ نشان داده شده است [۷].

1-Tuned Liquid Damper : TLD



شکل ۱-۳: انواع میراگر جرمی تنظیم شده (a) پاندولی ساده، (b) پاندولی با میراگر، (c) پاندولی معکوس با میراگر و فنر، (d) میراگر دوجرمی، (e) میراگر چندلایه، (f) جرم لغزنده با فنر و میراگر، (g) جرم شناور بر تکیه‌گاه دوار، (h) جرم روی تکیه‌گاه لاستیکی

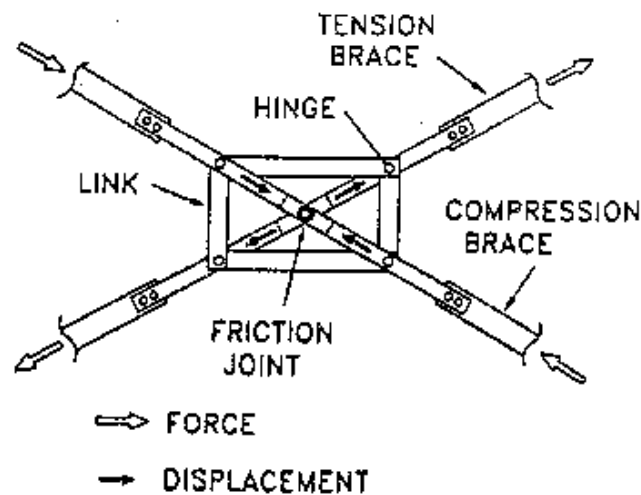


شکل ۱-۴: انواع میراگر سیال تنظیم شده (a) میراگر سیال با شبکه و میله، (b) میراگر سیال ستونی با روزنه

در مورد شکل ۱-۴-۱-۱، دوره تناوب میراگر بوسیله اندازه تانک و عمق سیال تنظیم می‌شود. ظرفیت میرایی نیز به واسطه قراردادن شبکه‌ها و میله‌ها، قابل افزایش است. در نوع ستونی مربوط به شکل ۱-۴-۱-۲، دوره تناوب میراگر بوسیله شکل ستون و فشار هوای داخل ستون قابل تنظیم است.

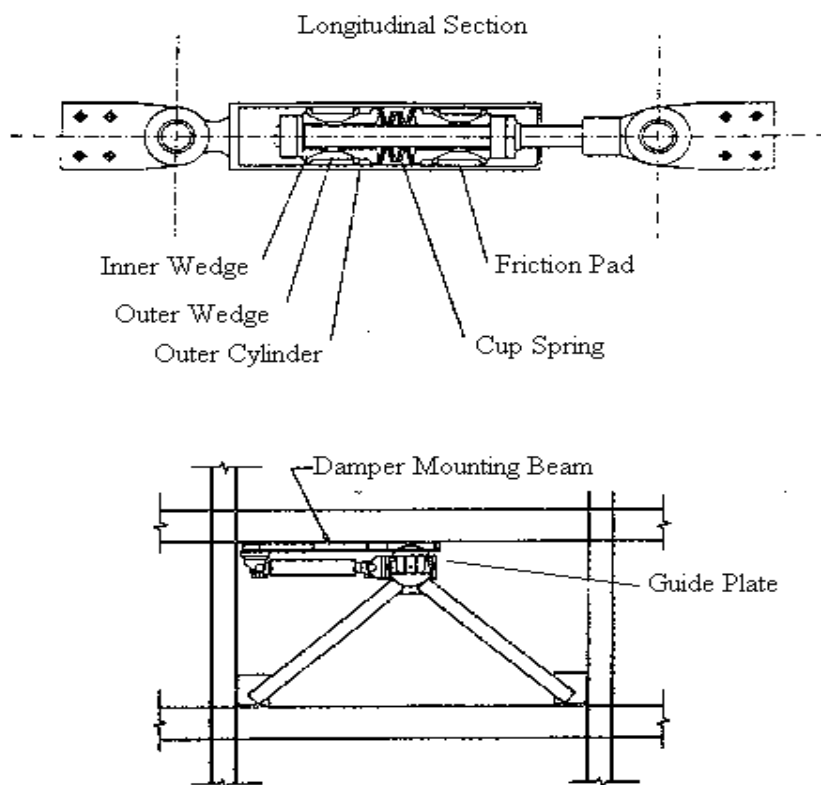
ظرفیت میرایی نیز توسط روزنه داخل ستون تنظیم می‌شود [۷].

پ) میراگرهای اصطکاکی^۱: این نوع میراگرها عموماً در سطح مقطع مهاربندها به کار برده می‌شوند که اولین بار توسط Pall در سال 1982, 1987 (شکل ۵-۱) در شش ساختمان مختلف در کانادا استفاده شد [۷]. در این نوع میراگر از نیروی اصطکاک برای استهلاک انرژی استفاده می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی توسط Filiatrault (1985) و Aiken (1988) نشان داد که این تجهیزات می‌تواند در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه، تأثیر مطلوبی داشته باشد. شکل ۶-۱ نمونه‌ای از میراگرهای اصطکاکی با نام سومیتومو^۲ را نشان می‌دهد [۷].



شکل ۵-۱: میراگرهای اصطکاکی

1-Frictional Damper
2-Sumitomo

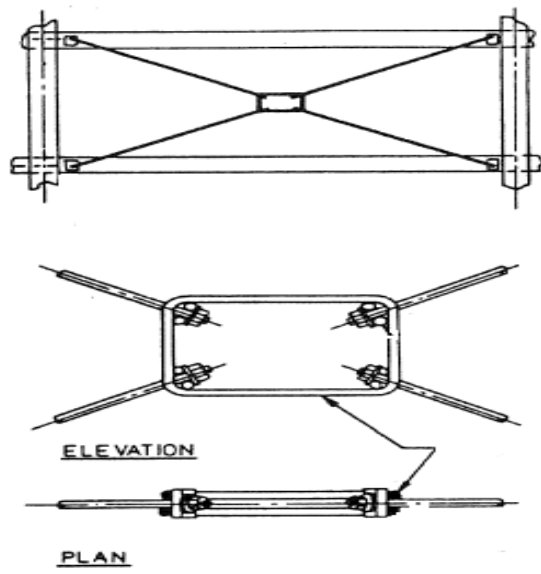


شکل ۱-۶: میراگر اصطکاکی سومیتومو و جزئیات آن

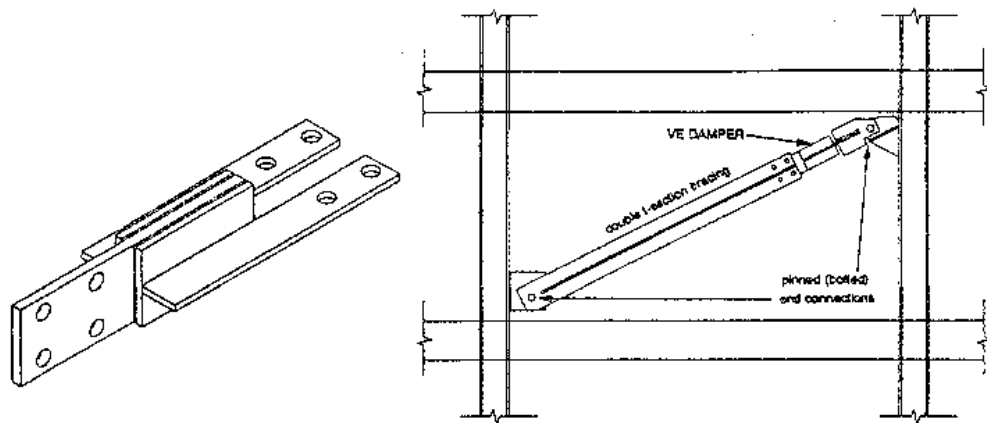
ت) میراگرهای فلزی جاری شونده: این میراگرها بر اساس تغییرشکل غیرخطی فلزات عمل می‌کنند که نمونه‌ای از آن در شکل ۱-۷ ملاحظه می‌شود. این روش در ابتدا در نیوزیلند و ژاپن و همچنین برای بازسازی ساختمان‌ها در مکزیک و آمریکا مورد استفاده قرار گرفت [۹].

انواع دیگر میراگرها نیز وجود دارند که از آن جمله می‌توان میراگرهای ویسکو الاستیک^۱، دیواره‌های ویسکوز^۲ و میراگرهای سیال ویسکوز^۳ که عملکردشان شبیه کمک‌فنا است، را نام برد.

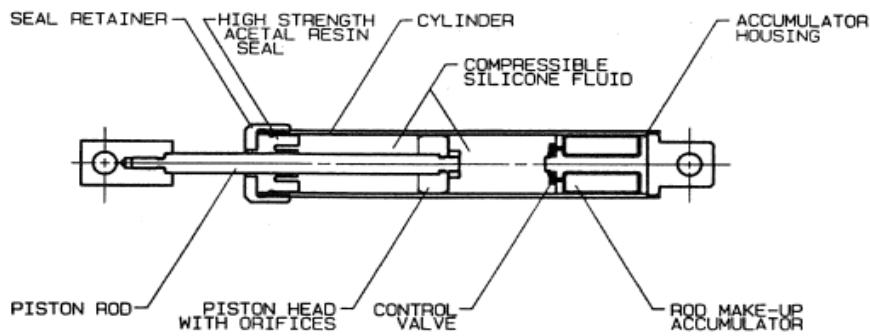
1-Viscoelastic Damper
2-Viscous Wall
3-Fluid Viscous Damper



شکل ۷-۱: نمونه‌ای از میراگر فلزی جاری شونده [۸]



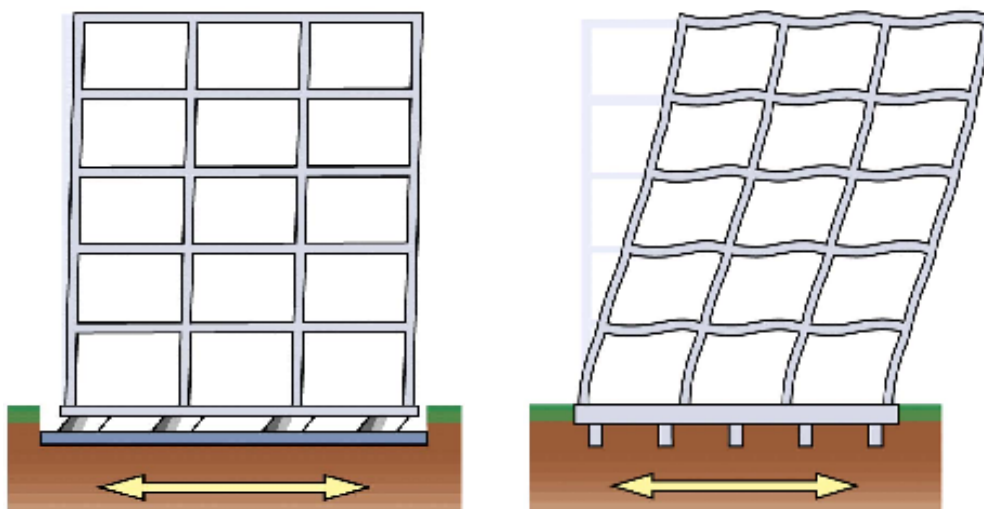
شکل ۸-۱: میراگرهای ویسکوالاستیک



شکل ۹-۱: میراگرهای سیال ویسکوز

۳-۲-۱- روش جداسازی

از میان روش‌های مختلف محافظ سازه در مقابل تحریکات لرزه‌ای، در حال حاضر سیستم جداساز لرزه‌ای بطور گسترده‌ای در نقاط مختلف جهان به کار برده می‌شود. جداسازهای لرزه‌ای عمدتاً در فونداسیون سازه قرار می‌گیرند که بوسیله قابلیت جذب انرژی و انعطاف پذیری بالا، انرژی وارد شده را قبل از انتقال به سازه جذب می‌کنند.



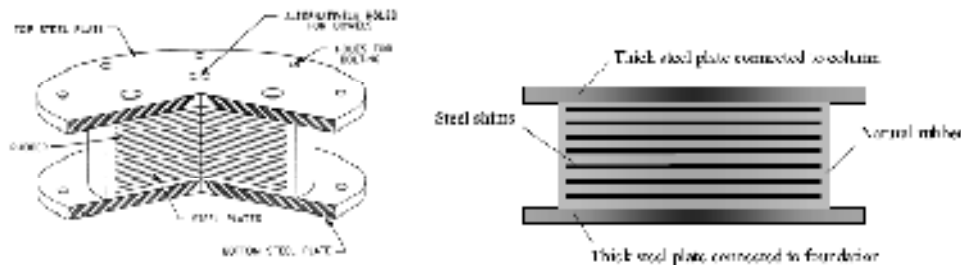
شکل ۱۰-۱: استفاده از روش جداسازی برای جدا کردن سازه از مولفه افقی نیروی زلزله

Buckle در سال ۱۹۹۰ نشان داد که عناصر اصلی در یک سیستم جداساز عبارتند از :

- ۱- انعطاف‌پذیری برای طولانی شدن دوره تناوب سازه و کاهش شتاب وارده
- ۲- قابلیت استهلاک انرژی برای کاهش تغییر مکان سازه
- ۳- تجهیزات مورد نیاز برای ایجاد صلبیت سازه تحت اثر بارهای سرویس مانند باد [۷].

برخی از انواع تجهیزات جداساز لرزه‌ای عبارتند از [۷] :

الف) تکیه‌گاه‌های الاستومری : یکی از معمولترین تکیه‌گاه‌هایی که در سیستم‌های جداساز برای تأمین انعطاف‌پذیری سازه‌ها به کار برده می‌شوند، تکیه‌گاه‌های الاستومری هستند. شکل ۱-۱۱ ، ساختمان یک تکیه‌گاه الاستومری را نشان می‌دهد. این نوع تکیه‌گاه شامل لایه‌های نازک لاستیکی است که به صفحات فلزی متصل و ولکانیزه (چسباندن تحت فشار و حرارت زیاد) شده‌اند.



شکل ۱-۱۱: تکیه‌گاه الاستومری

لاستیک، مقاومت برشی پایینی حدود $G=0.5 - 1 \text{ MPa}$ در کرنش برشی 50% دارد که در مقابل صفحات فلزی متصل به آن بسیار ناچیز است. سختی جانبی تکیه‌گاه‌های الاستومری به صورت زیر به دست می‌آید :

$$K_H = \frac{AG}{\Sigma t} \quad (1-1)$$

که در آن A سطح مقطع لاستیک، G مدول برشی لاستیک و $\sum t$ مجموع ضخامت لاستیک است.

به هر حال صفحات فلزی با وجود اینکه بطور زیادی انعطاف‌پذیری جانبی لاستیک را کاهش می‌دهد، سختی قائم تکیه‌گاه را افزایش می‌دهند. سختی قائم تکیه‌گاه عبارتست از :

$$K_V = \frac{AE_c}{\sum t} \quad (2-1)$$

که در آن E_c مدول فشاری می‌باشد که توسط Chalhoub (1990) و Constantinou (1992) بر پایه اصول مکانیک به صورت زیر به دست آمده است :

$$E_c = \left(\frac{1}{6GS^2F} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (3-1)$$

که در آن S ضریب شکل (تقریباً بین 10 تا 40)، K مدول بالک (حدود 2000 MPa) و F ضریبی است که برای تکیه‌گاه‌های دایروی برابر واحد و برای دایروی با حفره مرکزی بین 2/3 تا 1 است. به دلیل اینکه ضریب شکل در محدوده‌ای بین 10 تا 40 است، سختی قائم بین 400 تا 1300 برابر بزرگتر از سختی افقی است.

تکیه‌گاه‌های الاستومری با لاستیک طبیعی دمپینگ‌پایین¹ با دمپینگ ویسکوز معادل 0.05 یا کمتر حالت بحرانی به کار برده می‌شوند. بسیاری از آنها ممکن است در جداسازی سازه‌های دارای تجهیزات حساس مفید واقع شوند. هرچند که در کاربردهای بسیار مهم، علاوه بر آن از مستهلک-کننده‌های انرژی نیز استفاده می‌کنند.

تکیه‌گاه‌های لاستیکی دمپینگ‌پایین در ترکیب با تجهیزات میرایی فولادی انعطاف‌پذیر، کاربردهای فراوانی در ژاپن پیدا کرده‌اند (Kelly 1988). ادوات فلزی انعطاف‌پذیر در نیوزیلند برای جداسازی پل‌ها استفاده شده‌اند (Buckle 1990). کاربردهای وسیع این قبیل ادوات در جداسازی لرزه‌ای پل‌ها در ایتالیا انجام گرفته‌است و بیش از ۱۵۰ پل به این وسیله جداسازی لرزه‌ای

1-Natural Rubber Bearing : NRB

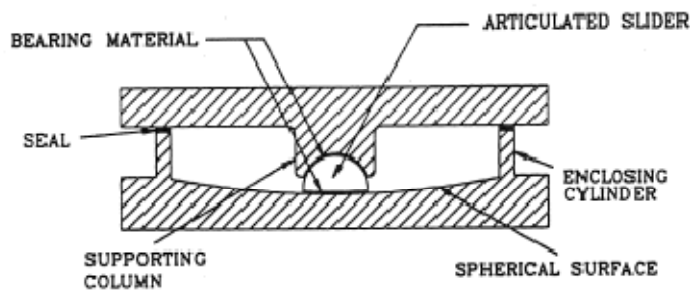
در ژاپن یک نوع لاستیک ترکیبی مقاومت‌بالای متفاوت را که اخیراً کاربردهای زیادی را در ژاپن داشته‌است، معرفی کرد.



شکل ۱-۱۳: تکیه‌گاه لاستیکی دمپینگ‌بالا HRB

ت) تکیه‌گاه‌های لغزنده : در این نوع تکیه‌گاه‌ها انتقال نیرو در سطح مشترک سطوح لغزنده محدود می‌شود و به این وسیله عمل جداسازی صورت می‌پذیرد. این نوع تکیه‌گاه‌ها به تجهیزات الحاقی جهت ذخیره نیرو و حالت بازگرداندگی نیاز دارند؛ در غیر اینصورت تغییر مکان‌های دائمی قابل توجهی در آنها ایجاد خواهد شد (Constantinou 1991). وسایل متنوعی برای ذخیره‌سازی و بازگرداندگی نیرو مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Constantinou 1993, Tsopeles 1994). بیشترین وسایل کاربردی، سطوح لغزنده کروی هستند که تکیه‌گاه‌های پاندولی-اصطکاکی^۱ از آن جمله می‌باشند. شکل ۱-۱۴ ساختمان کلی این نوع تکیه‌گاه‌ها را نشان می‌دهد که شامل یک سری لغزنده‌ها روی یک سطح کروی هستند. این سطوح به وسیله فولاد ضدزنگ پوشش داده شده‌اند و در ساخت آنها آلیاژهای مقاوم و بادوامی به کار رفته که بطور خودکار و مرتباً روغنکاری می‌گردند. با بالا رفتن سازه در میان سطوح کروی، نیرو در تکیه‌گاه ذخیره شده و حالت بازگرداندگی ایجاد می‌کند و تا زمانی که تمام انرژی به وسیله اصطکاک مستهلک گردد، این عمل ادامه پیدا می‌کند.

1-Friction Pendulum System : FPS



شکل ۱-۱۴: تکیه‌گاه پاندولی اصطکاکی

نیروی جانبی تکیه‌گاه به تغییر مکان تکیه‌گاه وابسته است و رابطه آن به صورت زیر بیان

می‌شود (Zayas 1987, Mokha 1991, Constantinou 1993):

$$F = \frac{W}{R}u + \mu W \operatorname{sgn}(u) \quad (۴-۱)$$

که در آن R شعاع انحنای سطح کروی، U تغییر مکان تکیه‌گاه، W وزن کل حمل شده به وسیله

تکیه‌گاه و μ ضریب اصطکاک سطح لغزنده است. عبارت W/R نشان دهنده سختی تکیه‌گاه است. دوره

تناوب این نوع سیستم جداساز نیز که مستقل از جرم سازه است، عبارتست از:

$$T = 2\pi \left(\frac{R}{g} \right)^{1/2} \quad (۵-۱)$$

بیشتر جداسازها از نوع تکیه‌گاه پاندولی-اصطکاکی می‌باشند. ساختمان‌های بسیاری در آمریکا،

ژاپن، نیوزیلند و چین از این تکنولوژی استفاده کرده‌اند. نتایج به دست آمده بسیار رضایت‌بخش

بوده‌است و نیروهای منتقل شده از زمین به سازه تا حدود نصف و حتی یک سوم کاهش یافته است.

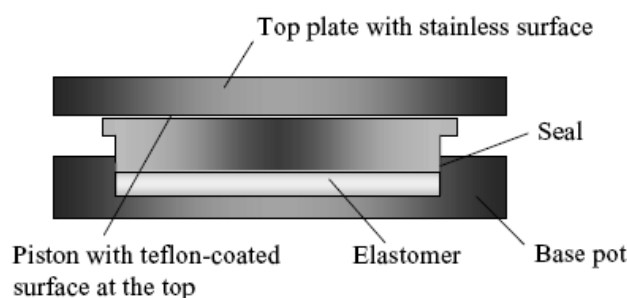
همچنین به کارگیری این تجهیزات در چین، منجر به کاهش هزینه ساخت بین ۵ تا ۲۰ درصد در

مقایسه با روش‌های قدیمی شده‌است [۸]. تکیه‌گاه‌های FPS در ایالات متحده برای جداسازی لرزه‌ای

مخازن به کار برده شده‌اند؛ همچنین ساختمان دادگاه استیناف و چند آپارتمان دیگر در

سانفرانسیسکو، به این وسیله جداسازی شده‌اند [۷].

ث) تکیه‌گاه‌های گلدانی^۱: منشأ پیدایش این نوع تکیه‌گاه در اروپا است. نمونه‌ای از این نوع تکیه‌گاه، ترکیبی از تکیه‌گاه‌های لغزنده و الاستومری می‌باشد. الاستومر در آنها بوسیله یک پیستون گلدانی شکل که سطح بالای آن با تفلون پوشیده شده، محصور شده‌است. شکل ۱-۱۵ مقطع شماتیک این نوع تکیه‌گاه‌ها را نشان می‌دهد [۵].



شکل ۱-۱۵: تکیه‌گاه گلدانی

۱-۳- تاریخچه جداسازهای لرزه‌ای

جداسازی لرزه‌ای و ادوات کنترل پاسخ، مدت زمان طولانی است که برای کنترل پاسخ شتاب و تغییر مکان سازه مورد مطالعه هستند تا بدین طریق دامنه خرابی‌های ناشی از زلزله و باد را کنترل نمایند. بنا بر شواهد تاریخی در چین و ژاپن، سازه‌ها در مقابل زلزله به وسیله قرار دادن یک لایه ماسه یا برنج بخارپز شده مابین فونداسیون و خاک، جداسازی می‌شده‌اند.

در مهندسی مدرن، تجهیزات جداسازی ارتعاش و مستهلک‌کننده انرژی وارده، اولین بار در مهندسی مکانیک به کار برده شدند؛ مانند کمک‌فتر اتومبیل‌ها. از دهه ۱۹۵۰ در مهندسی ساختمان، بلوک‌های لاستیکی انعطاف‌پذیر برای جداسازی سازه‌ها در برابر ارتعاشات ناشی از قطارهای زیرزمینی،

1-Pot-type bearings

ترافیک و سائل نقلیه و سایر اشکال ارتعاش‌زا، مورد استفاده قرار گرفتند. البته تا مدت‌ها این تکنیک برای حفاظت از سازه‌ها در برابر زلزله به کار برده نمی‌شدند.

اولین تلاش‌ها برای جداسازی سازه‌ها در برابر حرکات زمین در سال 1969 در مدرسه Heinrich Pestalozzi در یوگوسلاوی سابق به وقوع پیوست که در آن تکیه‌گاه‌های لاستیکی بدون صفحات فلزی مسلح‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. اولین کاربرد عملی تکیه‌گاه‌های لاستیکی - سربی در سال 1981 و در ساختمان ویلیام کلیتون در نیویورک بود. به دنبال آن ساختمان مرکز دادگستری آمریکا در سال 1985 با این شیوه جداسازی شد.

به واسطه پیشرفت‌های علم کامپیوتر در قابلیت امکان تحلیل‌های غیرخطی سازه، مبنای تحقیق در تأثیر ادوات کنترل پاسخ سازه، بر نیروهای باد و زمین‌لرزه قرار گرفت. به این ترتیب کاربرد تجهیزات کنترل پاسخ سازه، بطور گسترده‌ای هم در زمینه طراحی سازه‌های جدید و هم در زمینه مقاوم‌سازی سازه‌های قدیمی، در دو دهه اخیر گسترش پیدا کرد.

پاسخ‌های مطلوب سازه‌های جداسازی‌شده لرزه‌ای در زلزله (1994) Northridge در آمریکا و زلزله (1995) Hyogoken-Nanbu در ژاپن، بطور مضاعفی موجب افزایش مقبولیت این تکنولوژی شد. عملکرد سازه‌ها و پاسخ‌های اندازه‌گیری شده در این زلزله‌ها مورد بررسی قرار گرفت و باعث افزایش اعتبار روش‌های تحلیلی شد. به این ترتیب کاربردهای عملی جداساز لرزه‌ای و سیستم‌های کنترل پاسخ، شتاب بیشتری گرفت و به ابداع تجهیزات متنوعی منجر شد. این تکنولوژی‌ها را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- جداسازی لرزه‌ای: در این تکنولوژی از المان‌های انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود که غالباً

همراه میراگرهای جاذب انرژی (مانند تکیه‌گاه‌های لاستیکی یا لغزنده) برای کاهش پاسخ

سازه‌ای، به کار برده می‌شوند. این میراگرها موجب افزایش صلبیت سازه برای جلوگیری از

ایجاد رزونانس در اثر تحریکات با فرکانس‌های پایین، می‌شوند. استفاده از جداسازهای

لرزه‌ای به طراحان این اجازه را می‌دهد که ابعاد مقاطع را کوچکتر در نظر بگیرند. تجهیزات جداسازی لرزه‌ای با دوام بالایی عرضه می‌شوند و در تمام طول عمر طراحی سازه، قابل قبول و مطلوب باقی می‌مانند.

۲- سیستم‌های کنترل پاسخ : این سیستم‌ها را می‌توان در دو حالت تعریف کرد؛ ادوات مستهلک‌کننده مستقیم انرژی، میراگرهای جرمی. گروه اول شامل میراگرهای هیستریتیک هستند که از مکانیسم اصطکاکی یا انعطاف‌پذیری فولاد استفاده می‌کنند، مانند میراگرهای روغنی و تجهیزات استفاده‌کننده از مواد ویسکوز یا ویسکوالاستیک. این ادوات به عناصر سازه‌ای نظیر مهاربندها، دیوارها، ستون‌ها و یا ترکیبی از آنها، متصل می‌شوند [۴].

در سالهای اخیر فجایع زیادی ناشی از تخریب سازه‌ها در اثر زلزله‌های شدید به وقوع پیوسته است. برخی محققان از جمله (Hall et al. 1995, Heaton et al. 1995) به دنبال پیدا کردن راه‌حل مناسبی برای غلبه بر این مشکل، از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای استفاده کردند. بر پایه مشاهدات انجام‌شده در زلزله Northridge (1994)، این محققان متوجه شدند که ساختمان‌های جداسازی‌شده از پایه در برابر حرکات قوی زمین در نزدیکی‌های کانون زلزله، آسیب‌پذیر هستند. از همین رو بازنگری‌های جدید در آیین‌نامه‌هایی همچون (ICBO 1997)، ملزومات سیستم‌های جداسازی پایه را سختگیرانه‌تر از بازنگری‌های قدیمی (ICBO 1994) در نظر گرفته است. آیین‌نامه‌های حاکم برای حفظ تعادل سازه در برابر تغییر مکان‌های بزرگ پایه و پایداری سازه در برابر زلزله‌های بزرگ، استفاده از تجهیزات میراکننده انرژی را پیشنهاد کردند (Asher et al. 1996).

از آنجاییکه میرایی اضافه حرکات روسازه و همچنین شتاب مطلق را افزایش می‌دهد، ممکن است بسیاری از مزایایی که جداسازی پایه دارد را خنثی کند (Inaudi and Kelly 1993). برای درک

بهرتر مشکلات ناشی از میرایی بیش از حد، توجه به محافظت از اجزاء غیرسازه‌ای و تجهیزات بسیار حساس مانند تجهیزات بیمارستان‌ها، مراکز ارتباطی، موزه‌ها و ... بسیار مهم است. عملکرد این تجهیزات ممکن است به واسطه شتاب وارده متوسط دچار اختلال شود و حتی در اثر شتاب‌های بالای وارده، بطور کلی از بین برود. در نتیجه کاهش خسارت به محتوای سازه‌ها، مسئله کلیدی در طراحی جداسازهای لرزه‌ای پایه است. برای مثال در زلزله Northridge (1994)، اجزاء خارجی، مبلمان و تجهیزات سازه‌ها خسارت‌های شدیدی دیدند بطوریکه تا قبل از این در چنین مقیاسی خرابی مشاهده نشده بود. در واقع برخی تجهیزات ضروری کاملاً ناکارآمد شدند که این امر ناشی از خرابی روسازه نبود، بلکه شتاب بالای وارد به سازه عامل اصلی آن شناخته شد (Hall 1995). این مشکل با توجه به نیاز منطقه زلزله‌زده به بیمارستان و تجهیزات ارتباطی بعد از وقوع زلزله، بسیار بحرانی است.

سه روش مختلف معمول برای کاهش تغییرمکان پایه در تکیه‌گاه‌های لاستیکی دمپینگ پایین که ۲ تا ۳ درصد میرایی بحرانی را در سازه ایجاد می‌کنند، استفاده می‌شوند. اولین روش افزایش میرایی استفاده از لاستیک طبیعی دمپینگ بالا است که می‌تواند میرایی را تا ۲۰ درصد بالا ببرد (Naeim and Kelly 1999). روش دوم نصب هسته‌های سربی در لاستیک دمپینگ پایین است که استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد. سومین روش استفاده از میراگرها مانند میراگرهای ویسکوز خطی و غیرخطی (Taylor and Constantinou 1996) و میراگرهای اصطکاکی (Soong and Dargush 1997) است.

سیستم‌های فعال و نیمه‌فعال، تکنولوژی‌های جدیدی هستند که قادرند بدون افزایش حرکت روسازه، تغییرمکان‌های پایه را کاهش دهند. مطالعات زیادی در این زمینه توسط محققان مختلف انجام شده است از جمله: (Spencer & Sain(1997)، (Kelly et al(1987)، (Reinhorn et al(1987)، (Nagarajaiah et al(1993)، (Schmitendorf et al(1994)، (Yoshida et al(1994)، (Yang et al(1996) [۲۱].

فصل دوم

کنترل لرزه‌ای

“A **vibration** is a motion that can't make up its mind which way it wants to go.”

From Science Exam

کنترل لرزه‌ای از ایجاد لرزش‌هایی که باعث ناپایداری سازه می‌شوند و همچنین ایجاد رزونانس در سازه، جلوگیری می‌کند. متداولترین روش کنترل لرزه‌ای سازه، کنترل غیرفعال است که نیازی به منبع خارجی انرژی ندارد. در سالهای اخیر کنترل لرزه‌ای فعال به عنوان یک تکنولوژی کلیدی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها به کار گرفته شد. با تکیه بر این تکنولوژی، ساختمان‌های بلندمرتبه با وزن سبکتر و هزینه‌های پایینتری نسبت به قبل ساخته می‌شوند. توسعه تکنولوژی کنترل مدرن بر پایه پیشرفت تکنیک‌های کاربردی کامپیوتر بنا نهاده شده است که از آن جمله می‌توان به پیدایش نرم‌افزارهای کاربردی مانند نرم‌افزار MATLAB اشاره کرد [۶].

رفتار دینامیکی سیستم‌های ارتعاشی به صورت آزمایشگاهی و عددی، تجزیه و تحلیل می‌شوند. پیشرفت‌های قابل توجه در سخت‌افزار و نرم‌افزار را می‌توان به صورت فهرست‌وار ذکر کرد:

(۱) توسعه نرم‌افزارهای طراحی سیستم‌های کنترل

(۲) در دسترس قرار داشتن کامپیوترهای با سرعت بالا و محاسبه‌گرهای دیجیتال جهت انجام

محاسبات

(۳) گسترش تجهیزات جدید کنترل لرزه‌ای فعال

(۴) پیشرفت روش‌های تحلیل لرزه‌ای کامپیوتری و شیوه‌های نوین تحلیل آزمایشگاهی

(۵) پیدایش روش‌های جدید طراحی سیستم‌های کنترل [۶].

در سالهای اخیر تکنولوژی کنترل فعال سازه‌ای در مقایسه با سیستم‌های غیرفعال، گسترش و توسعه بیشتری داشته است. در حال حاضر سیستم‌های کنترل فعال بر روی ساختمان‌های واقعی نصب و راه‌اندازی می‌شوند. تعدادی از اولین مقالاتی که در این زمینه نوشته شد عبارتند از: میلر و همکاران، کوبوری، ماسری، سونگ و یانگ در سال ۱۹۸۸، رینهورن و مانولیس در سال ۱۹۸۹ و همچنین

برخی از کتابها (مانند سونگ در سال ۱۹۹۰) در این زمینه منتشر شد که اطلاعات زیادی را در اختیار خوانندگان قرار دادند [۷].

۲-۲- طبقه‌بندی روش‌های کنترل لرزه‌ای

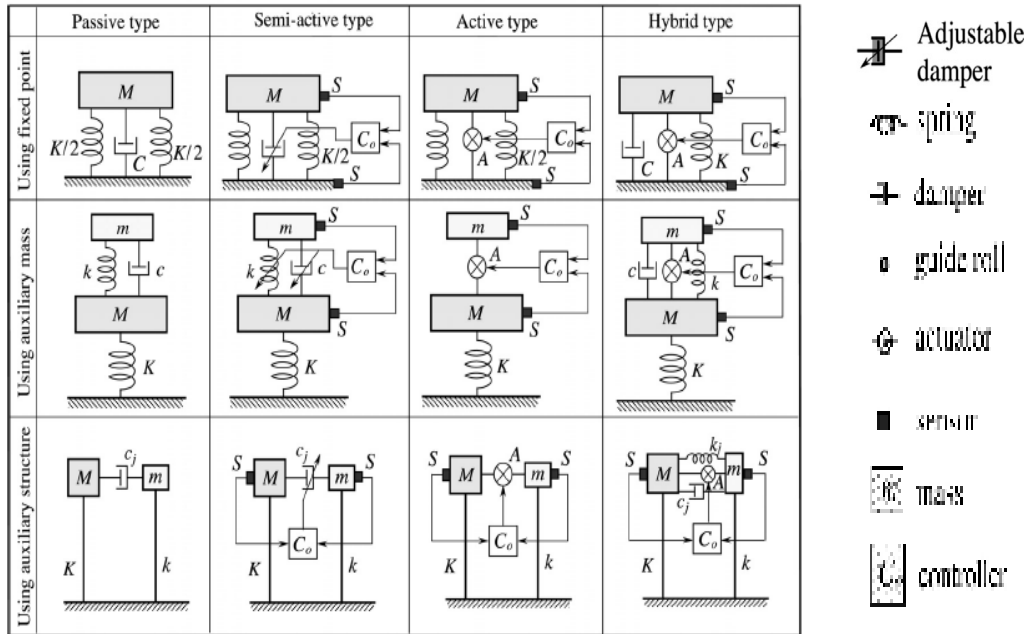
هدف اصلی کنترل لرزه‌ای سازه، حفظ پایداری سازه و قابلیت اعتماد بالا، بوسیله تجهیزات کنترل لرزه‌ای می‌باشد. تجهیزات کنترل لرزه‌ای غیرفعال بطور متداول استفاده می‌شوند؛ چراکه نیازی به منبع تغذیه انرژی ندارند و بنابراین خطری از بابت تولید انرژی در وضعیت‌های بحرانی، آنها را تهدید نمی‌کند. با وجود این، سیستم‌های غیرفعال به دلیل مجهز نبودن به حسگرها و عملگرها، نمی‌توانند در تمامی شرایط عکس‌العمل‌های مناسبی از خود بروز دهند. این مسئله باعث ظهور نسل جدیدی از تجهیزات کنترلی با نام تکنولوژی کنترل فعال شد که به حسگرها و عملگرها مجهز بودند. بطور کلی سیستم‌های کنترل لرزه‌ای به چهار دسته اصلی غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و چندگانه طبقه‌بندی می‌شوند که انواع هر کدام از آنها در شکل ۲-۱ نشان داده شده‌است، که در آن K, M و C به ترتیب جرم، ثابت فنر و ضریب میرایی مربوط به سازه و k, m و c پارامترهای مرتبط با تجهیزات کنترل هستند. S, A و C_0 نماینده عملگر، حسگر و کنترل‌کننده هستند. k_j و c_j نیز به ترتیب مربوط فنر متصل‌کننده و میراگر متصل‌کننده هستند [۶].

به این دلیل که هر عملی دارای عکس‌العملی است، لازم است که نیروی عکس‌العمل به هر طریق ممکن توسط عملگرها به‌عنوان نیروی کنترل لرزه‌ای، تولید گردد. به این ترتیب می‌توان روش‌های کنترل لرزه‌ای را بر حسب طریقه اعمال نیروی عکس‌العمل به سه دسته تقسیم کرد (Seto, 1992):

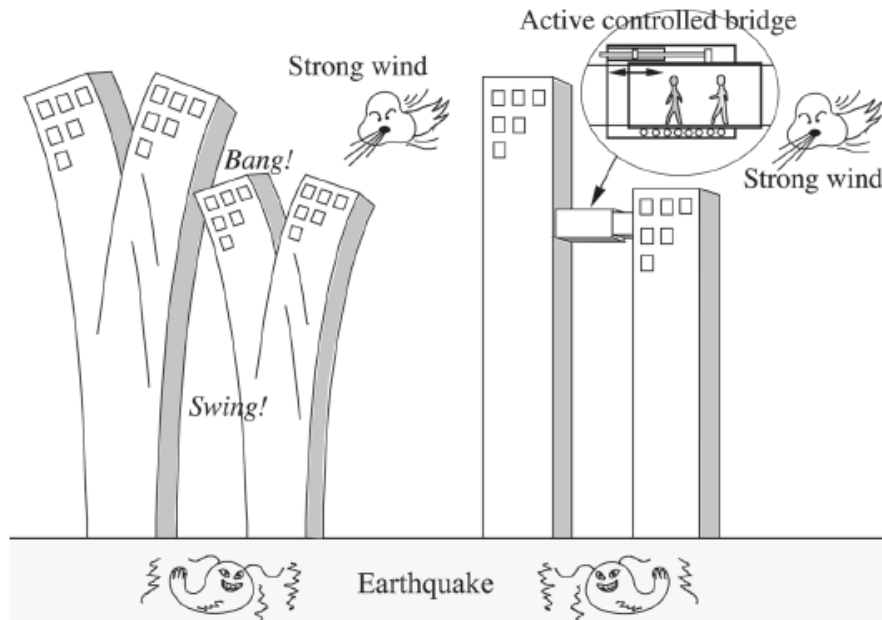
۱- استفاده از عکس‌العمل در یک نقطه ثابت (برای مثال جداسازهای لرزه‌ای)

۲- استفاده از عکس‌العمل یک جرم ثانوی (برای مثال میراگرهای جرمی)

۳- استفاده از عکس‌العمل یک سازهٔ ثانوی مطابق شکل ۲-۲: [۶]



شکل ۲-۱: طبقه‌بندی روش‌های کنترل لرزه‌ای



شکل ۲-۲: نمای کلی سیستم کنترل لرزه‌ای به روش CCM

1- Connected Control Method : CCM



شکل ۳-۲: نمای خارجی دو برج بلندمرتبه با سیستم کنترل لرزه‌ای به روش CCM

۳-۲- تجهیزات کنترل لرزه‌ای

تجهیزات کنترلی با توجه به میزان مصرف انرژی، همچنان که ذکر شد به سه دسته غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال و یا ترکیبی از آنها تحت عنوان کنترل چندگانه تقسیم‌بندی می‌گردند.

در سیستم‌های کنترل غیرفعال، تجهیزات کنترلی برای نیروی مشخصی طراحی و نصب می‌شوند و قابلیت تطابق با شرایط اعمالی مختلف را ندارند. این سیستم‌ها در مواردی که از اهمیت نسبی کمتری برخوردار هستند، به کار برده می‌شوند.

تجهیزات سیستم‌های کنترل فعال توانایی بروز عملکرد مطلوب تحت هر نوع شرایط بارگذاری را داشته و برای استهلاک انرژی در تحریکات مختلف، قابلیت تطابق دارند. این قبیل تجهیزات به نیروهای بزرگی برای ایجاد عملکرد مناسب کنترلی نیاز دارند و از آنجا که هنگام تحریکات زلزله ممکن است منبع انرژی خارجی، قابلیت مطلوب و تأثیرگذار خود را از دست بدهد، این سیستم‌ها نیز توانایی کنترل خود را از دست می‌دهند [۷].

در سالهای اخیر نیز تجهیزات نیمه‌فعال^۱ که شامل ادوات غیرفعال با خواص قابل کنترل هستند،

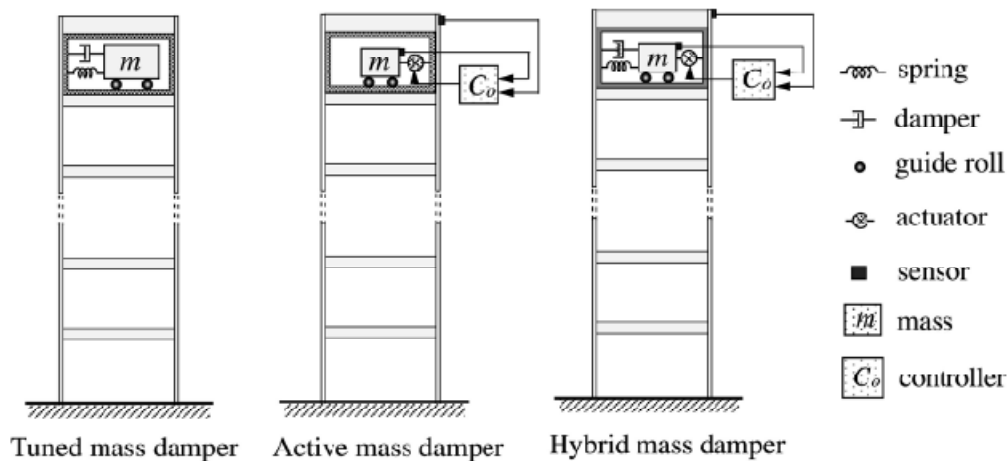
1-Semi Active or Semi Passive

به وجود آمده‌اند؛ برای مثال میراگرهای نیمه‌فعال مگنتورئولوژیکی و انتقال‌دهنده‌های پیزوالکتریک با شبکه‌های الکتریکی^۱ از این جمله هستند [۶].

در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال با وجود قابلیت تطابق نسبی با تحریکات مختلف، احتیاج به منابع بزرگ انرژی برای کنترل سازه ندارند؛ از طرفی در هنگام از دست رفتن منبع انرژی خارجی، عامل غیرفعال آنها همچنان کارآمد است. سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال انواع مختلفی دارند که از بین آنها میراگرهای سیال قابل کنترل، خواص منحصر به فردی دارند. سیال آنها شامل یک روغن می‌باشد که ذرات مغناطیسی یا الکتریکی در آن شناور هستند. هنگامی که این سیال در مجاورت میدان مغناطیسی یا الکتریکی قرار می‌گیرد، تغییر لزجت داده و در عرض چند هزارم ثانیه از حالت مایع روان به حالت نیمه‌جامد تبدیل می‌شود که در نتیجه تنش برشی آن چند برابر شده و انرژی را مستهلک می‌کند. یک راه‌حل برای دستیابی به عملکرد بهینه و پایین آوردن هزینه‌ها، استفاده از کنترل چندگانه^۲ است که شامل ترکیبی از کنترل فعال و غیرفعال می‌باشد [۶].

برای درک بهتر تفاوت تجهیزات کنترلی در انواع سیستم‌های کنترل، به شکل‌های (۲-۴)

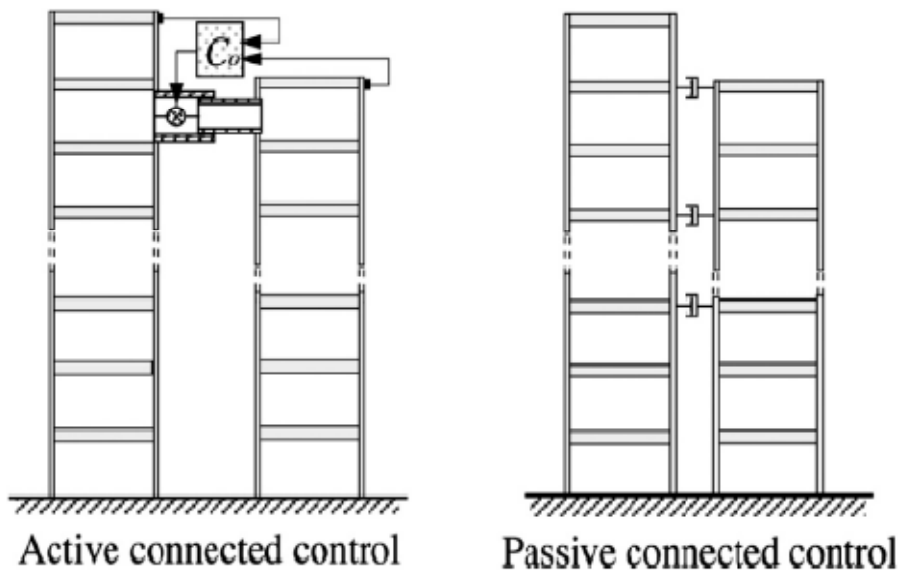
الی (۲-۷) توجه نمایید [۶]:



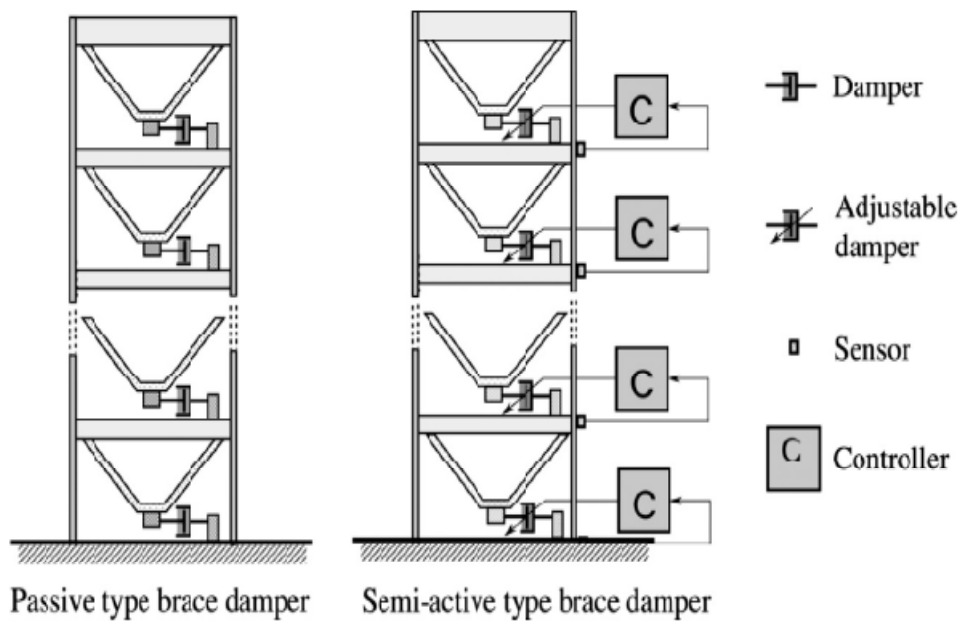
شکل ۲-۴: نمای کلی اعمال میراگر جرمی به روش تنظیم‌شده (غیرفعال)، فعال و چندگانه

1-Piezo Electric Transducer

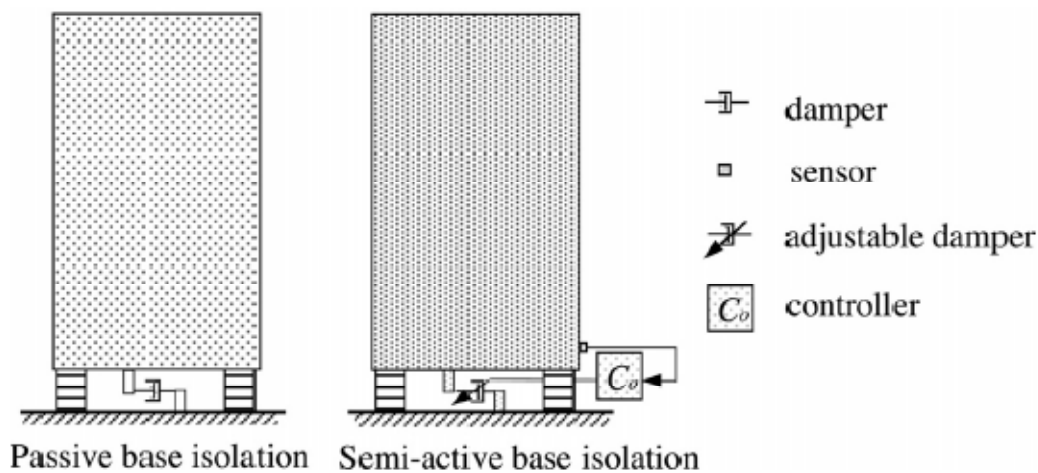
2-Hybrid



شکل ۲-۵: نمای کلی اعمال سیستم CCM به روش فعال و غیرفعال



شکل ۲-۶: نمای کلی اعمال سیستم مهاربندی به روش غیرفعال و نیمه‌فعال



شکل ۲-۷: نمای کلی اعمال سیستم جداساز لرزه‌ای به روش غیرفعال و نیمه‌فعال

۲-۴- کنترل لرزه‌ای فعال

زمانی که عملکرد بالایی موردنیاز باشد می‌توان از سیستم کنترل فعال استفاده کرد. این سیستم شامل یک سری حسگرها (جابجایی، شتاب، سرعت، نیرو و ...)، یک سری عملگرها (نیرو، اینرسی، کرنش و ...) و همچنین یک الگوریتم کنترل است. طراحی یک سیستم کنترل شامل عوامل زیادی مانند چگونگی ترکیب و ترتیب حسگرها و عملگرها و همچنین تأمین پایداری و دوام سازه است. نیروی موردنیاز جهت کنترل، مشخص‌کننده هزینه و اندازه عملگرهاست [۶].

در مهندسی سازه، کنترل فعال تکنولوژی‌هایی را شامل می‌شود که در رابطه با کنترل و تنظیم حرکات سازه بوسیله تجهیزات متحرکی است که توسط یک منبع انرژی خارجی تغذیه می‌شود. این تکنولوژی در مقایسه با سیستم‌های کنترل غیرفعال مزایایی دارد که از میان آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) تأثیرگذاری بیشتر در کنترل حرکت سازه

ب) تطابق‌پذیری با شرایط محیطی و حرکات زمین

پ) قابلیت کاربرد چندمنظوره در مقابل انواع نیروهای وارده از قبیل زلزله و باد

ت) وجود سیستم‌های متنوع و مختلف برای انتخاب با توجه به نیازهای موجود [۷].

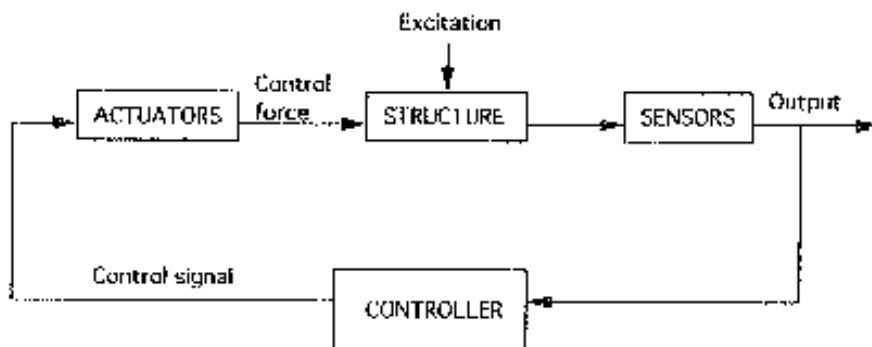
یک سیستم کنترل فعال دارای بخش‌های مختلفی به شرح زیر است که در شکل ۲-۸

به صورت شماتیک نشان داده شده است :

الف) حسگرها^۱، که درون سازه قرار می‌گیرند و برای اندازه‌گیری تحریکات خارجی اعمال شده به سازه، پاسخ سازه و یا هردو، به کار برده می‌شوند [۷]. حسگر یا حساسه معمولاً یک مبدل می‌باشد که توسط آن، کمیت فیزیکی موردنظر (مثلاً جابجایی) به صورت تناسبی به کمیت فیزیکی دیگری (مثلاً الکتریکی) تبدیل می‌شود [۱۰].

ب) پردازنده‌ها^۲، تجهیزاتی که اطلاعات اندازه‌گیری شده را دریافت می‌کنند و بر پایه الگوریتم‌های کنترلی استفاده شده در آنها، نیروهای کنترل موردنیاز را محاسبه می‌کنند [۷]. پردازنده یا کنترل‌کننده، وظیفه اجرای استراتژی کنترل را بر روی فرآیند بر عهده داشته و این عمل را از طریق عملگرها و با دریافت اطلاعات از حسگرها انجام می‌دهند [۱۰].

پ) عملگرها^۳، برای تولید و اعمال نیروی محاسبه شده به کار می‌روند و بوسیله یک منبع انرژی خارجی تغذیه می‌شوند [۷]. در واقع عملگرها عناصری هستند که متغیرهای ورودی را ایجاد می‌کنند و باعث تغییر متغیرهای خروجی می‌شوند [۱۰].



شکل ۲-۸: اجزاء اصلی حلقه کنترل فعال

- 1-Sensor
- 2-Processor
- 3-Actuator

فصل سوم

کنترل مدرن

“It is the **theory** which decides what we can observe.” *Albert Einstein*

۳-۱- مقدمه

پل واسط بین تئوری کنترل و پیاده‌سازی آن در فرآیندهای مختلف، مدلسازی دینامیکی آن فرآیند می‌باشد. نحوه مدلسازی و نگرش طراح در این زمینه، روش‌های متنوع طراحی کنترل‌کننده را سبب شده‌است. تئوری کلاسیک که در دهه ۵۰ میلادی به اوج خود رسیده‌است با تئوری‌های بودی^۱ و نایکوویست^۲ و روش‌ها تحلیلی در طراحی کنترل‌کننده‌های PID، بطور کامل در کلیه صنایع و سیستم‌های کنترل فرآیندهای صنعتی رسوخ پیدا کرد. طراحی کنترل‌کننده کلاسیک مبتنی بر فیدبک خروجی و ساختار معینی از کنترل‌کننده به‌عنوان مثال PID استوار است [۱۰].

در انتهای دهه ۵۰ و اوایل دهه ۶۰ نگرش مدرن به مدلسازی سیستم‌های دینامیکی به‌صورت فضای حالت و استفاده از روش‌های عددی و کامپیوتری به‌جای روش‌های تحلیلی، جای خود را در میان تئوری کنترل باز نمود. این نگرش، به دیدگاه مدرن مشهور است. در دیدگاه مدرن اطلاعات وردی-خروجی سیستم در متغیرهای حالت سیستم فشرده است؛ لذا ایده اصلی در طراحی کنترل‌کننده مدرن، استفاده از فیدبک حالت است [۱۰].

۳-۲- مفاهیم

الف) فضای حالت : همانطور که ذکر شد در کنترل مدرن، مدلسازی سیستم‌های دینامیکی در قالب فضای حالت^۳ صورت می‌گیرد. فرم فضای حالت با بهره‌گیری از متغیر حالت، مبنای اصلی روش‌های مدرن تحلیل و طراحی در سیستم‌های کنترل می‌باشد. با توجه به خصوصیت متغیر حالت در فشرده‌سازی اطلاعات، در دیدگاه مدرن اطلاعات وردی-خروجی سیستم در متغیرهای حالت سیستم فشرده است. به‌عبارتی متغیر حالت x ، کلیه اطلاعات ورودی در زمان قبل را به اطلاعات

1-Bode
2-Nyquist
3-State Space

خروجی‌های آینده مرتبط می‌سازد [۱۰]. به عنوان مثال معادله حرکت یک سیستم که در معرض زلزله قرار گرفته‌است، در فضای حالت بصورت معادله ۱-۳ بیان می‌شود:

$$\dot{x} = Ax + Bu + E\ddot{x}_g \quad (1-3)$$

که در آن x متغیرحالت (جابجایی سیستم)، u نیروی کنترل، \ddot{x}_g شتاب‌نگاشت زلزله، A بردار حالت، B بردار مکان کنترلگر و E بردار مکان نیروی زلزله است.

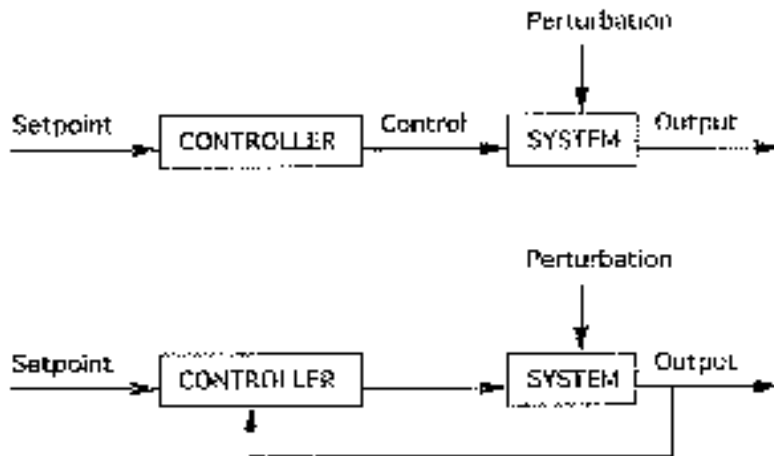
ب) تنظیم و تعقیب: در بسیاری از موارد اگر بخواهیم کمیتی فیزیکی را نزدیک به مقدار مطلوبی نگهداریم، نیاز به سیستم کنترل خودکار خواهیم داشت. اگر مقدار مطلوب ثابت باشد، هدف سیستم کنترل، تنظیم^۱ و اگر این مقدار مطلوب با زمان تغییر کند، آن را تعقیب^۲ می‌نامیم [۱۰]. به عنوان مثال ثابت نگهداشتن حرکت افقی سازه نزدیک به صفر، تنظیم و کنترل حرکت بازوی یک روبات برای طی یک مسیر مشخص، تعقیب نامیده می‌شود.

پیشرفته‌ترین سیستم‌های کنترل را می‌توان در طبیعت مشاهده کرد. درجه حرارت بدن انسان تقریباً همواره ۳۷ درجه سانتیگراد می‌باشد (تنظیم). با بالا رفتن فعالیت بدنی به موازات آن ضربان قلب نیز بالا می‌رود تا اکسیژن بیشتری را به اعضاء برسد (تعقیب). روش به‌ظاهر ساده‌ای که در آن دست خود را دراز کرده و یک فنجان چای را برمی‌داریم، دارای راه‌حل بسیار پیچیده در علم روباتیک می‌باشد.

پ) سیستم حلقه-باز و حلقه-بسته: زمانی که فقط تحریکات محیطی اندازه‌گیری می‌شوند، ساختار سیستم به‌عنوان حلقه-باز^۳ معرفی می‌گردد. از طرف دیگر وقتی که فقط متغیرهای پاسخ سازه

1-Regulation
2-Tracking
3-Open-loop

اندازه‌گیری می‌شود، ساختار کنترل به عنوان حلقه-بسته^۱ شناخته می‌شود، که در شکل ۱-۳ به صورت شماتیک نشان داده شده‌است. در مواردی که هر دو مقدار پاسخ سازه‌ای و تحریکات محیطی اندازه‌گیری می‌شوند و در محاسبه نیروی کنترل استفاده می‌گردند، عبارت حلقه باز-بسته^۲ به کار برده می‌شود [۷].



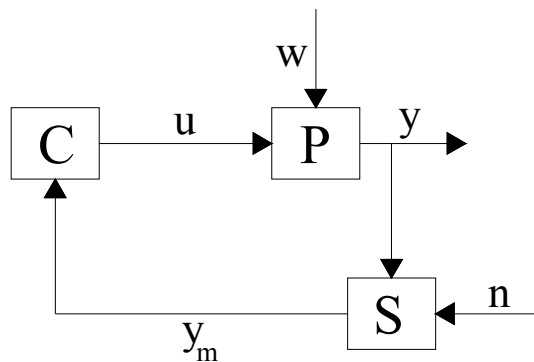
شکل ۱-۳: نمایش یک سیستم حلقه-باز و حلقه-بسته

ت) کنترل فیدفوروارد و فیدبک : در مواردی که سیستم تحت تأثیر منابع تحریک خارجی مشخصی است و اغتشاش آن قابل اندازه‌گیری و یقین‌اندیشانه است (مانند یک موتور چرخشی برون محور)، سیستم کنترل فیدفوروارد^۳ به کار گرفته می‌شود؛ به این صورت که با آگاهی از پاسخ سیستم، نیروی کنترلی محاسبه و اعمال می‌گردد. استراتژی فیدبک^۴ نیز در مواردی به کار برده می‌شود که اغتشاشات به صورت تصادفی یا ترکیبی از یقین‌اندیشانه و احتمال‌اندیشانه باشند. در این مورد

-
- 1-Closed-loop
 - 2-Open-closed loop
 - 3-Feedforward
 - 4-Feedback

اغتاشات به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شوند و بازخورد پاسخ سیستم، تحت تأثیر اغتاش و نیروی کنترل اندازه‌گیری می‌گردد [۶].

ث) سیستم کنترل : شکل ۲-۳ نمایش کلی سیستم‌های کنترل را نشان می‌دهد. مهمترین شاخص تئوری کنترل، کاربردی بودن آن در زمینه‌های مختلف مهندسی و حتی غیر مهندسی می‌باشد. علت توفیق تئوری کنترل در زمینه‌های مختلف، توانایی توصیف مسائل گوناگون در یک قالب یکسان می‌باشد.



شکل ۲-۳ : نمایش کلی سیستم کنترل

P نشان‌دهنده فرآیند است که توسط مدل ریاضی آن تعیین می‌شود. فرآیند به موضوعی اطلاق می‌شود که تحت کنترل قرار گرفته‌است. برای مثال یک ساختمان می‌تواند به‌عنوان یک فرآیند مطرح گردد. u ورودی کنترل و w ورودی اغتاشی فرآیند نامیده می‌شود. y نیز خروجی فرآیند است که کلیه این کمیت‌ها به صورت برداری در نظر گرفته می‌شوند. y تحت نویز وارده n ، مقدار اندازه‌گیری شده y_m را تولید می‌کند. همچنین S نماد حسگر و C نماد کنترل‌کننده می‌باشد [۱۰].

ج) رؤیت‌پذیری و کنترل‌پذیری : رؤیت‌پذیری^۱ ، مسئله نحوه و محل اندازه‌گیری اطلاعات مربوط به خروجی y و توانایی این اطلاعات بدست آمده را در تعیین دینامیک سیستم و متغیرهای حالت سیستم، موردبررسی قرار می‌دهد. مفهوم کنترل‌پذیری^۲ بسیار مشابه رؤیت‌پذیری است؛ با این تفاوت که در این ایده، ارتباط ورودی u و متغیر حالت x را بررسی می‌کنیم. در واقع کنترل‌پذیری به معنای توانایی کنترل u در تأثیرگذاری روی کلیه عناصر متغیر حالت x است؛ در نتیجه کنترل‌پذیری به عملگرها و نحوه چیدمان آنها مرتبط می‌باشد، در صورتی که رؤیت‌پذیری به حسگرها و نحوه چیدمان آنها مربوط می‌شود [۱۰].

چهار دلیل عمده استفاده از سیستم‌های کنترل را می‌توان به صورت زیر نام برد [۱۰] :

- ۱- عملکرد : عملکرد مناسب بسیاری از سیستم‌ها، وابسته به استفاده سیستم کنترل مناسب در آنهاست. به عنوان مثال عملکرد مناسب هواپیماهای مسافربری در حمل‌ونقل و هواپیماهای جنگی در ایجاد مانورهای دشوار، مدیون سیستم کنترل آن است. در کلیه پروسه‌های تولید، نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها، سیستم‌های کنترل نقش مهمی را ایفا می‌کنند.
- ۲- بهره‌وری : مسائل اقتصادی و بهره‌وری مناسب نیز دلیل عمده دیگر استفاده از سیستم‌های کنترل می‌باشد. این امر بخصوص در فرآیندهای تولیدی بسیار حائز اهمیت است. سرعت تولید به همراه رسیدن به کیفیت مناسب و ضایعات حداقل، از عوامل بسیار مهم اقتصادی است که توسط سیستم‌های اتوماسیون و کنترل قابل دسترسی است.
- ۳- امنیت کاربر : این مسئله در مورد سیستم‌های کنترل به کار رفته در ساختمان‌ها، نیروگاه‌ها و سایر تأسیسات حیاتی، بسیار حائز اهمیت است. بسیاری از سیستم‌ها دارای محدوده‌های کوچک خطی در عملکرد می‌باشند که تنها توسط سیستم‌های کنترل خودکار، در محدوده

1-Observability
2-Controllability

ایمن کار خواهند نمود.

۴- قابلیت اطمینان : درجه اطمینان بیشتر در محدوده عملکرد، توسط سیستم‌های کنترل قابل دستیابی است. سیستم‌های کنترل، تغییرات سریع کمیت‌های فیزیکی در سیستم‌های کنترل‌شده را به حداقل می‌رسانند و این موضوع به صورت طبیعی باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود.

۳-۳- کنترل مقاوم

تحلیل و طراحی سیستم‌ها و فرآیندها از جمله مهمترین مسائل علم کنترل به‌شمار می‌رود. قدم اول در این مسئله مدلسازی پروسه تحت کنترل است که در بررسی‌ها و محاسبات جایگزین سیستم یا فرآیند واقعی می‌شود. به دلایل مختلف از جمله طبیعت پیچیده و غیرخطی سیستم‌ها، عدم امکان استفاده از مدل‌های پیچیده در محاسبات و همچنین تغییر احتمالی مشخصات سیستم‌ها و فرآیندها، مدل‌های انتخاب‌شده هیچ‌گاه بطور دقیق بر سیستم اصلی منطبق نیستند؛ بنابراین وجود عدم قطعیت در مدل سیستم‌ها، امری بدیهی به‌نظر می‌رسد. با توجه به این موضوع در علم کنترل مبحثی با عنوان کنترل مقاوم مطرح می‌گردد. در حقیقت هدف کنترل مقاوم، تحلیل و طراحی سیستم به‌گونه‌ای است که در دنیای واقعیت، عملکرد مطلوب خود را حفظ نماید.

بطور مختصر منابع و عوامل عدم قطعیت در سیستم را می‌توان به صورت زیر برشمرد :

- ۱- عدم تعیین دقیق پارامترهای مدل به علت محدودیت‌های اندازه‌گیری و محاسبات
- ۲- ساده‌سازی و کاهش درجات آزادی مدل‌ها از طریق حذف دینامیک‌های کم‌اهمیت
- ۳- غیرخطی بودن معادلات و خطای ناشی از خطی‌سازی آنها
- ۴- عدم شناخت کافی از سیستم فیزیکی و در نتیجه بروز خطا در مدلسازی به علت برخی

دینامیک‌ها و تأخیرات مدل نشده

- ۵- صرف‌نظر کردن از برخی دینامیک‌ها و تأخیرات مدل، عملگرها و حسگرها
- ۶- خطای تجهیزات کنترلی
- ۷- خطای محاسبات در تحلیل و طراحی و همچنین تأخیر در زمان محاسبه
- ۸- ورودی‌های اغتشاشی پیش‌بینی نشده [۱۱]

۳-۳-۱- تاریخچه

روند پیشرفت علم کنترل از لحاظ تاریخی را می‌توان به سه دوران تقسیم‌بندی کرد؛ دوران اول که در محدوده سالهای ۱۹۳۰ و ۱۹۶۰ میلادی واقع شده، به دوران کنترل کلاسیک مشهور است. تکنیک‌های آنالیز این دوران عبارت بودند از دیاگرام‌های بودی، نایکوئیست و مکان ریشه^۱. همچنین از جمله کنترل‌کننده‌های متداول این دوران می‌توان به کنترل‌کننده‌های تقدم فاز^۲، تأخیر فاز و PID اشاره کرد. این روش‌ها هنوز هم در صنعت کاربرد دارد.

دوران دوم که مربوط به سالهای بین ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ میلادی می‌باشد، به دوران کنترل مدرن معروف شده است که به تکنیک‌های آنالیز و طراحی فضای حالت اختصاص دارد. یکی از روش‌های طراحی این دوران روش LQR می‌باشد که روش به‌کار رفته در این تحقیق است.

دوران سوم کنترل که به دوران کنترل مقاوم شهرت یافته است از حدود سال ۱۹۸۰ میلادی آغاز شد. روش‌های معرفی‌شده در این دوران با توجه به در نظر گرفتن مسأله عدم قطعیت، به تدریج در حال توسعه و استفاده در صنعت هستند [۱۰].

1-Root Locus
2-Lead Controller

۳-۳-۲- ضرورت استفاده از کنترل مقاوم

بسیاری از روش‌های متداول تحلیل و طراحی کنترل سیستم‌ها، مانند روش‌های کلاسیک و بهینه، بر مبنای مدل نامی سیستم‌ها^۱ پایه‌گذاری شده‌اند. بنابراین در صورت بروز هرگونه تغییر و انحراف از مدل نامی، ممکن است کنترل‌کننده نتواند عملکرد مطلوبی داشته باشد. در برخی روش‌ها اثر تغییر پارامترهای سیستم تا حدودی در نظر گرفته می‌شود؛ اما چون به‌عنوان یک هدف اصلی در تحلیل و طراحی سیستم استفاده نمی‌شود، کارایی این روش‌ها را فقط در برابر تغییرات سیگنال کوچک^۲ تضمین می‌نماید. مدل‌هایی که برای سیستم‌های واقعی شبیه‌سازی می‌شوند، به دلایل مختلف رفتار کاملاً منطقی با رفتار سیستم واقعی ندارند. کنترل مقاوم در حالت کلی عبارتست از تحلیل و طراحی کنترل‌کننده‌های ثابت برای مدل نامی سیستم‌ها در حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مختلف [۱۱].

۳-۳-۳- فرآیند تحلیل و طراحی در کنترل مقاوم

فرآیند تحلیل در کنترل مقاوم دو نگرش کلی را شامل می‌شود:

۱- در نگرش اول فرض بر این است که دامنه عدم قطعیت‌ها مشخص می‌باشد و لذا هدف تحلیل، بررسی پایداری و عملکرد مناسب در حضور کلیه عدم قطعیت‌های مجاز سیستم می‌باشد.

۲- در نگرش دوم فرض می‌شود که ساختار احتمالی عدم قطعیت‌ها مشخص می‌باشد؛ بنابراین هدف تحلیل، یافتن حداکثر عدم قطعیت‌های مجاز سیستم می‌باشد مشروط بر اینکه پایداری و عملکرد سیستم حلقه-بسته در حد مطلوب حفظ شود. این نگرش تحت‌عنوان محاسبه حاشیه پایداری و عملکرد مطرح می‌گردد. حسن عمده این نگرش این است که با کمک آن می‌توان قابلیت و کارایی

1-Nominal Model

2-Small Signal

روش‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد.

در مسأله طراحی هدف آن است که با در نظر گرفتن محدوده و ساختار عدم قطعیت در سیستم، کنترل‌کننده‌ای بیابیم که در حضور عدم قطعیت‌های مجاز، علاوه بر تضمین پایداری حلقه-بسته، مشخصه‌های عملکردی مطلوبی نیز داشته باشد [۱۱].

۳-۴- فیدبک حالت

همانطور که ذکر شد در دیدگاه مدرن، اطلاعات ورودی و خروجی سیستم در متغیرهای حالت سیستم فشرده است؛ لذا ایده اصلی در طراحی کنترل‌کننده مدرن، استفاده از فیدبک حالت می‌باشد. در این بخش ابتدا فرآیند طراحی کنترل‌کننده را عنوان کرده و سپس به بررسی فیدبک حالت می‌پردازیم. در نهایت نیز روش طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت بهینه (LQR) را بیان می‌کنیم.

۳-۴-۱- فرآیند طراحی کنترل‌کننده

هدف از طراحی کنترل‌کننده این است که با وجود اغتشاشات w ، نویز اندازه‌گیری v ، عدم دقت در مدلسازی فرآیند P و محدودیت‌های عملگرها و حسگرها، حتی‌المقدور خروجی سیستم $y(t)$ نزدیک به مقدار مطلوب $y_d(t)$ باقی بماند. طراحی کنترل‌کننده به معنای ایجاد رابطه ریاضی مناسب یا استراتژی منطقی مناسب برای رسیدن به هدف فوق است. با استفاده از المان فیدبک، یعنی در دسترس داشتن اطلاعات خروجی y_m برای تولید فرآیند کنترلی u ، می‌توان هدف کنترلی فوق را با وجود محدودیت‌ها و خواسته‌های متعدد بدست آورد. به‌منظور طراحی کنترل‌کننده مناسب بایستی مراحل زیر محقق گردد:

- مدلسازی فرآیند

- تعیین مشخصات فیزیکی w و y_d در حوزه زمان یا فرکانس

- مشخص نمودن معیار یا معیارهای عملکرد

- مدلسازی ریاضی عملگرها، حسگرها، مشخصات فیزیکی نوین اندازه‌گیری و ...

- مشخص نمودن فرم عمومی کنترل‌کننده (به‌عنوان مثال فیدبک حالت یا PID)

همانگونه که مشخص است طراحی موفق کنترل‌کننده و پیاده‌سازی آن نیازمند تخصص‌های

مختلف (برق، مکانیک، کامپیوتر و ...) است؛ لذا غالباً این عملیات به‌صورت گروهی صورت

می‌گیرد [۱۰].

۳-۴-۲- بررسی فیدبک حالت

سیستم خطی زیر را در نظر بگیرید :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (۲-۳)$$

که در آن x متغیر حالت n بُعدی، u ورودی r بُعدی و y خروجی m بُعدی می‌باشد. با توجه به

خواص متغیر حالت x که کلیه اطلاعات ورودی در زمان قبل را به اطلاعات خروجی‌های آینده مرتبط

می‌سازد، اگر کنترل‌کننده u را تابعی از x در نظر بگیریم، می‌توان قابلیت لازم جهت پایدارسازی

سیستم همزمان با تنظیم یا حذف اغتشاش را بدست آورد. در سیستم‌های خطی این کنترل‌کننده را

نیز تابعی خطی از x در نظر می‌گیریم و داریم :

$$u = -kx \quad (۳-۳)$$

علامت منفی اشاره به مفهوم فیدبک منفی دارد؛ ولی چون متغیر x یکتا نیست، بسته به

تحقق‌های مختلف از یک سیستم، k می‌تواند مثبت یا منفی باشد و تنها به‌خاطر توجه به اهمیت

فیدبک منفی در پایدارسازی سیستم‌ها، از علامت منفی استفاده شده است. در اینجا ماتریس k را ماتریس بهره‌ر حالت می‌نامیم [۱۰].

۳-۴-۳- کنترل فیدبک حالت بهینه : LQR

عبارت LQR^۱ در واقع معرف تنظیم‌کننده خطی با شاخص عملکردی مربعی می‌باشد. روش خطی-مربعی^۲، شاید مهمترین نتیجه کنترل مدرن در طراحی کنترل‌کننده‌های فیدبک حالت باشد. بسیاری از مسائل مهندسی توسط این روش حل گشته و روش‌های گوناگون عددی برای حل مسئله ابداع شده است. در روش کنترل فیدبک حالت بهینه، معیار عملکرد یا مشخصه‌ای را به صورت زیر تعریف می‌کنیم :

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (۴-۳)$$

که در آن Q, R ماتریس‌های متقارن بوده و $Q \geq 0, R > 0$ می‌باشند. بایستی توجه داشت که معیارهای عملکردی سیستم حلقه-بسته همانند پایداری داخلی، تنظیم یا تعقیب، حذف اغتشاش، حذف نویز و عدم حساسیت به مدل، غالباً پیچیده‌تر از آن است که در یک تابع J فشرده شود [۱۰]. در مسئله طراحی کنترل فیدبک حالت بهینه LQR، ابتدا سیستم خطی زیر را در نظر می‌گیریم :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (۵-۳)$$

می‌خواهیم کنترل فیدبک حالت $u = -kx$ را به گونه‌ای طراحی کنیم که معیار عملکرد J را کمینه سازد. معادله سیستم حلقه-بسته و معیار عملکرد آن به صورت زیر خواهد بود :

1-Linear Quadratic Regulator : LQR
2-LQ

$$\dot{x} = (A - Bk)x$$

$$J = \int_0^{\infty} x^T(t)(Qx + k^T R k)x(t) dt \quad (6-3)$$

برای اینکه مسئله جواب داشته باشد ابتدا بایستی کنترل کننده بتواند سیستم را پایدار سازد و یا در حالت جامع تر، سیستم باید کنترل پذیر باشد.

برای اینکه ماتریس بهره کنترل k ، بتواند معیار طراحی J را به ازای کلیه شرایط اولیه $x(0)$ کمینه سازد، بایستی در معادله زیر صدق کند :

$$k = R^{-1} B^T P \quad (7-3)$$

که در آن P در معادله ماتریسی ریکاتی زیر صدق می کند :

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (8-3)$$

در نرم افزار MATLAB این معادله توسط دستور LQR قابل حل است [۱۲]. با دانستن بهره کنترل k ، نیروی کنترل u را بدست آورده و به سیستم اعمال می کنیم [۱۰].

۳-۵- رؤیتگر حالت [۱۰]

در کلیه روش های طراحی کنترل کننده فیدبک حالت، فرض بر این است که کلیه متغیرهای حالت در دسترس باشند؛ در صورتی که در عمل برای اندازه گیری هر یک از متغیرهای حالت، نیاز به نصب حسگر و سیستم های اندازه گیری می باشد که این امر مستلزم صرف هزینه های زیادی است. به این ترتیب تنها برخی از متغیرهای حالت و یا ترکیب خطی آنها اندازه گیری می شود و یا در فرم کلاسیک، تنها فیدبک خروجی در دسترس است. در نتیجه به نظر می رسد کاربرد فیدبک حالت به شدت تحت الشعاع قرار می گیرد. راه حل منطقی این مسئله، تخمین متغیرهای حالت از روی خروجی هاست. این عملیات تخمین توسط سیستم دینامیکی به نام رؤیتگر حالت صورت می گیرد که

ورودی آن، خروجی سیستم اصلی و خروجی آن، متغیرهای حالت تخمین زده شده می‌باشند. در این صورت امکان استفاده از فیدبک حالت حتی در مواردی که کلیه متغیرهای حالت اندازه‌گیری نشوند، امکان‌پذیر است.

۳-۵-۱- رؤیتگر مقدماتی

سیستم خطی زیر را در نظر بگیرید :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (۹-۳)$$

اگر این مدل را به صورت دینامیکی در کنار سیستم اصلی مشابه‌سازی کنیم، می‌توان تخمینی از متغیرهای حالت به دست آورد. اگر تخمین را با \hat{x} نشان دهیم، ساده‌ترین معادله تخمین به صورت طبیعی برابر است با :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu \quad (۱۰-۳)$$

که در آن فرض بر آن است که \hat{x} بتواند متغیر حالت را تعقیب کند.

حال اگر خطای تخمین را با e معرفی کنیم، خواهیم داشت :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (۱۱-۳)$$

دینامیک خطا را با مشتق‌گیری از معادله بالا می‌توان تعیین کرد:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ &= Ax + Bu - A\hat{x} - Bu \\ &= A(x - \hat{x}) \\ &= Ae \end{aligned} \quad (۱۲-۳)$$

اگر سیستم پایدار باشد، این خطا به سمت صفر میل می‌کند و لذا در حالت مجانبی، \hat{x} متغیر حالت x را تعقیب می‌کند.

ایده اصلی رُویتگر، استفاده از دینامیک اصلی سیستم در تخمین حالت می باشد؛ اما ایراد اصلی این روش آن است که اعمال کنترلی بر دینامیک خطا وجود نداشته و در حالتی که سیستم A دینامیک مناسبی نداشته باشد، به روند مطلوبی برای تخمین متغیرهای حالت نخواهیم رسید. به بیان دیگر در این روش، نیاز به اطلاعات دقیق از دینامیک اصلی سیستم (ماتریس های A و B) است که این امر هیچ گاه به صورت کامل تحقق نمی یابد. در نتیجه هرگونه خطای مدلسازی، دقیقاً در تخمین حالت تأثیرگذار بوده و سیستم رُویتگر را از حد مطلوب خارج می کند.

۳-۵-۲- رُویتگر مرتبه کامل

حال سیستم خطی کامل زیر را با معادله خروجی در نظر بگیرید :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (13-3)$$

معادله تخمین حالت را با فیدبکی از اطلاعات خروجی، به صورت زیر تکمیل می کنیم :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G(y - C\hat{x}) \quad (14-3)$$

که در آن G یک ماتریس $n \times m$ (n تعداد متغیرهای حالت و m تعداد خروجی ها) می باشد و به عنوان ماتریس بهره رُویتگر نامیده می شود. همانطور که ملاحظه می شود در این معادله یک عبارت اصلاحی به رُویتگر مقدماتی اضافه شده است. در این صورت اگر $\hat{x} = x$ باشد، یعنی تخمین متغیر حالت بطور ایده آل هیچ خطایی نداشته باشد، عبارت اصلاحی برابر صفر است و هیچ تأثیری در معادله نخواهد داشت :

$$y - C\hat{x} = y - Cx = 0 \quad (15-3)$$

از طرف دیگر در صورتی که به هر دلیلی از جمله کامل نبودن مدل، دقیق نبودن تخمین و ... ، $\hat{x} \neq x$ باشد، ترم اصلاحی به صورت مثبت به معادله دینامیکی اضافه شده و در نتیجه دینامیک خطا

را پایدارتر کرده و مطابق خواست طراح، سرعت همگرایی خطا به سمت صفر را تنظیم می‌کند.

۳-۵-۳- رؤیتگر بهینه : فیلتر کالمن

فیلتر کالمن^۱ در عمل یکی از موفق‌ترین روش‌های تخمین می‌باشد. فیلتر کالمن در سال ۱۹۹۴ به‌عنوان موفق‌ترین و کارآمدترین تئوری در میان تئوری‌های متنوع کنترل در انجمن علمی IEEE برگزیده شد. این تئوری که در سال ۱۹۶۰ به‌سختی به‌عنوان تز دکترا پذیرفته شد و چند بار در مرحله داوری برای چاپ در مجلات علمی مردود شناخته شد، پس از کاربرد موفق در زمینه‌های مختلف از جمله تئوری تخمین، ناوبری و هدایت و ... ، بعد از ۳۵ سال به این درجه اعتبار نائل گردید. در طراحی رؤیتگر بهینه فرض می‌کنیم مدل‌سازی دارای خطا باشد؛ در نتیجه خواهیم داشت :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + w \\ y = Cx + v \end{cases} \quad (۱۶-۳)$$

از یک نظر w را می‌توان خطای مدل‌سازی سیستم فرض نمود، که به‌صورت مستقیم با معادله سیستم جمع شده است. از طرفی اندازه‌گیری خروجی‌ها نیز دارای نویز اندازه‌گیری v می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان w را نویز فرآیند و v را نویز اندازه‌گیری در نظر گرفت. از قسمت رؤیتگر مرتبه کامل داریم :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G(y - C\hat{x}) \quad (۱۷-۳)$$

در نتیجه معادله خطا عبارتست از :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = (A - GC)e + w - Gv \quad (۱۸-۳)$$

در طراحی رؤیتگر بهینه از دیدگاه کالمن، با توجه به منابع اتفاقی w, v ، فرآیندهای سیستم را

به صورت اتفاقی تعبیر نموده و با اعمال شرایط آماری برای v, w ، سعی می‌کنیم واریانس خطای تخمین را کمینه کنیم. در این دیدگاه فرض می‌شود $v(t), w(t)$ فرآیندهای تصادفی گوسی به صورت نویز سفید باشند، که کوواریانس آنها به ترتیب V, W می‌باشد. رؤیتگر بهینه در این دیدگاه واریانس خطا را که خود یک فرآیند تصادفی گوسی می‌باشد، با شاخص کمینه‌سازی زیر بهینه می‌نماید:

$$J = E \left\{ \int_0^{\infty} e^T(t) e(t) dt \right\} \quad (19-3)$$

لذا این خطا که خود تابع شناخت مشخصات آماری عدم دقت در مدلسازی با نویز فرآیند w و نویز اندازه‌گیری v می‌باشد، در این حالت کمینه شده و مصالحه‌ای بین سرعت پاسخ و میزان استفاده از اطلاعات اولیه برقرار می‌کند.

تفضیل بیشتر این دیدگاه نیاز به مقدمات فرآیندهای تصادفی دارد که از حوصله این بحث خارج است. در حالت کلی دلایل موفقیت این دیدگاه در دو اصل نهفته است که عبارتند از:

(۱) عدم نیاز به مدل دقیق و مقاوم بودن: با توجه به وجود V, W و در نظر گرفتن نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیری و عدم قطعیت آنها، رؤیتگر بهینه‌ای طراحی می‌شود که واریانس خطای تخمین را کمینه کند. در صورتی که W را بزرگتر از V در نظر بگیریم، بدان معناست که اطلاعات ما از مدل کم بوده، ولی فیدبک اطلاعاتی که از خروجی می‌گیریم، دقیق است. بدین ترتیب با عدم تکیه به مدل و با اعمال درجه اعتبار بیشتر نسبت به اطلاعات ورودی، رؤیتگر بهینه به خوبی عمل خواهد نمود. از طرف دیگر اگر خروجی‌ها با نویز زیادی همراه بوده و یا از درجه اعتبار زیادی برخوردار نباشند، در حالتی که بتوان مدل مناسبی برای فرآیند استخراج نمود، باز هم به تخمین مناسب متغیرهای حالت سیستم و یا فیلتر کردن بهینه خروجی‌ها نائل می‌شویم.

(۲) عدم محدودیت در اجراء: حل رؤیتگر بهینه در واقع دوگان کنترل بهینه است. ولی از لحاظ پیاده‌سازی با هم اختلاف اساسی دارند. در کنترل‌کننده بهینه، حاصل محاسبات همان بهره فیدبک

حالت k می‌باشد که به صورت $u=-kx$ بر روی سیستم واقعی پیاده‌سازی می‌گردد و چون عملگرها عموماً دارای محدودیت دامنه و فرکانس عملکرد می‌باشند، لذا نمی‌توان بهره فیدبک را به اندازه دلخواه بزرگ نمود و سرعت عملکرد پاسخ را به شکل مطلوب و بدون محدودیت تنظیم کرد. در صورتی که در پیاده‌سازی فیلتر کالمن، کلیه عملیات لازم برای تحقق فیلتر، بر روی میکروپروسسور یا کامپیوتر صورت می‌گیرد و لذا هیچ‌گونه محدودیت فیزیکی در افزایش بهره رُیتگر G و تنظیم سرعت همگرایی خطای تخمین، وجود ندارد.

لازم به ذکر است که در این تحقیق از حالت $full\ state\ feedback$ استفاده شده است؛ بدین معنی که فرض شده است در تمامی طبقات حسگر کار گذاشته شده و در هر لحظه متغیرهای حالت در حال اندازه‌گیری هستند.

فصل چهارم

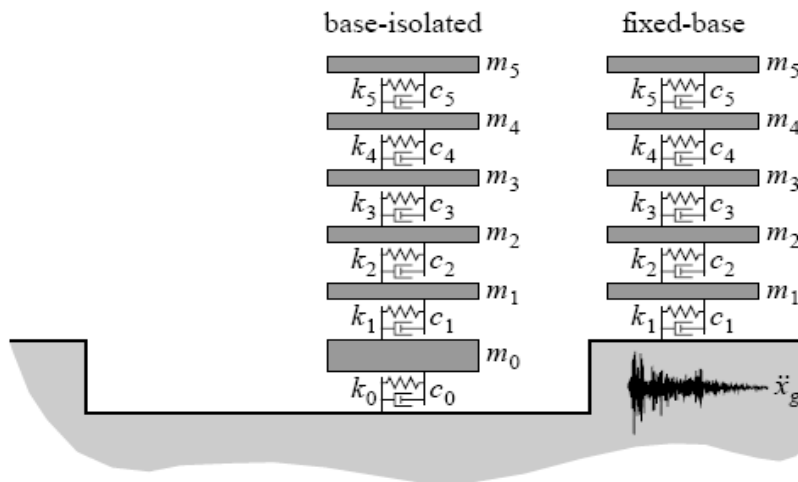
مدلسازی و تحلیل نتایج

“The best **model** of a cat is another, or preferably the same, cat.”

Arturo Rosenblueth with Norbert Wiener

۱-۴ مقدمه

در این تحقیق از دو مدل مختلف استفاده شده است. مدل شماره ۱، مدل Kelly و همکاران (۱۹۸۷) می‌باشد [۱۳] که یک سازه پنج درجه آزادی است و بر روی جداساز لرزه‌ای قرار گرفته‌است. با توجه به استفاده از سیستمهای جداساز لرزه‌ای در ساختمانهای با ارتفاع کم و متوسط [۱۴]، این مدل می‌تواند نماینده مناسبی برای این نوع سازه‌ها باشد. طرح کلی مدل مورد استفاده مطابق شکل ۱-۴ و مشخصه‌های اصلی آن مطابق جدول ۱-۴ می‌باشد.



شکل ۱-۴: طرح کلی مدل مورد استفاده

جدول ۱-۴: مشخصات مدل شماره ۱، Kelly و همکاران (۱۹۸۷)

Structural model parameters (Kelley et al, 1987).

Floor Masses [kg]	Stiffness Coefficients [kN/m]	Damping Coefficients [kNs/m]
$m_0 = 6800$	$k_0 = 231.5$	$c_0 = 7.45$
$m_1 = 5897$	$k_1 = 33732$	$c_1 = 67$
$m_2 = 5897$	$k_2 = 29093$	$c_2 = 58$
$m_3 = 5897$	$k_3 = 28621$	$c_3 = 57$
$m_4 = 5897$	$k_4 = 24954$	$c_4 = 50$
$m_5 = 5897$	$k_5 = 19059$	$c_5 = 38$

مدل شماره ۲، مدل R.Guclu و H.Yazici است [۱۵] که یک سازه چهارده درجه آزادی می باشد و بر روی جداساز لرزه ای قرار گرفته است. مشخصه های اصلی آن مطابق جدول ۴-۲ می باشد. این مدل به عنوان نماینده سازه های بلندمرتبه عملکرد جداساز لرزه ای را بر روی این قبیل سازه ها نشان می دهد. این دو مدل بوسیله نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و برای اعمال سیستم کنترل فعال از الگوریتم LQR استفاده شده است.

این مدل ها در سه حالت مختلف، Fixed Structure برای حالت بدون جداساز لرزه ای و Base Isolated برای حالت با جداساز لرزه ای فعال و با جداساز لرزه ای غیرفعال، مورد بررسی قرار گرفته اند.

جدول ۴-۲: مشخصات مدل شماره ۲، H.Yazici & R.Guclu

R. Guclu, H. Yazici

Mass parameters (kg)	Stiffness parameters (N/m)	Damping parameters (Ns/m)
$m_1 = 450,000$	$k_1 = 18050,000$	$c_1 = 26,170$
$m_2 = 345,600$	$k_2 = 340,400,000$	$c_2 = 293,700$
$m_3 = 345,600$	$k_3 = 340,400,000$	$c_3 = 293,700$
$m_4 = 345,600$	$k_4 = 340,400,000$	$c_4 = 293,700$
$m_5 = 345,600$	$k_5 = 340,400,000$	$c_5 = 293,700$
$m_6 = 345,600$	$k_6 = 340,400,000$	$c_6 = 293,700$
$m_7 = 345,600$	$k_7 = 340,400,000$	$c_7 = 293,700$
$m_8 = 345,600$	$k_8 = 340,400,000$	$c_8 = 293,700$
$m_9 = 345,600$	$k_9 = 340,400,000$	$c_9 = 293,700$
$m_{10} = 345,600$	$k_{10} = 340,400,000$	$c_{10} = 293,700$
$m_{11} = 345,600$	$k_{11} = 340,400,000$	$c_{11} = 293,700$
$m_{12} = 345,600$	$k_{12} = 340,400,000$	$c_{12} = 293,700$
$m_{13} = 345,600$	$k_{13} = 340,400,000$	$c_{13} = 293,700$
$m_{14} = 345,600$	$k_{14} = 340,400,000$	$c_{14} = 293,700$
$m_{15} = 345,600$	$k_{15} = 340,400,000$	$c_{15} = 293,700$

۲-۴- فرمول بندی ریاضی

“Make everything as simple as possible, but not simpler.” *Albert Einstein*

برای درک بهتر عملکرد جداساز لرزه‌ای فعال در سازه‌ها و مقایسه آن با حالت جداساز لرزه‌ای غیرفعال و بدون جداساز لرزه‌ای، برای هرکدام از حالت‌ها بطور جداگانه فرمول بندی انجام شده است و هرکدام تحت تأثیر زلزله‌های مشخصی قرار گرفته‌اند. به این ترتیب می‌توان به نتایج بهتر و جامع‌تری در این زمینه دست یافت.

در دو حالت بدون جداساز لرزه‌ای و با جداساز لرزه‌ای غیرفعال، فرمول بندی از طریق تعیین ماتریس سختی، جرم و میرایی سازه و معادلات حاکم بر آن انجام شده است. در حالت با جداساز لرزه‌ای فعال، به دلیل وارد شدن نیروی کنترل بر معادلات حاکم، فرمول بندی در قالب فضای حالت مورد بررسی قرار گرفته و برای تعیین نیروی کنترل بهینه در هر لحظه، از روش LQR استفاده شده است.

۲-۴-۱- معادلات ماتریسی

در این بخش معادلات ماتریسی را برای مدل شماره ۱ انجام می‌دهیم که این معادلات به راحتی برای مدل شماره ۲ قابل تعمیم است. مدل ماتریسی سازه بدون در نظر گرفتن جداساز لرزه‌ای، یک مدل پنج درجه آزادی است که معادلات آن بنابر متغیرهایی که در شکل ۲-۴ مشخص شده‌اند، بصورت زیر بیان می‌شوند :

$$K_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + C_1 \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} + M_1 \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \end{bmatrix} = -M_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1-4)$$

در نتیجه خواهیم داشت :

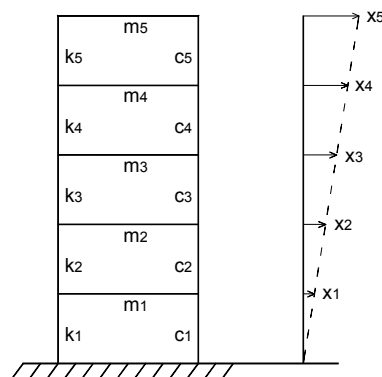
$$\{\ddot{x}\} = -M_1^{-1}K_1\{x\} - M_1^{-1}C_1\{\dot{x}\} - [11111]^T \ddot{x}_g \quad (۲-۴)$$

که در آن M_1 ماتریس جرم، K_1 ماتریس سختی، C_1 ماتریس میرایی و x بردار تغییر مکان

است، و بصورت زیر تعریف می‌شوند :

$$M_1 = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \quad K_1 = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4+k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4+c_5 & -c_5 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix}$$



شکل ۲-۴: مدل شماتیک سازه پنج درجه آزادی بدون جداساز لرزه‌ای و پارامترهای مرتبط با آن

مدل ماتریسی سازه با در نظر گرفتن جداساز لرزه‌ای غیرفعال، یک مدل شش درجه آزادی است

است که معادلات آن بنابر متغیرهایی که در شکل ۳-۴ مشخص شده‌اند، بصورت زیر بیان می‌شوند :

$$K_2 \begin{bmatrix} x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} + M_2 \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \end{bmatrix} = -M_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g - M_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_b \quad (۳-۴)$$

در نتیجه خواهیم داشت :

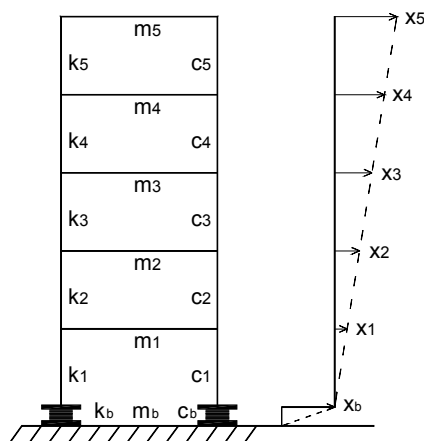
$$\{\ddot{x}\} = -M_2^{-1} K_2 \{x\} - M_2^{-1} C_2 \{\dot{x}\} - [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \ddot{x}_g - [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \ddot{x}_b \quad (۴-۴)$$

که در آن M_2 ماتریس جرم، K_2 ماتریس سختی، C_2 ماتریس میرایی و x بردار تغییر مکان

است، و بصورت زیر تعریف می‌شوند :

$$M_2 = \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \quad K_2 = \begin{bmatrix} k_b & -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4+k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} c_b & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_4 & c_4+c_5 & -c_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} X_b \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix}$$



شکل ۳-۴: مدل شماتیک سازه پنج درجه آزادی با جداساز لرزه‌ای غیرفعال و پارامترهای مرتبط با آن

۲-۲-۴- معادلات فضای حالت

همانطور که ذکر شد در حالت با جداساز لرزه‌ای فعال، فرمول‌بندی در قالب فضای حالت صورت می‌گیرد. معادله حرکت یک سیستم که در معرض زلزله قرار گرفته‌است، در فضای حالت بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{x} = Ax + Bu + E\ddot{x}_g \quad (۵-۴)$$

که در آن x متغیر حالت، u نیروی کنترل، \ddot{x}_g شتاب‌نگاشت زلزله، A بردار حالت، B بردار مکان کنترلگر و E بردار مکان نیروی زلزله است [۱۲]. در طراحی کنترل‌کننده LQR می‌خواهیم کنترل فیدبک حالت $u = -kx$ را به گونه‌ای طراحی کنیم که معیار عملکرد زیر را کمینه سازد:

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (۶-۴)$$

در نهایت معادله سیستم حلقه بسته بصورت زیر خواهد بود:

$$\dot{x} = (A - Bk)x + E\ddot{x}_g \quad (۷-۴)$$

در بخش ۳-۴-۳ این مسئله به تفصیل بیان شده‌است.

مدل ریاضی سازه با در نظر گرفتن جداساز لرزه‌ای فعال، یک مدل شش درجه آزادی است

است که معادلات آن بنابر متغیرهایی که در شکل ۴-۴ مشخص شده‌اند، بصورت زیر بیان می‌شوند :

(۸-۴)

$$K_3 \begin{bmatrix} x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + C_3 \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} + M_3 \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \end{bmatrix} = -M_3 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g - M_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_b - u \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

در نتیجه خواهیم داشت :

(۹-۴)

$$\{\ddot{x}\} = -M_3^{-1}K_3\{x\} - M_3^{-1}C_3\{\dot{x}\} - [111111]^T \ddot{x}_g - [011111]^T \ddot{x}_b - M_3^{-1}F[100000]^T$$

با در نظر گرفتن X به عنوان متغیر حالت داریم :

$$X_1 = \{x\}, X_2 = \{\dot{x}\}, X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow \dot{X} = \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{Bmatrix} = AX + Bu + E\ddot{x}_g \quad (10-4)$$

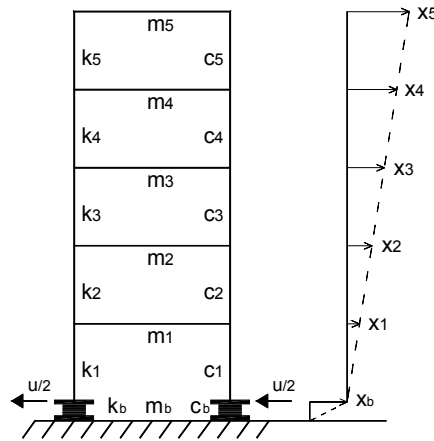
با توجه به روابط بالا و همچنین رابطه (۴-۵) ، ماتریس‌های A ، B و E بدست می‌آیند :

$$A = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{6*6} & \begin{bmatrix} I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}_{6*6} \\ \begin{bmatrix} -H^1 M_2^1 K_2 \\ \vdots \\ -H^1 M_2^1 K_2 \end{bmatrix}_{6*6} & \begin{bmatrix} -H^1 M_2^1 C_2 \\ \vdots \\ -H^1 M_2^1 C_2 \end{bmatrix}_{6*6} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{6*1} \\ \begin{bmatrix} -H^1 M_2^1 Y \\ \vdots \\ -H^1 M_2^1 Y \end{bmatrix}_{6*1} \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{6*1} \\ \begin{bmatrix} -H^1 N \\ \vdots \\ -H^1 N \end{bmatrix}_{6*1} \end{bmatrix}$$

(۱۱-۴)

که در آن :

$$H = (I + Y'Y^T) \quad N = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad Y' = [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad Y = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$



شکل ۴-۴ : مدل شماتیک سازه پنج درجه آزادی با جداساز لرزه‌ای فعال و پارامترهای مرتبط با آن

۴-۳- شبیه‌سازی مدل^۱

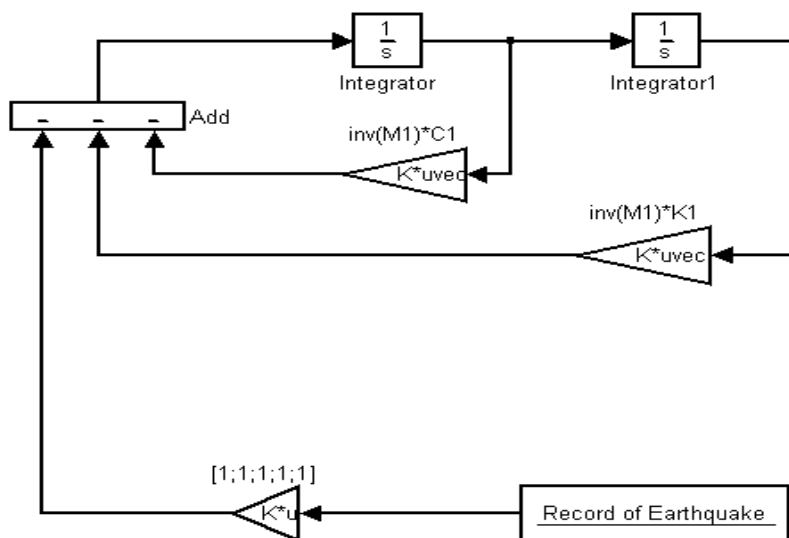
در این مرحله با استفاده از فرمول‌بندی ریاضی که در بخش ۴-۲ در سه حالت مختلف بدست آمد، به شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار MATLAB می‌پردازیم. شبیه‌سازی برای مدل شماره ۱ انجام شده که برای مدل شماره ۲ نیز قابل‌تعمیم است.

۴-۳-۱- حالت بدون جداساز لرزه‌ای : Fixed Structure

در این حالت با استفاده از معادلات ماتریسی بدست آمده در بخش ۴-۲-۱ مربوط به حالت

^۱-Simulink

بدون جداساز، شبیه‌سازی انجام شده‌است. شکل ۴-۵ شبیه‌سازی معادله حاکم بر سازه را مربوط به مدل شماره ۱ و در حالت بدون جداساز لرزه‌ای نشان می‌دهد. برای مدل شماره ۲ نیز به همین طریق و با استفاده از ماتریس‌های مربوطه شبیه‌سازی انجام می‌پذیرد.

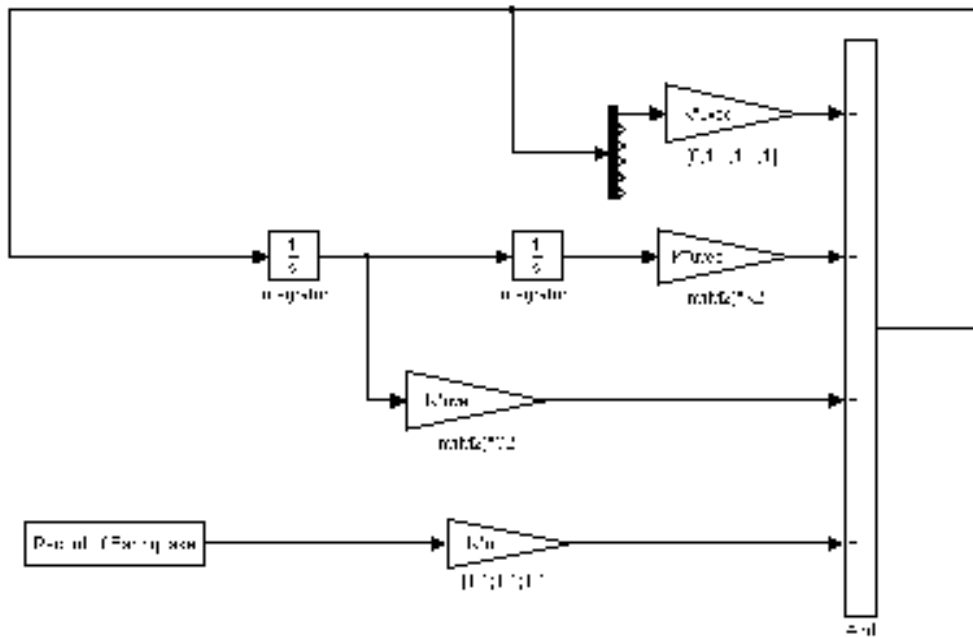


شکل ۴-۵: شبیه‌سازی مدل شماره ۱ مربوط به حالت بدون جداساز لرزه‌ای

بعد از انجام عملیات شبیه‌سازی، رکورد زلزله موردنظر به سازه اعمال می‌شود و نتایج موردبررسی قرار می‌گیرد.

۴-۳-۲- حالت با جداساز لرزه‌ای غیرفعال : Passive BI

در این حالت با استفاده از معادلات ماتریسی بدست آمده در بخش ۴-۲-۱ مربوط به حالت با جداساز لرزه‌ای غیرفعال، شبیه‌سازی انجام شده‌است. شکل ۴-۶ شبیه‌سازی معادله حاکم بر سازه را مربوط به مدل شماره ۱ و در حالت با جداساز لرزه‌ای غیرفعال نشان می‌دهد. برای مدل شماره ۲ نیز به همین طریق و با استفاده از ماتریس‌های مربوطه شبیه‌سازی انجام می‌پذیرد.

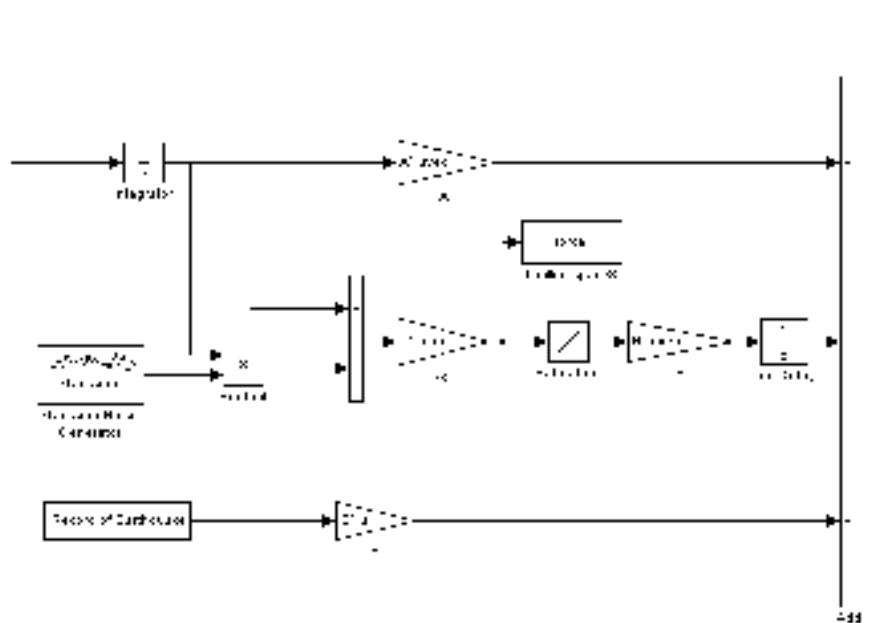


شکل ۴-۶: شبیه‌سازی مدل شماره ۱ مربوط به حالت با جداساز لرزه‌ای غیرفعال

بعد از انجام عملیات شبیه‌سازی، رکورد زلزله موردنظر به سازه اعمال می‌شود و نتایج موردبررسی قرار می‌گیرد.

۴-۳-۳- حالت با جداساز لرزه‌ای فعال : Active BI

در این حالت با استفاده از معادلات فضای حالت بدست آمده در بخش ۲.۲.۴ مربوط به حالت با جداساز لرزه‌ای فعال، شبیه‌سازی انجام شده‌است. شکل ۴-۷ شبیه‌سازی معادله حاکم بر سازه را مربوط به مدل شماره ۱ و در حالت با جداساز لرزه‌ای فعال نشان می‌دهد. برای مدل شماره ۲ نیز به همین طریق و با استفاده از ماتریس‌های مربوطه شبیه‌سازی انجام می‌پذیرد.



شکل ۴-۷: شبیه‌سازی مدل شماره ۱ مربوط به حالت با جداساز لرزه‌ای فعال

بلوک Gaussian Noise Generator برای معرفی نویز سفید در سیستم استفاده شده است. این نویز ناشی از خطای احتمالی حسگرهایی است که جهت دریافت و ارسال اطلاعات مربوط به بازخورد سازه، به کار رفته‌اند. این بلوک اعداد تصادفی توزیع شده بصورت نرمال را تولید کرده و به مدل اعمال می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود، نویز در مسیر متغیرهای حالت که به عنوان خروجی سیستم می‌باشد، قرار گرفته است. بدین معنا که حسگرهایی که متغیرهای حالت یعنی تغییر مکان و سرعت را اندازه‌گیری می‌کنند، در محاسبه مقدار تغییر مکان و سرعت سازه دارای خطاهای احتمالی هستند که به واسطه این خطا، اطلاعاتی که به سیستم کنترل وارد می‌شود و نیروی کنترل (u) بر حسب آن اندازه‌گیری می‌شود ($u=-kx$) نیز خطا خواهد داشت.

بلوک Saturation برای محدود کردن نیروی کنترل در سیستم به کار برده شده است. توضیح اینکه عملگرهایی که در سیستم‌های کنترل فعال برای اعمال نیرو استفاده می‌شوند، بنابر موارد

استفاده و نیروی کنترل تقاضا، دارای محدودیت‌هایی در تولید نیرو می‌باشند و قادر نیستند در تمام محدوده‌های نیروی کنترل تقاضا بصورت بهینه عمل کنند. از این رو در روند شبیه‌سازی مدل نیز می‌بایستی نیروی کنترل را محدود کرد تا پاسخ‌ها به حالت واقعی نزدیکتر شود. در این بلوک می‌توان کران‌های بالا و پایین نیرو را تعیین کرد؛ وقتی سیگنال ورودی در محدوده تعیین شده قرار داشته باشد، بدون تغییر عبور خواهد کرد. در حالتی که سیگنال ورودی خارج از محدوده کران‌ها قرار گیرد، آنگاه به کران بالا و پایین محدود می‌گردد. در این تحقیق نیروی کنترل تا حدود ۸۰ درصد نیروی بیشینه کنترل محدود شده است.

بلوک Unit Delay برای ایجاد تأخیر زمانی در سیستم کنترل به کار رفته است. این تأخیر زمانی ناشی از زمان صرف شده برای ارسال اطلاعات از حسگرها به پردازشگر و از پردازشگر به عملگرها و همچنین واکنش عملگر پس از دریافت اطلاعات است که از مشخصات تجهیزات به کاررفته می‌باشد. این بلوک سیگنال ورودی را به اندازه یک گام نمونه‌گیری به تأخیر انداخته و در همین حالت حفظ می‌نماید. در صورتی که ورودی بلوک از نوع بردار باشد تمامی درایه‌های بردار به یک اندازه دچار تأخیر می‌شود.

بعد از انجام عملیات شبیه‌سازی، رکورد زلزله موردنظر به سازه اعمال می‌شود و نتایج موردبررسی قرار می‌گیرد.

۴-۴- مطالعه پارامتریک ماتریس‌های وزنی Q و R

همانطور که در بخش ۳-۴-۳ ذکر شد، در روش کنترل فیدبک حالت بهینه، معیار عملکرد یا مشخصه‌ای را به صورت زیر تعریف می‌کنیم :

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (12-4)$$

که در آن Q و R ماتریس‌های متقارن بوده و $Q \geq 0, R > 0$ می‌باشند. همچنین ذکر شد که معیارهای عملکردی سیستم حلقه-بسته همانند پایداری داخلی، تنظیم یا تعقیب، حذف اغتشاش، حذف نویز و عدم حساسیت به مدل، غالباً پیچیده‌تر از آن است که در یک تابع J فشرده شود [۱۰].
 Q و R ماتریسهای وزنی هستند و مقادیر آنها بستگی به اهمیت نسبی عبارات مختلف در سهم آنها از شاخص عملکرد J دارد. مقادیر بزرگ ماتریس Q نشان دهنده خواسته ما برای نزدیک بودن بردار حالت به مبدأ در طول زمان دارد که حالت غیر اقتصادی است، در حالیکه مقادیر بزرگ ماتریس R بر تأثیر کم کنترل دلالت دارد [۱۶].

در الگوریتم کنترل LQR نیروی کنترل بهینه ($u_{optimal}$) بصورت نیروی تقاضا در نظر گرفته می‌شود و عملگر با توجه به قیود، طوری کنترل می‌گردد که تا حد ممکن نزدیک به نیروی تقاضا باشد و پارامترهای بهره کنترل بر اساس شبیه سازی عددی با توجه به ظرفیت عملگر تعیین می‌شود [۱۷].
 در حالت کلی Q بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = \begin{bmatrix} [Q_{sd}]_{(n-1) \times (n-1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{bd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [Q_{sv}]_{(n-1) \times (n-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{bv} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (13-4)$$

که در آن $[Q_{sd}]$ و Q_{bd} به ترتیب فاکتورهای وزنی وابسته به انرژی پتانسیل طبقات و جداساز هستند و $[Q_{sv}]$ و Q_{bv} به ترتیب بر انرژی جنبشی طبقات و جداساز دلالت می‌کنند؛ n نیز تعداد درجات آزادی است. واحد $[Q_{sd}]$ و Q_{bd} که منطبق بر تغییر مکان هستند، (N/m) است که مشابه واحد سختی است؛ واحد $[Q_{sv}]$ و Q_{bv} که منطبق بر سرعت هستند، (kg) است که مشابه واحد جرم

است. در حقیقت شاخص عملکرد J حاصل مجموع انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی است و واحد آن $(N.m)$ می‌باشد. در نتیجه واحد R نیز که منطبق بر نیروی کنترل است، برابر (m/N) بدست می‌آید [۱۸].

نیروی کنترل فعال و به طبع آن پاسخ لرزه‌ای سازه به ماتریس بهره حاصل معادله ریکاتی (k) وابسته است. انتخاب مناسب Q و R ، عملکرد کنترل را تحت محدودیت‌های سازه و تجهیزات و رسیدن به کنترل بهینه، تعیین خواهد کرد. مطالعه پارامتریک Q و R ما را به این هدف خواهد رساند. همانطور که قبلاً ذکر شد در اثر جداسازی لرزه‌ای غیرفعال، شتاب سازه و تغییرمکان نسبی طبقات کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند و مشکلی که با آن مواجه خواهیم بود، تغییر مکان‌های بزرگ پایه است؛ بطور کلی سختی جداساز بسیار کوچکتر از سختی طبقات است و به همین دلیل تغییرمکان‌های بزرگ پایه بوجود می‌آید که باعث می‌شود تغییرمکان مطلق طبقات نیز افزایش یابد. بنابراین کنترل تغییرمکان جداساز برای مقابله با تغییرمکان‌های بزرگ پایه و به طبع آن تغییرمکان طبقات، مناسبترین روش به نظر می‌رسد. از این رو Q_{bd} را که منطبق بر تغییرمکان جداساز است، مورد بررسی قرار می‌دهیم و سایر عناصر ماتریس Q را برابر واحد در نظر می‌گیریم تا سطوح مختلف عملکرد کنترل مشخص گردد. به دلیل پیچیدگی ماهیت شاخص عملکرد ناشی از روابط متقابل عناصر آن و عدم وجود یک راه حل صریح ریاضی برای بدست آوردن ماتریس‌های وزنی Q و R ، در این مرحله Q را ثابت فرض کرده و R را به عنوان متغیر در نظر می‌گیریم. به این ترتیب با ترسیم نمودارهای مربوطه و بررسی آنها، به یک ترکیب مناسب از Q و R خواهیم رسید.

با توجه به اینکه هدف ما مطابق توضیحات ذکر شده کنترل تغییرمکان پایه است، $[Q_{sd}]$ ، $[Q_{sv}]$ و Q_{bv} را برابر واحد در نظر می‌گیریم و Q_{bd} را با توجه به بررسی‌های انجام شده برابر 10^6 قرار می‌دهیم. با این شرایط ماتریس وزنی R را با سه مقدار زیر در معادله قرار داده و رفتار سازه را تحت

دو زلزلهٔ السنترو^۱ به عنوان زلزلهٔ حوزه دور و کوبه^۲ به عنوان زلزلهٔ حوزه نزدیک بررسی می‌کنیم و سپس نتایج را برای زلزله‌های هاجینوهه^۳ و نورث‌ریج^۴ نیز استفاده می‌کنیم.

مدل شماره ۱ :

$$\text{LQR I : } R_1=10^{-7} \quad ; \quad \text{LQR II : } R_2=10^{-8} \quad ; \quad \text{LQR III : } R_3=10^{-9}$$

مدل شماره ۲ :

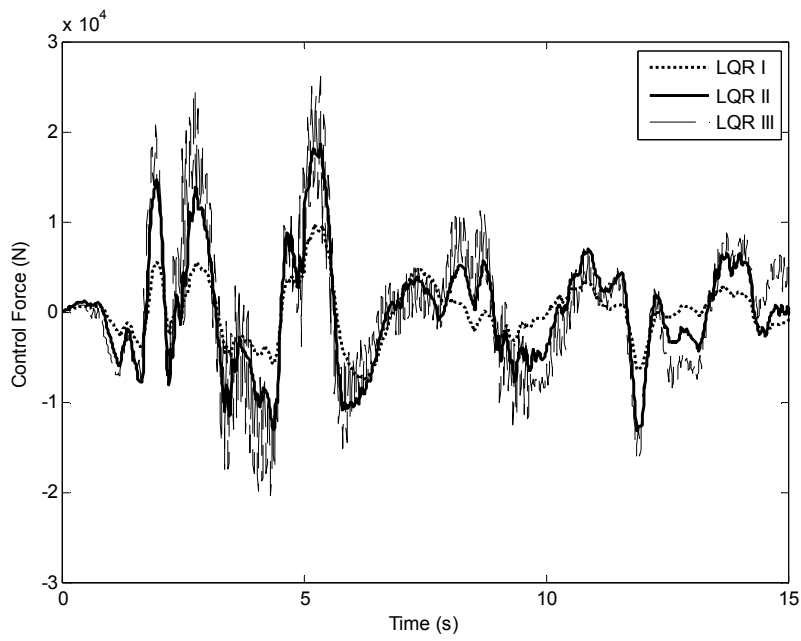
تحت زلزلهٔ السنترو

$$\text{LQR I : } R_1=10^{-8} \quad ; \quad \text{LQR II : } R_2=10^{-9} \quad ; \quad \text{LQR III : } R_3=10^{-10} \quad ; \quad \text{LQR IV : } R_4=10^{-11}$$

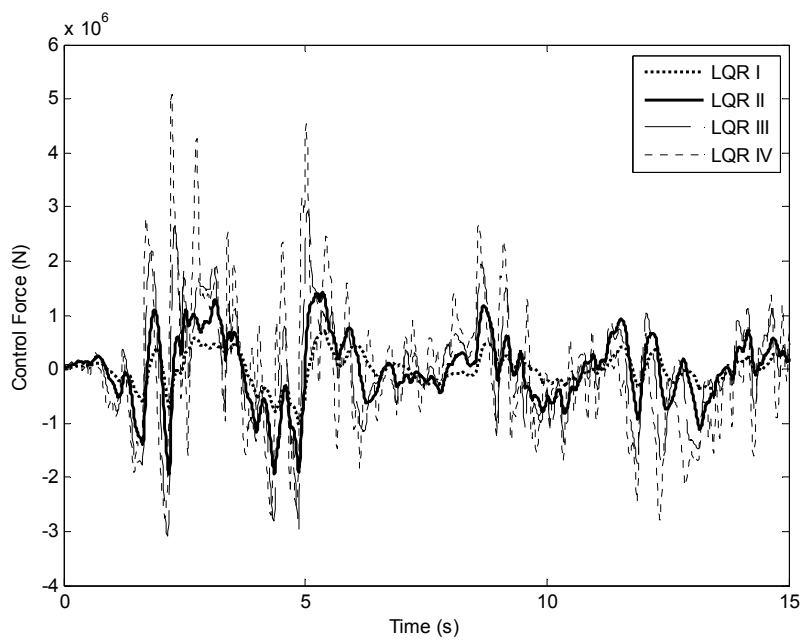
تحت زلزلهٔ کوبه

$$\text{LQR 0 : } R_0=10^{-7} \quad ; \quad \text{LQR I : } R_1=10^{-8} \quad ; \quad \text{LQR II : } R_2=10^{-9} \quad ; \quad \text{LQR III : } R_3=10^{-10}$$

-
- 1-El Centro
 - 2-Kobe
 - 3-Hachinohe
 - 4-Northridge

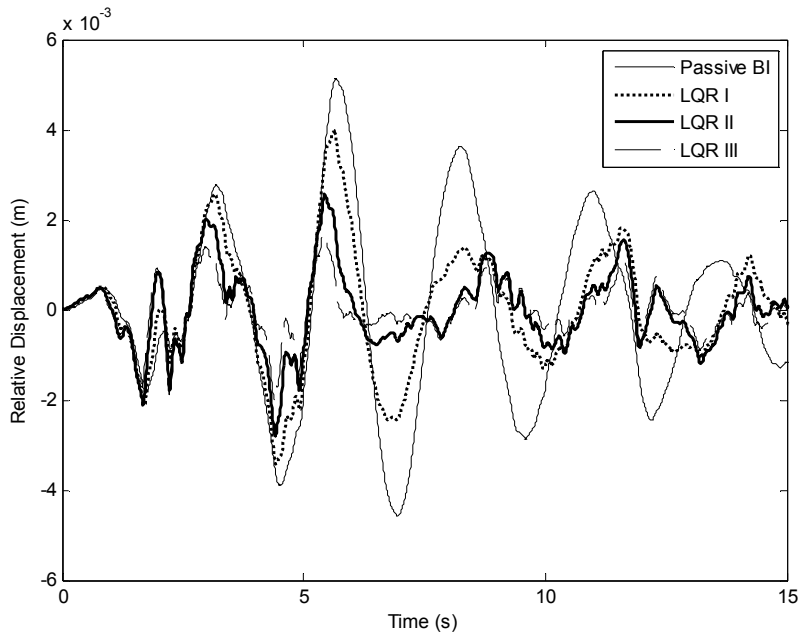


(الف)

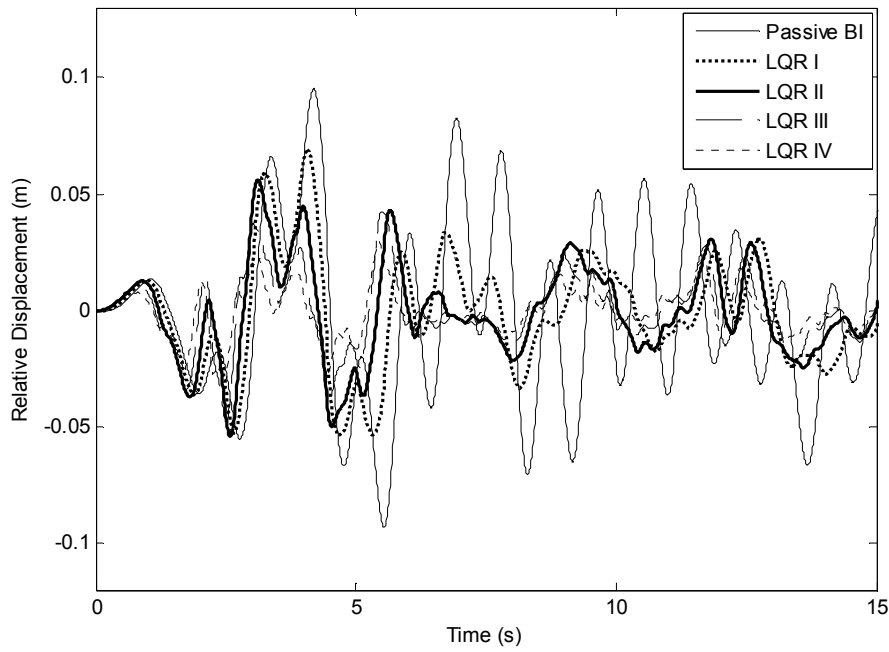


(ب)

شکل ۴-۸: نیروی کنترل تقاضا تحت زلزلهٔ سینترو برای الف) مدل شماره ۱، ب) مدل شماره ۲

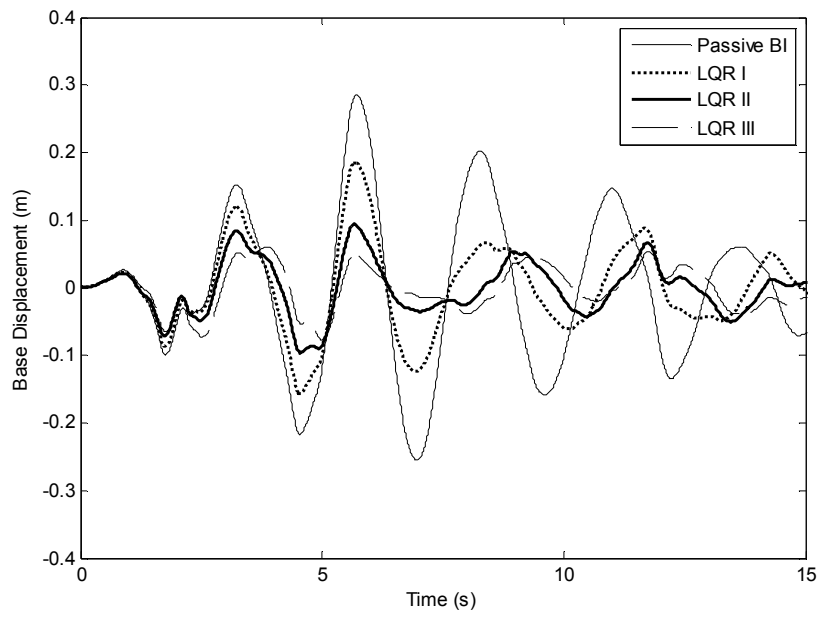


(الف)

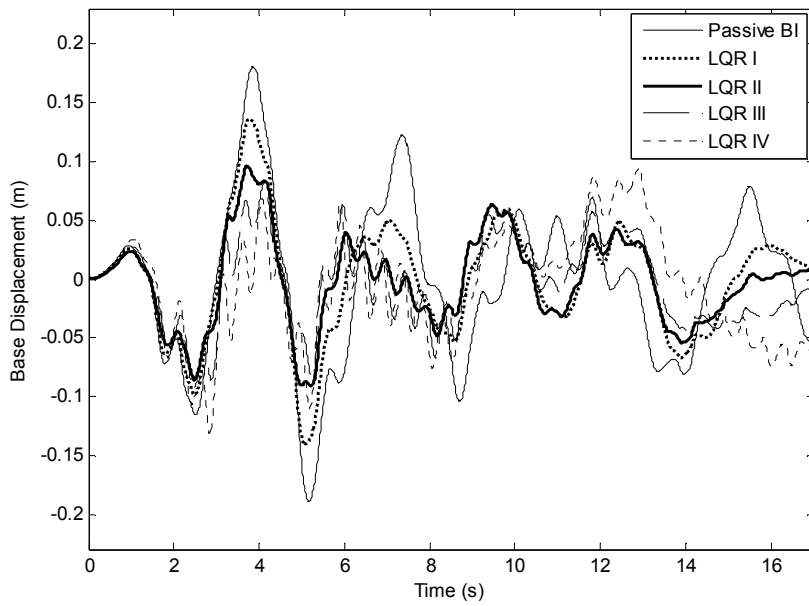


(ب)

شکل ۴-۹: تغییر مکان بام نسبت به پایه تحت زلزلهٔ سنترو برای الف) مدل شماره ۱، ب) مدل شماره ۲

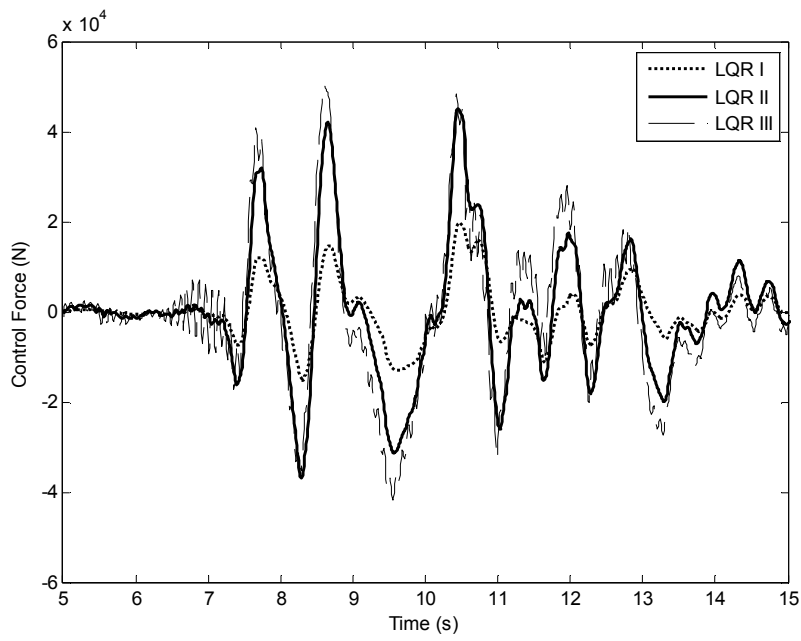


(الف)

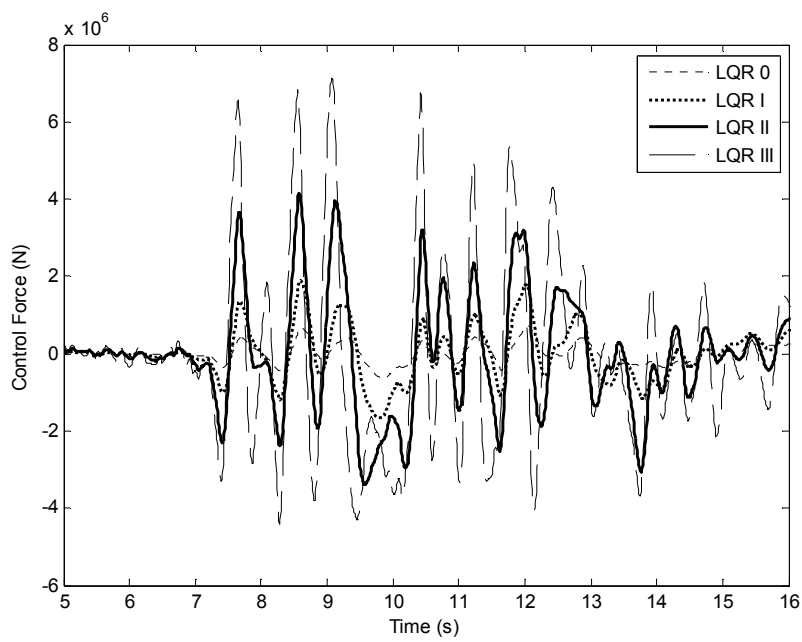


(ب)

شکل ۴-۱۰: تغییر مکان پایه تحت زلزله سنترو برای الف) مدل شماره ۱، ب) مدل شماره ۲

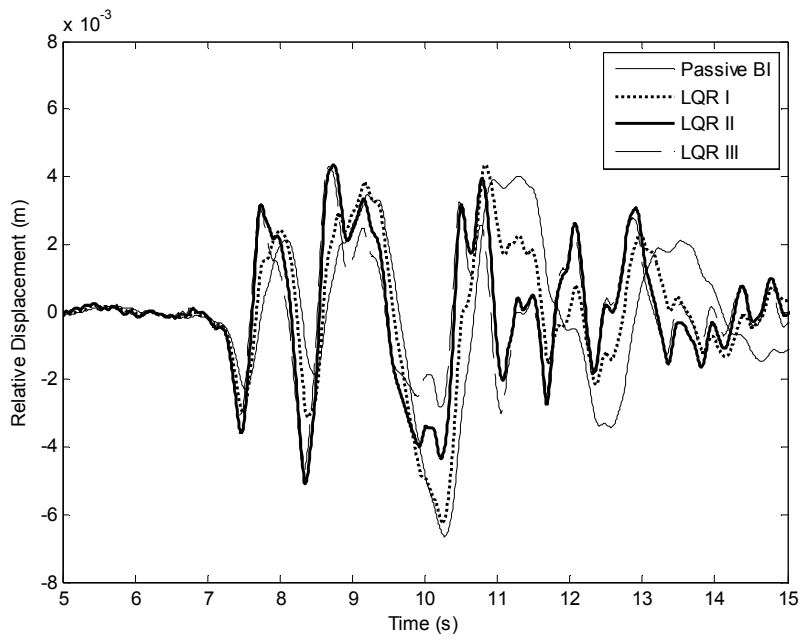


(الف)

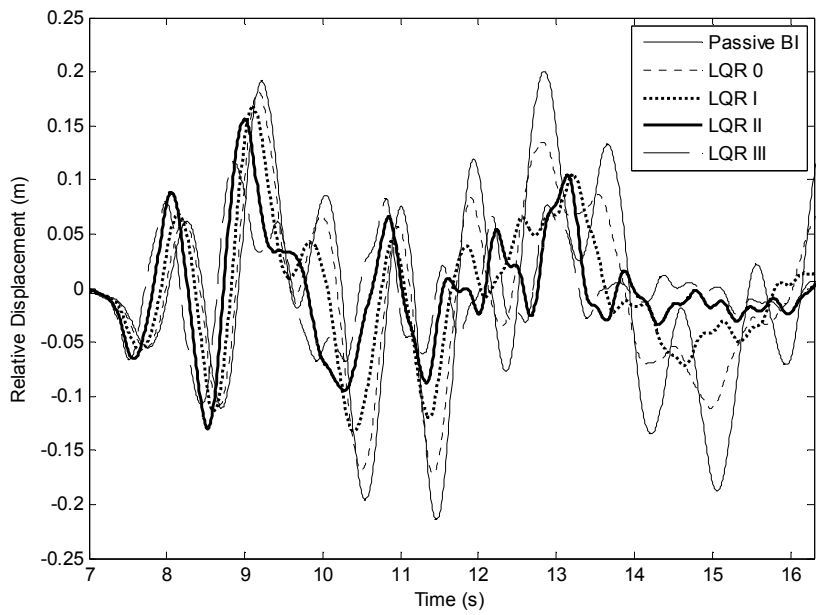


(ب)

شکل ۴-۱۱: نیروی کنترل تقاضا تحت زلزله کوبه برای الف) مدل شماره ۱ ، ب) مدل شماره ۲

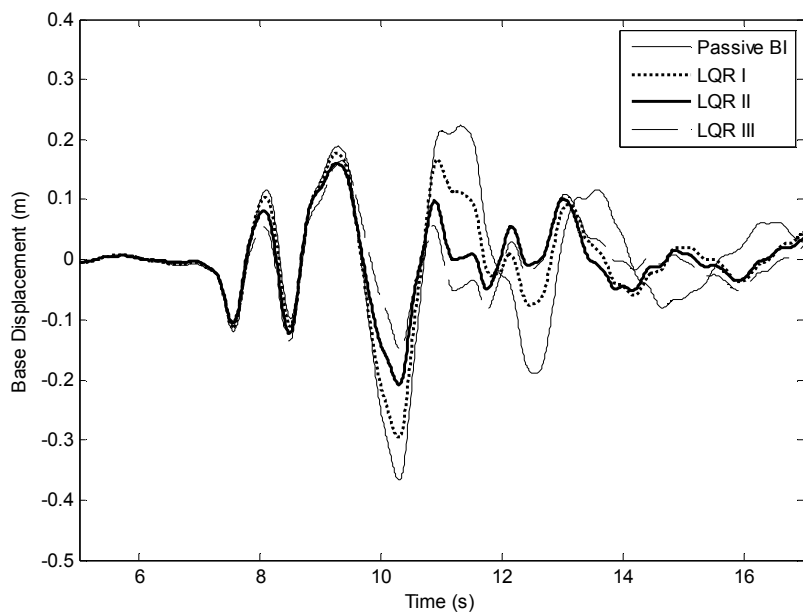


(الف)

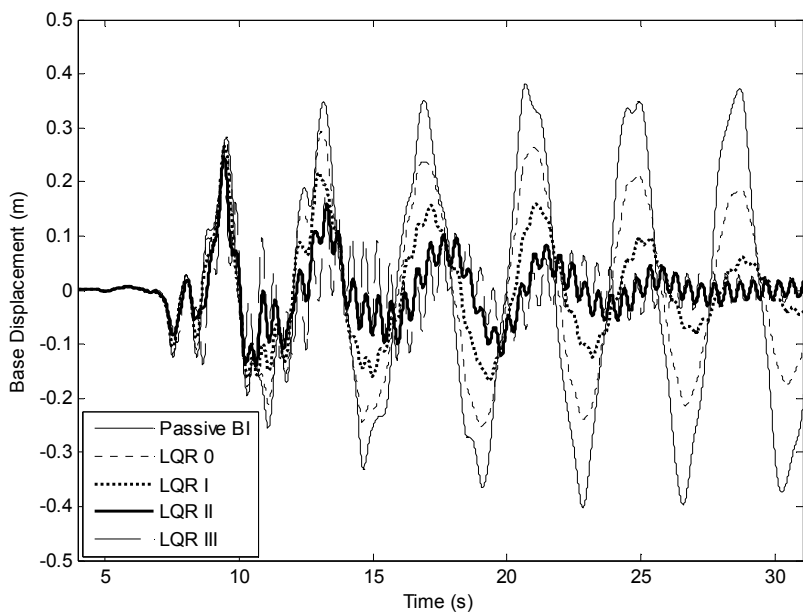


(ب)

شکل ۴-۱۲: تغییر مکان بام نسبت به پایه تحت زلزله کوبه برای الف) مدل شماره ۱، ب) مدل شماره ۲



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۳: تغییر مکان پایه تحت زلزله کوبه برای الف) مدل شماره ۱، ب) مدل شماره ۲

جدول ۳-۴: مقدار نیروی کنترل بیشینه تقاضا برای مدل شماره ۱

نیروی کنترل بیشینه (N)	LQR I	LQR II	LQR III
السترو	9.58 e+03	1.85 e+04	2.62 e+04
کوبه	1.98 e+04	4.52 e+04	5.02 e+04

جدول ۴-۴: مقدار تغییر مکان بیشینه بام نسبت به پایه برای مدل شماره ۱

تغییر مکان بیشینه بام نسبت به پایه (m)	Passive BI	LQR I	LQR II	LQR III
السترو	5.1 e-03	4.0 e-03	2.8 e-03	2.0 e-03
کوبه	6.6 e-03	6.2 e-03	5.1 e-03	4.8 e-03

جدول ۵-۴: مقدار تغییر مکان بیشینه پایه برای مدل شماره ۱

تغییر مکان بیشینه پایه (m)	Passive BI	LQR I	LQR II	LQR III
السترو	2.85 e-01	1.86 e-01	9.65 e-02	7.78 e-02
کوبه	3.66 e-01	2.96 e-01	2.08 e-01	1.65 e-01

جدول ۴-۶: مقدار نیروی کنترل بیشینه تقاضا برای مدل شماره ۲

نیروی کنترل بیشینه (N)	LQR 0	LQR I	LQR II	LQR III	LQR IV
السترو	-----	1.03 e+06	1.93 e+06	3.09 e+06	5.09e+06
کوبه	7.21 e+05	1.91 e+06	4.14 e+06	7.13 e+06	-----

جدول ۴-۷: مقدار تغییرمکان بیشینه بام نسبت به پایه برای مدل شماره ۲

تغییرمکان بیشینه بام نسبت به پایه (m)	Passive BI	LQR 0	LQR I	LQR II	LQR III	LQR IV
السترو	9.52 e-02	-----	6.94 e-02	5.6 e-02	4.82 e-02	3.15 e-02
کوبه	2.14 e-01	1.81 e-01	1.68 e-01	1.56 e-01	1.17 e-01	-----

جدول ۴-۸: مقدار تغییرمکان بیشینه پایه برای مدل شماره ۲

تغییرمکان بیشینه پایه (m)	Passive BI	LQR 0	LQR I	LQR II	LQR III	LQR IV
السترو	1.89 e-01	-----	1.41 e-01	9.64 e-02	9.44 e-02	1.32 e-01
کوبه	4.02 e-01	2.93 e-01	2.66 e-01	2.48 e-01	2.68 e-01	-----

برای درک بهتر موضوع و امکان انجام مقایسه میان حالت‌های مختلف کنترل و در نهایت

انتخاب بهترین حالت، پارامترهای زیر را معرفی می‌کنیم [۱۵] :

$$J_u = \max |u(t)| / W_t \quad (14-4)$$

$$J_r = \max |x_r(t)| / \max |\hat{x}_r(t)| \quad (15-4)$$

$$J_b = \max |x_b(t)| / \max |\hat{x}_b(t)| \quad (16-4)$$

که در آن J_u ، J_r و J_b به ترتیب نیروی کنترل نرمالیزه، تغییرمکان نسبی نرمالیزه و تغییرمکان پایه نرمالیزه هستند. x_b و x_r به ترتیب تغییرمکان نسبی و تغییرمکان پایه تحت سیستم کنترل فعال و \hat{x}_b و \hat{x}_r تغییرمکان نسبی و تغییرمکان پایه تحت سیستم غیرفعال می‌باشند. W_t نیز وزن کل روسازه می‌باشد.

با توجه به مقادیر ارائه شده در جداول ۳-۴ الی ۸-۴، مقادیر نرمالیزه بدست می‌آید. این مقادیر در جدول ۴-۹ به تفکیک مدل‌های مختلف و تحت اثر زلزله‌های مختلف بیان شده‌است. مسئله دیگری که برای انتخاب حالت کنترل بهینه مطرح است، درصد اهمیت هر یک از پارامترهای نرمالیزه شده است. به عبارت دیگر با تعیین ضریب اهمیت برای هر کدام از پارامترهای نرمالیزه شده با توجه به خواسته ما از سیستم کنترل، حالت کنترل بهینه را بدست می‌آوریم. در اینجا با توجه به خواسته ما برای کاهش تغییرمکان پایه در سیستم جداساز لرزه‌ای و در مرحله بعد کاهش تغییرمکان نسبی طبقات، ضرایب اهمیت را به صورت زیر در نظر می‌گیریم :

$$F(J_b) = 3 \quad ; \quad F(J_r) = 2 \quad ; \quad F(J_u) = 1$$

حال شاخص S را به صورت زیر تعریف می‌کنیم :

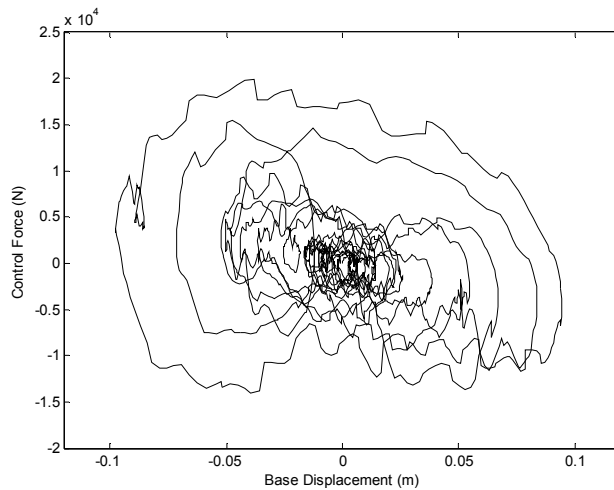
$$S_n = \frac{(3 \times (J_b)_n)}{(J_b)_1} + \frac{(2 \times (J_r)_n)}{(J_r)_1} + \frac{(1 \times (J_u)_n)}{(J_u)_1} \quad (17-4)$$

که با توجه به خواست ما برای کوچکتر بودن مقادیر نرمالیزه، هر حالتی که مقدار شاخص کوچکتری داشته باشد، مطلوب ما خواهد بود. حالات مطلوب هریک از مدل‌ها در جدول ۹-۴ به صورت مارک‌شده مشخص گردیده‌است.

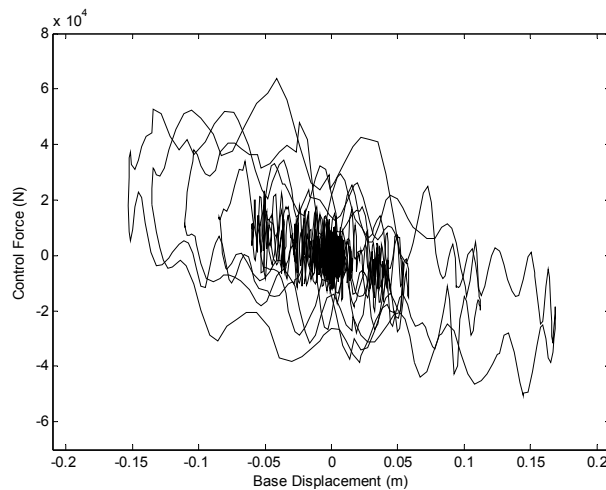
جدول ۹-۴ : مقادیر نرمالیزه شده به تفکیک انواع مدل و زلزله

حالات کنترل مقادیر نرمالیزه	LQR 0	S ₀	LQR I	S _I	LQR II	S _{II}	LQR III	S _{III}	LQR IV	S _{IV}
<u>مدل شماره ۱ - زلزله السطری</u>										
نیروی کنترل نرمالیزه \bar{P}_I	-----	---	0.027	6	0.052	4.9	0.074	5	-----	---
تغییر مکان نسبی نرمالیزه \bar{P}_I	-----		0.784		0.549		0.392		-----	
تغییر مکان پایه نرمالیزه \bar{P}_I	-----		0.653		0.339		0.273		-----	
<u>مدل شماره ۱ - زلزله کوبه</u>										
نیروی کنترل نرمالیزه \bar{P}_I	-----	---	0.056	6	0.127	6	0.141	5.7	-----	---
تغییر مکان نسبی نرمالیزه \bar{P}_I	-----		0.939		0.773		0.727		-----	
تغییر مکان پایه نرمالیزه \bar{P}_I	-----		0.809		0.568		0.451		-----	
<u>مدل شماره ۲ - زلزله السطری</u>										
نیروی کنترل نرمالیزه \bar{P}_I	-----	---	0.020	6	0.037	5.5	0.060	6.4	0.098	8.6
تغییر مکان نسبی نرمالیزه \bar{P}_I	-----		0.729		0.588		0.506		0.331	
تغییر مکان پایه نرمالیزه \bar{P}_I	-----		0.746		0.510		0.499		0.698	
<u>مدل شماره ۲ - زلزله کوبه</u>										
نیروی کنترل نرمالیزه \bar{P}_I	0.014	6	0.037	7.2	0.080	10	0.137	13.8	-----	---
تغییر مکان نسبی نرمالیزه \bar{P}_I	0.846		0.785		0.729		0.547		-----	
تغییر مکان پایه نرمالیزه \bar{P}_I	0.729		0.662		0.617		0.667		-----	

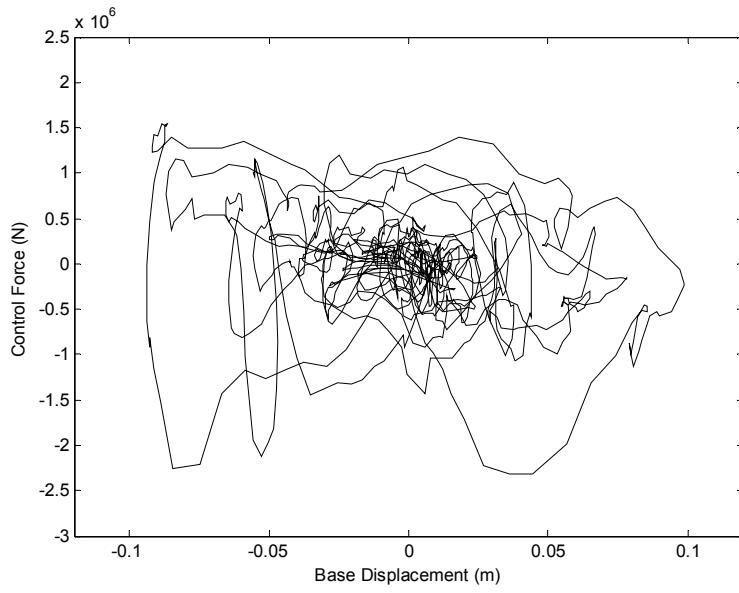
با بدست آمدن Q و R بهینه و به کار بردن این نتایج در مدل شبیه‌سازی شده شماره ۱ و ۲، می‌توان پاسخ‌های بهینه این دو مدل را تحت‌اثر زلزله‌های مختلف و شرایط سازه‌ای متفاوت بررسی کرد و تأثیرات جداسازی لرزه‌ای فعال در سازه‌ها را تشریح نمود.



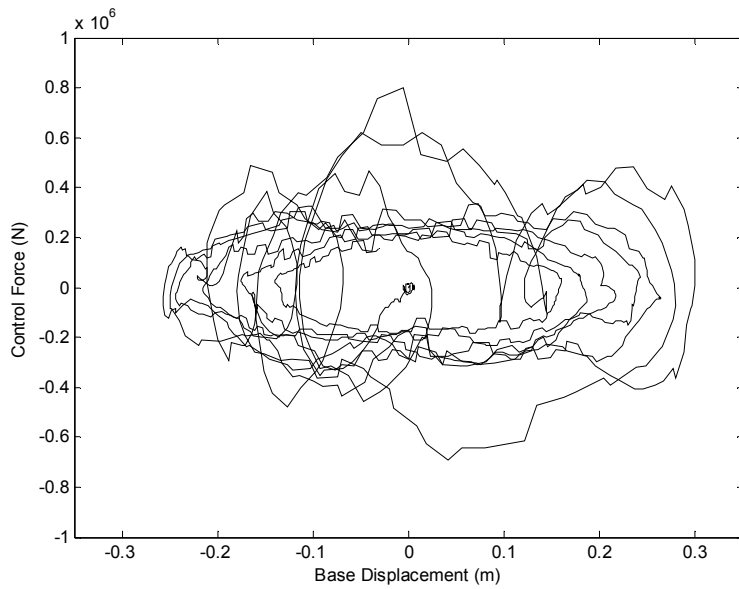
شکل ۴-۱۴: نمودار هیستریزیس نیروی کنترل-جابجایی پایه مدل شماره ۱ در زلزله El Centro



شکل ۴-۱۵: نمودار هیستریزیس نیروی کنترل-جابجایی پایه مدل شماره ۱ در زلزله Kobe



شکل ۴-۱۶: نمودار هیستریزیس نیروی کنترل-جابجایی پایه مدل شماره ۲ در زلزله El Centro



شکل ۴-۱۷: نمودار هیستریزیس نیروی کنترل-جابجایی پایه مدل شماره ۲ در زلزله Kobe

۴-۵- بررسی نتایج تحلیل

پس از انجام عملیات فرمول‌بندی ریاضی، تعیین ماتریس بهره k و شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار MATLAB، به تحلیل مدل‌ها و بررسی نتایج حاصله می‌پردازیم. برای درک بهتر نتایج و رسیدن به یک نتیجه‌گیری دقیق‌تر و منسجم‌تر، تحلیل و بررسی نتایج را در دو حالت زیر دنبال می‌کنیم:

۱- همانطور که قبلاً ذکر شد با توجه به استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در

ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه [۱۳]، ابتدا تحلیل مدل و بررسی نتایج را بر روی مدل شماره ۱

انجام می‌دهیم. معیارهای ارزیابی در این تحلیل بصورت زیر خواهد بود:

الف) تغییر مکان پایه: به دلیل اینکه یکی از مهمترین مشکلات سیستم‌های جداساز لرزه‌ای غیرفعال، تغییر مکان زیاد پایه است و مهمترین هدف استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای فعال، پایین آوردن آن است، این پارامتر می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های جداساز لرزه‌ای فعال باشد.

ب) تغییر مکان نسبی بام: از آنجاکه خسارت‌های وارده به اجزاء سازه‌ای در ساختمان‌ها ناشی از تغییر مکان‌های نسبی بالا در آنهاست، لذا این پارامتر می‌تواند در تعیین و برآورد خسارت‌های احتمالی وارده به سازه، به‌عنوان معیار ارزیابی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق تغییر مکان نسبی بام، بصورت تغییر مکان بام نسبت به جداساز لرزه‌ای پایه به نمایندگی از تغییر مکان‌های طبقات، معرفی شده‌است که در حالت بدون جداساز لرزه‌ای، در واقع همان تغییر مکان بام نسبت به پایه سازه است.

پ) شتاب وارده به سازه: حفاظت از اجزاء غیر سازه‌ای در ساختمان‌ها بخصوص در موارد خاص مانند بیمارستان‌ها، آزمایشگاه‌ها، موزه‌ها و امثال آن، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ لذا با توجه به اینکه خسارت‌های وارده به این اجزاء رابطه مستقیم با شتاب وارده به آنها دارد، شتاب طبقات را نیز می‌توان به‌عنوان یک معیار ارزیابی در نظر گرفت.

۲- برای بررسی عملکرد جداسازهای لرزه‌ای پایه در ساختمان‌های با ارتفاع متوسط و نسبتاً

بلند، مدل شماره ۱ و ۲ با هم مقایسه می‌شوند.

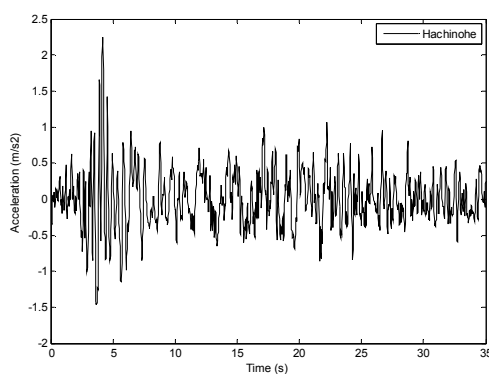
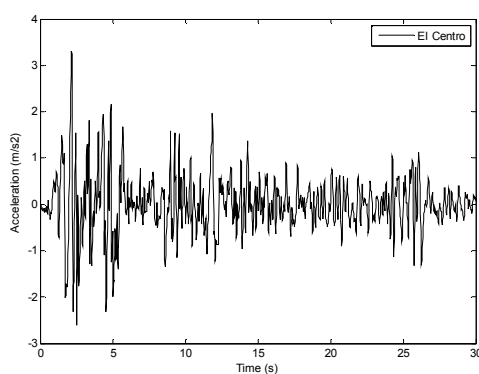
هدف این تحقیق بررسی عملکرد سیستم جداساز لرزه‌ای فعال در دو نوع زلزله حوزه‌دور و

حوزه‌نزدیک است. مشخصه اصلی زلزله‌های حوزه‌نزدیک، پالسهای بزرگ موجود در آن همراه با یک

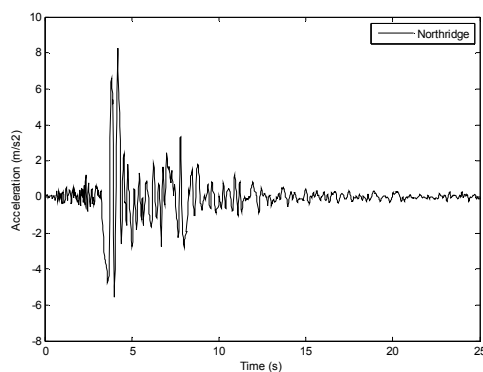
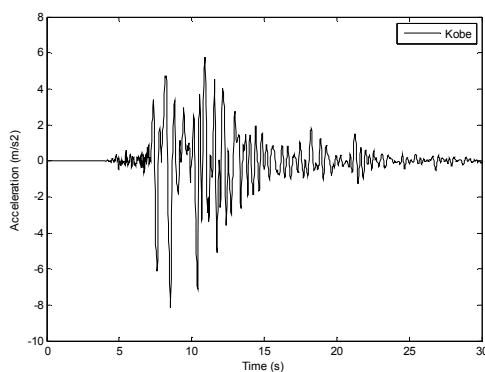
یا دو تغییر ناگهانی در شتاب است. جهت بررسی بیشتر و کسب نتایج دقیق‌تر، از شتاب‌نگاشت دو

زلزله El Centro و Hachinohe به‌عنوان زلزله‌های حوزه‌دور و دو زلزله Kobe و Northridge

به‌عنوان زلزله‌های حوزه‌نزدیک، استفاده شده‌است.



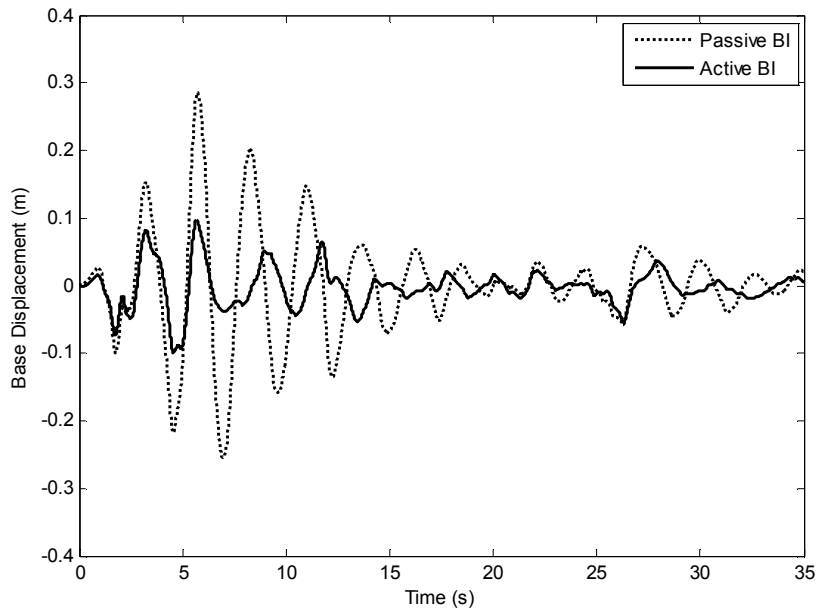
شکل ۴-۱۸: شتاب‌نگاشت زلزله El Centro و Hachinohe



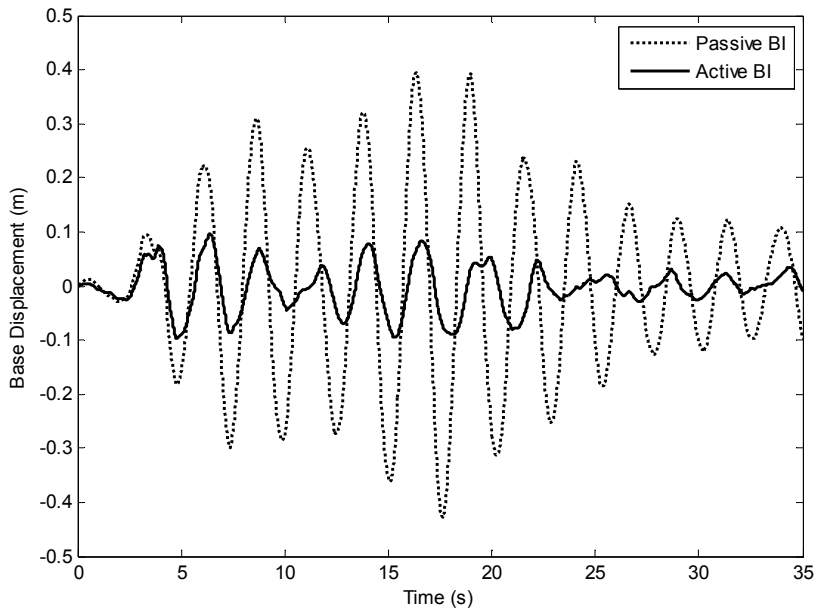
شکل ۴-۱۹: شتاب‌نگاشت زلزله Kobe و Northridge

۴-۵-۱- تحلیل و بررسی نتایج بر روی مدل شماره ۱

الف) بررسی تغییر مکان پایه :

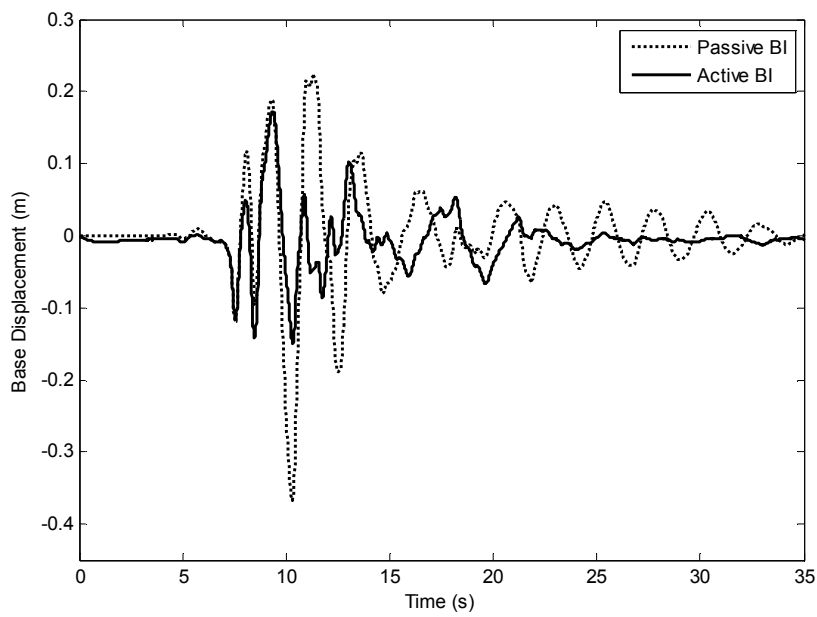


(الف)

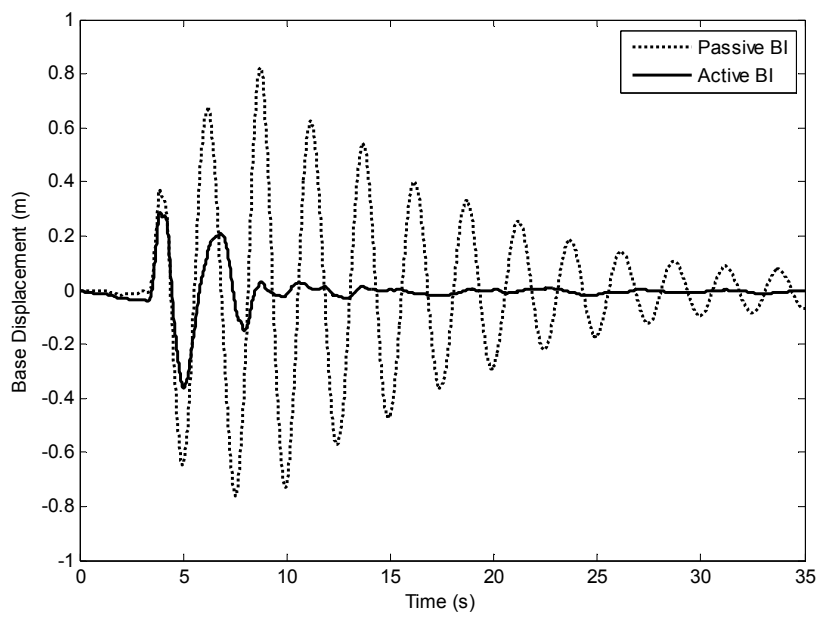


(ب)

شکل ۴-۲۰: تغییر مکان پایه در مدل شماره ۱ تحت اثر الف) زلزله El Centro ، ب) زلزله Hachinohe



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۱: تغییر مکان پایه در مدل شماره ۱ تحت اثر زلزله Kobe ، (ب) زلزله Northridge

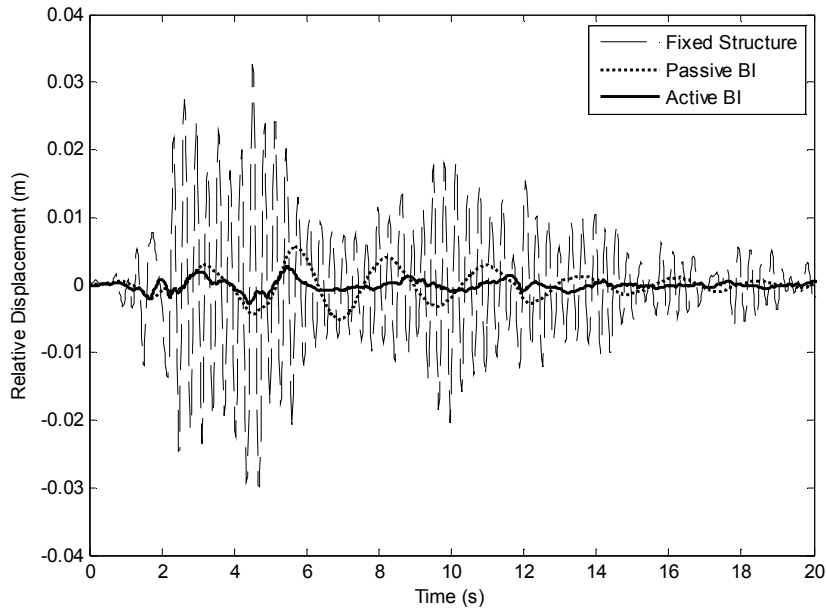
جدول ۴-۱۰: بررسی تغییرمکان بیشینیه پایه در مدل شماره ۱

تغییرمکان بیشینیه پایه (m)	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
مدل شماره ۱ با جداساز لرزه‌ای غیرفعال	0.285	0.43	0.37	0.82
مدل شماره ۱ با جداساز لرزه‌ای فعال	0.10	0.10	0.18	0.36
درصد کاهش تغییرمکان بیشینیه پایه	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
حالت با جداساز فعال نسبت به غیرفعال	65%	77%	51%	56%

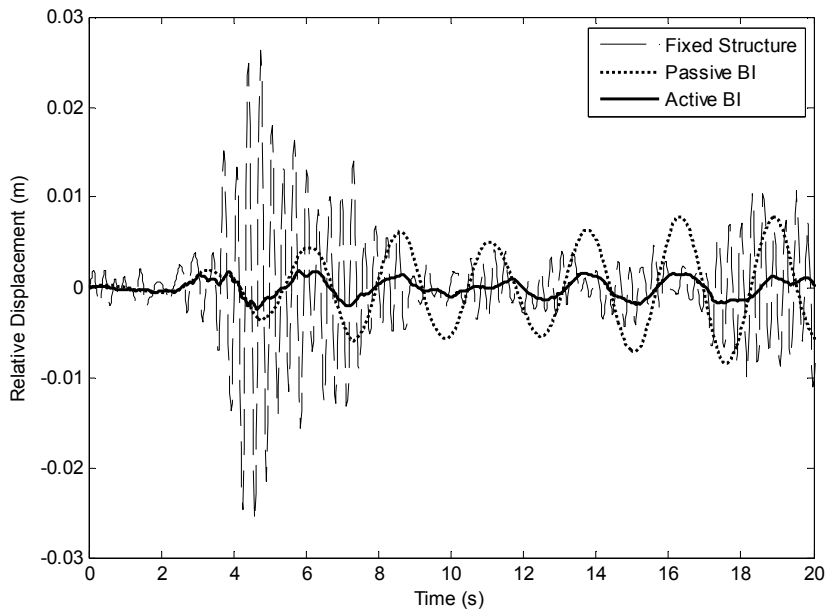
همانطور که در شکل ۴-۲۰ مشاهده می‌شود و همچنین با توجه به جدول ۴-۱۰، در زلزله حوزه‌دور El Centro تغییرمکان پایه در حالت کنترل فعال تا حدود ۶۵ درصد حالت غیرفعال کاهش داشته‌است؛ همچنین در زلزله Hachinohe این کاهش حدود ۷۷ درصد حالت غیرفعال می‌باشد. مطابق شکل ۴-۲۱ (الف) و همچنین جدول ۴-۱۰، ملاحظه می‌شود که در زلزله حوزه‌نزدیک Kobe تغییرمکان پایه در حالت کنترل فعال تا حدود ۵۱ درصد حالت غیرفعال کاهش یافته‌است. این امر نشان می‌دهد که کنترل فعال تأثیر کمتری روی کاهش تغییرمکان پایه در زلزله‌های حوزه‌نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه‌دور دارد. از طرفی شکل ۴-۲۱ (ب) نیز که مربوط به زلزله حوزه‌نزدیک Northridge است، همین قضیه را تأیید می‌کند و نشان‌دهنده آن است که تغییرمکان پایه در حالت جداسازی فعال تا حدود ۵۶ درصد حالت غیرفعال کاهش داشته‌است.

به این ترتیب می‌توان گفت که کنترل فعال در زلزله‌های حوزه‌دور نسبت به زلزله‌های حوزه‌نزدیک، تأثیر مطلوبتری از لحاظ کاهش تغییرمکان پایه داشته‌است؛ یکی از دلایل این امر می‌تواند پایین بودن فرکانس زمین‌لرزه‌های حوزه‌نزدیک و همچنین سازه‌های جداسازی‌شده باشد که باعث می‌شود سازه به حالت تشدید نزدیک شود.

ب) بررسی تغییر مکان نسبی بام :

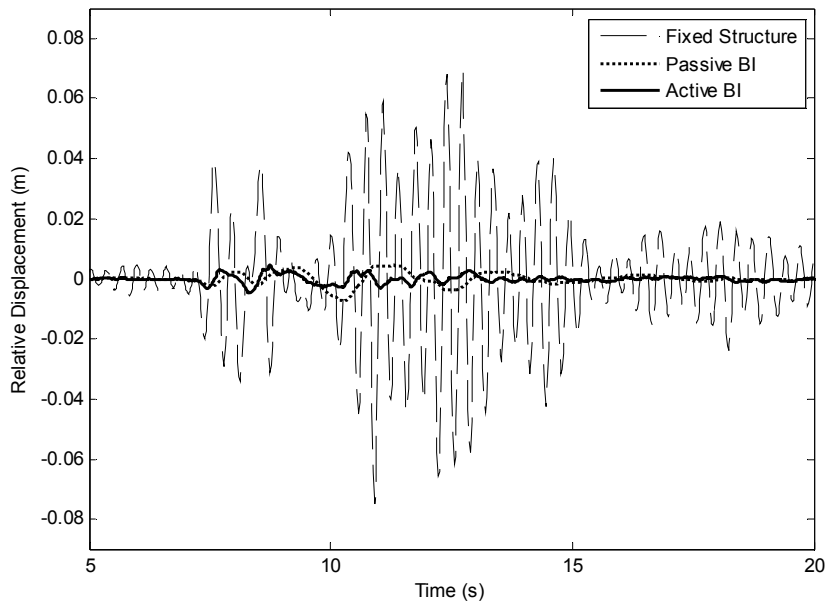


(الف)

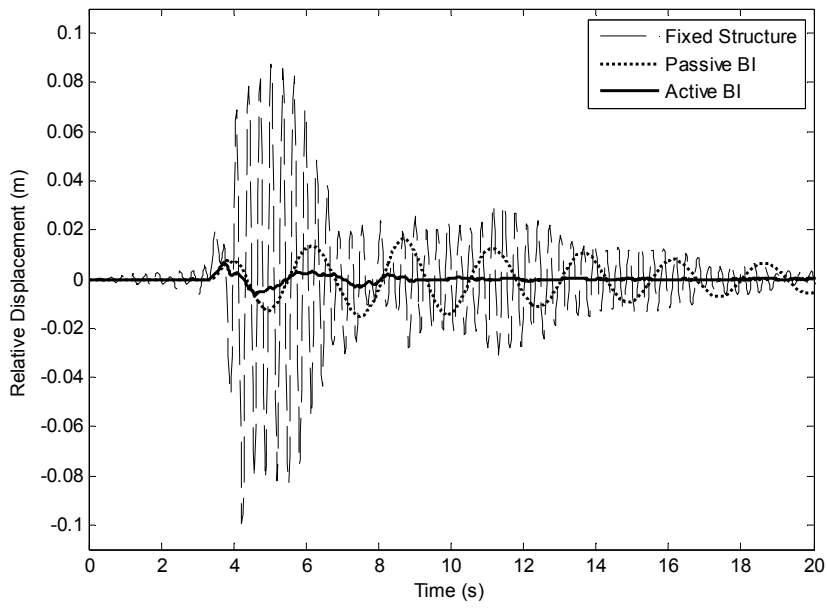


(ب)

شکل ۴-۲۲: تغییر مکان نسبی بام در مدل شماره ۱ تحت اثر الف) زلزله El Centro ، ب) زلزله Hachinohe



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۳: تغییر مکان نسبی بام در مدل شماره ۱ تحت اثر زلزله Kobe ، (ب) زلزله Northridge

جدول ۴-۱۱: بررسی تغییر مکان بیشینه بام نسبت به پایه در مدل شماره ۱

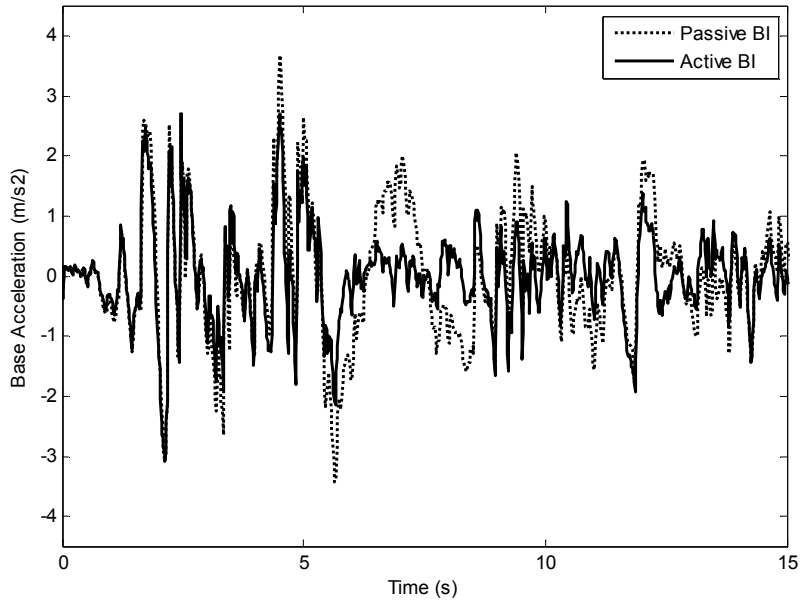
تغییر مکان بیشینه بام نسبت به پایه (m)	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
مدل شماره ۱ بدون جداساز لرزه‌ای	0.033	0.026	0.075	0.1
مدل شماره ۱ با جداساز لرزه‌ای غیرفعال	0.006	0.009	0.007	0.016
مدل شماره ۱ با جداساز لرزه‌ای فعال	0.003	0.002	0.005	0.007
درصد کاهش تغییر مکان بیشینه بام نسبت به پایه	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
حالت با جداساز غیرفعال نسبت به بدون جداساز	82%	65%	91%	84%
حالت با جداساز فعال نسبت به غیرفعال	50%	78%	29%	56%
حالت با جداساز فعال نسبت به بدون جداساز	91%	92%	93%	93%

مطابق شکل ۲۲-۴ و ۲۳-۴ و همچنین جدول ۴-۱۱، ملاحظه می‌گردد که تغییرمکان نسبی بام در حالت جداساز لرزه‌ای غیرفعال نسبت به حالت بدون جداساز لرزه‌ای کاهش چشمگیری داشته‌است؛ این امر به دلیل سختی بسیار ناچیز جداساز در مقایسه با سختی طبقات است که باعث می‌شود نیروی بسیار کمی به روسازه انتقال یابد. با اِعمال سیستم کنترل فعال تغییرمکان بام مجدداً کاهش داشته‌است که نشان‌دهنده تأثیر مطلوب کنترل فعال بر روی سازه است. همچنین مشاهده می‌شود که در سیستم کنترل فعال به دلیل خاصیت انطباق‌پذیری با شرایط موجود، در تمام مدت زمان زلزله، تغییرمکان بام نسبت به حالت بدون جداساز پایینتر است؛ ولی در حالت کنترل غیرفعال مطابق شکل ۲۲-۴ (ب) مشاهده می‌گردد که در یک بازه زمانی خاص (بین ثانیه ۸ تا ۱۸ در زلزله Hachinohe) تغییرمکان بام از حالت بدون جداساز لرزه‌ای، بالاتر رفته‌است.

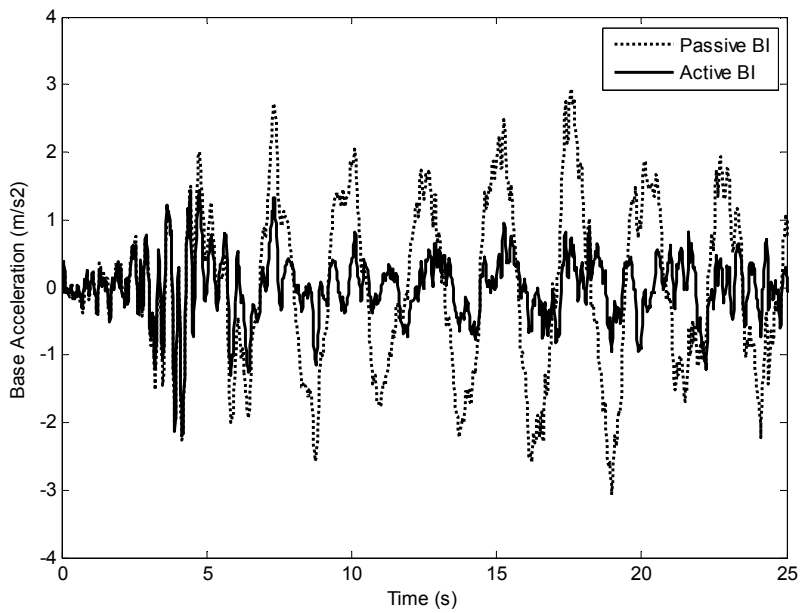
لازم به ذکر است که درصدکاهش تغییرمکان بام در زلزله‌های حوزه نزدیک در اثر جداسازی غیرفعال نسبت به حالت بدون جداساز، بیشتر از زلزله‌های حوزه دور است که البته به دلیل پایین‌تر بودن رنج مقادیر تغییرمکان‌های بام نسبت به تغییرمکان‌های پایه، کاهش تغییرمکان بام از اهمیت کمتری نسبت به کاهش تغییرمکان‌های پایه برخوردار است.

نکته دیگری که از بررسی این نمودارها برمی‌آید این است که فرکانس سازه بر اثر جداسازی لرزه‌ای به شدت پایین آمده است. این امر به دلیل کاهش سختی سازه در قسمت پایه بر اثر وجود جداساز لرزه‌ای پایه می‌باشد.

پ) بررسی شتاب وارده به سازه :

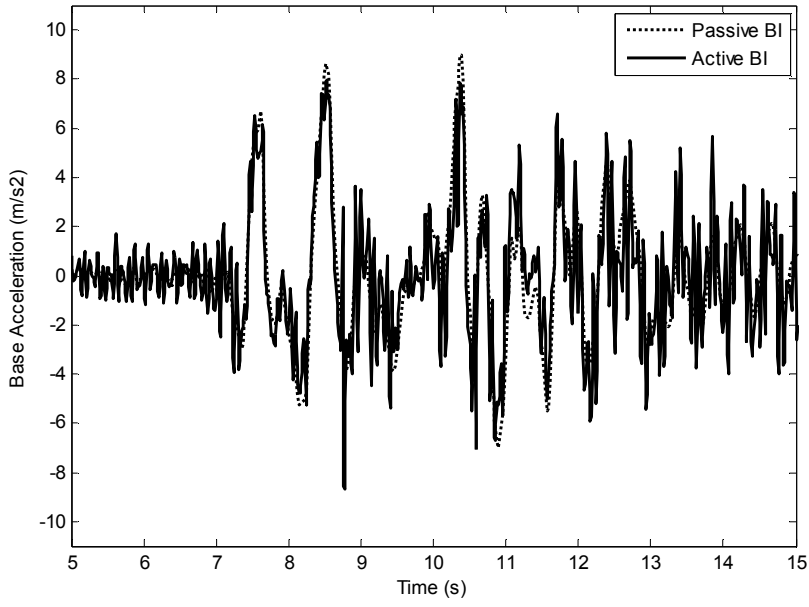


(الف)

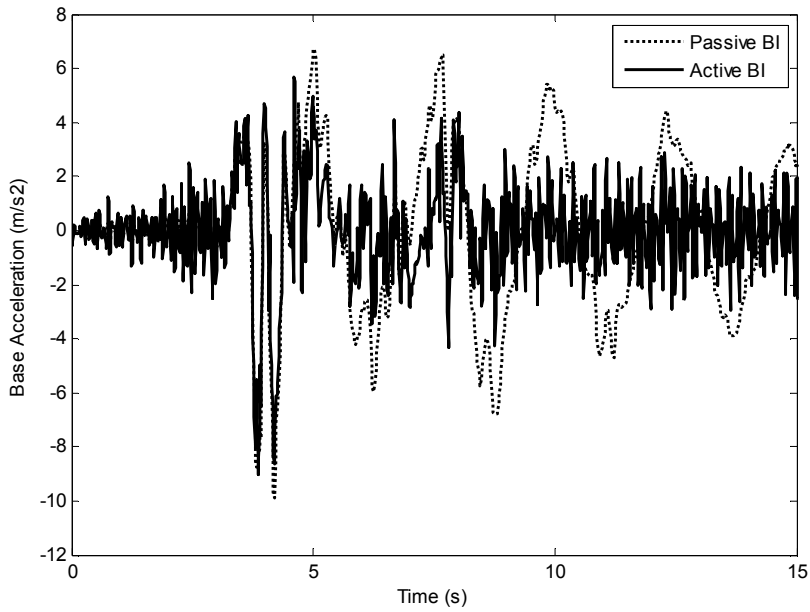


(ب)

شکل ۴-۲۴: شتاب وارده به پایه در مدل شماره ۱ تحت اثر الف) زلزله El Centro ، ب) زلزله Hachinohe

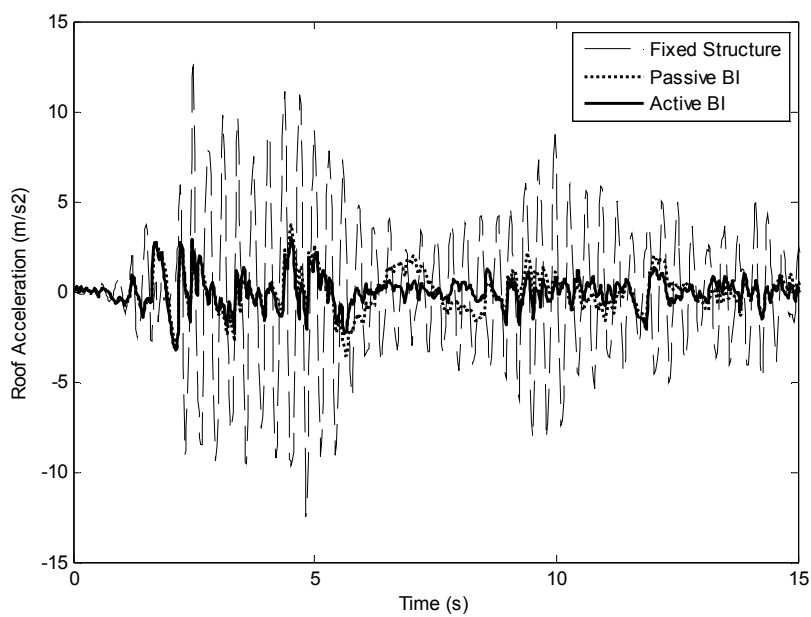


(الف)

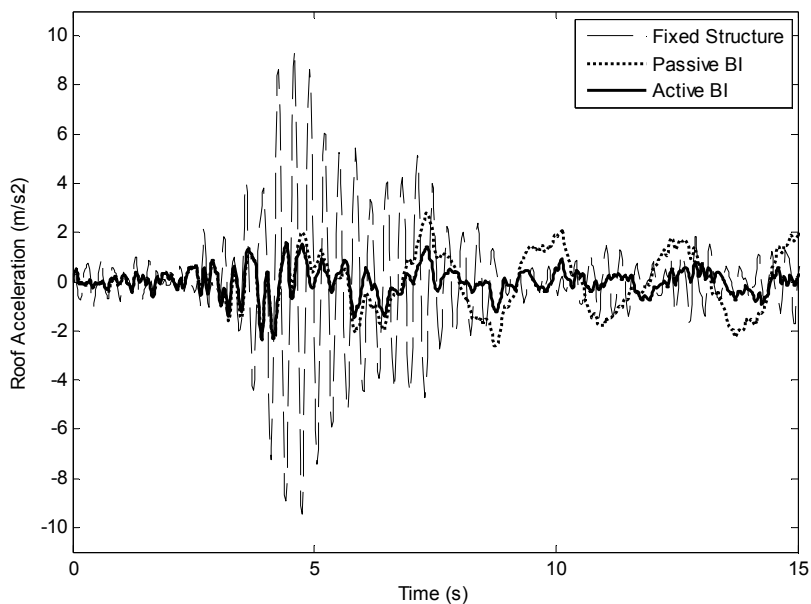


(ب)

شکل ۴-۲۵: شتاب وارده به پایه در مدل شماره ۱ تحت اثر الف) زلزله Kobe ، ب) زلزله Northridge

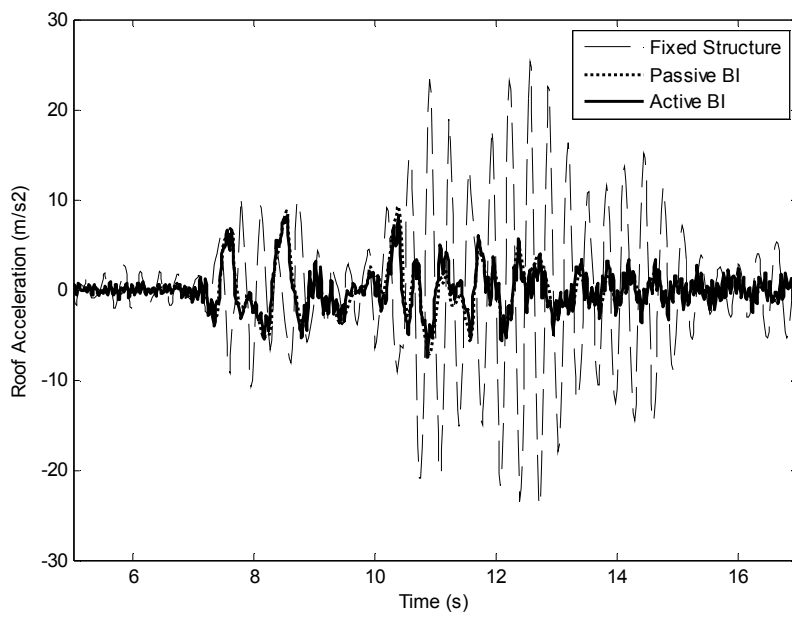


(الف)

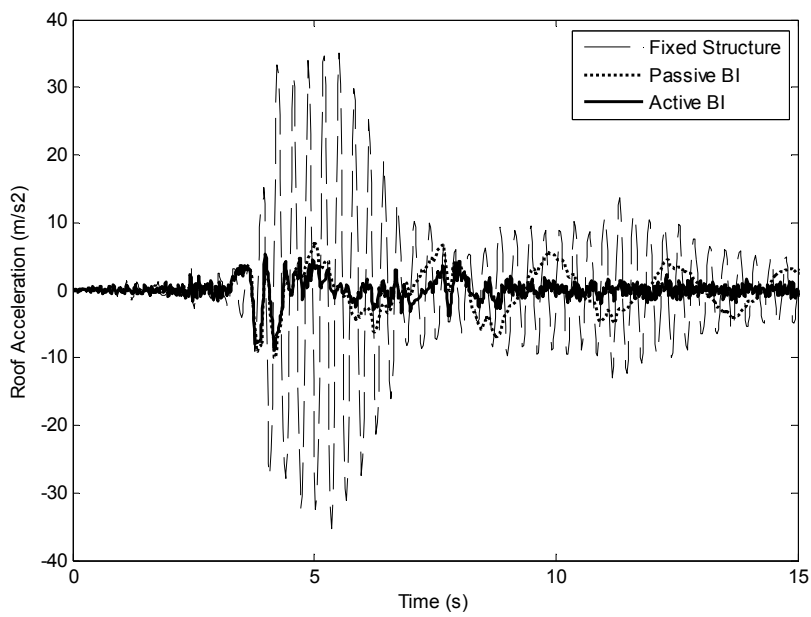


(ب)

شکل ۴-۲۶: شتاب وارده به بام در مدل شماره ۱ تحت اثر الف) زلزله El Centro ، ب) زلزله Hachinohe



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۷: شتاب وارده به بام در مدل شماره ۱ تحت اثر الف) زلزله Kobe ، ب) زلزله Northridge

جدول ۴-۱۲: بررسی شتاب بیشینۀ وارده به پایه در مدل شماره ۱

شتاب بیشینۀ وارده به پایه (m/s ²)	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
مدل شماره ۱ با جداساز لرزه‌ای غیرفعال	3.68	3.08	9.00	9.88
مدل شماره ۱ با جداساز لرزه‌ای فعال	3.05	2.17	9.31	8.77
درصد کاهش شتاب بیشینۀ وارده به پایه	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
حالت با جداساز فعال نسبت به غیرفعال	17%	30%	-3%	11%

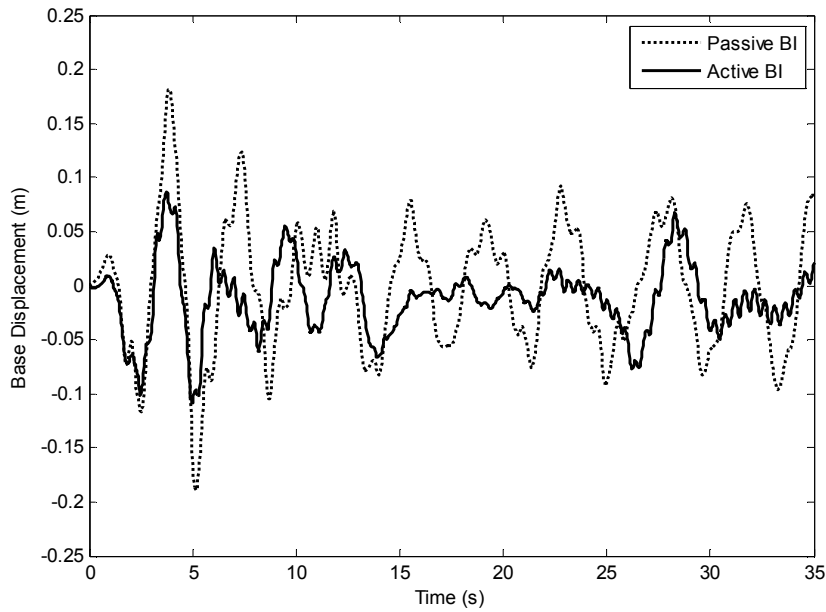
مطابق شکل‌های ۴-۲۴ و ۴-۲۵ و همچنین جدول ۴-۱۲، ملاحظه می‌شود که شتاب وارده به پایه در هر دو زلزله حوزه نزدیک و حوزه دور، بر اثر کنترل فعال کاهش قابل توجهی از خود نشان نداده است و حتی در مورد زلزله کوبه افزایش نیز داشته است. با توجه به شکل‌های ۴-۲۶ و ۴-۲۷ و جدول ۴-۱۳، در مورد شتاب وارده به بام نیز همین موضوع صدق می‌کند و تغییر محسوسی بین حالت کنترل فعال و غیرفعال مشاهده نمی‌گردد؛ البته به دلیل اینکه در حالت با جداساز لرزه‌ای، شتاب وارده به سازه بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت بدون جداساز لرزه‌ای کاهش یافته است، می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع جداساز لرزه‌ای غیرفعال و جداساز لرزه‌ای فعال، تأثیر مطلوبی در کاهش شتاب وارده به سازه داشته است.

جدول ۴-۱۳: بررسی شتاب بیشینه وارد به بام در مدل شماره ۱

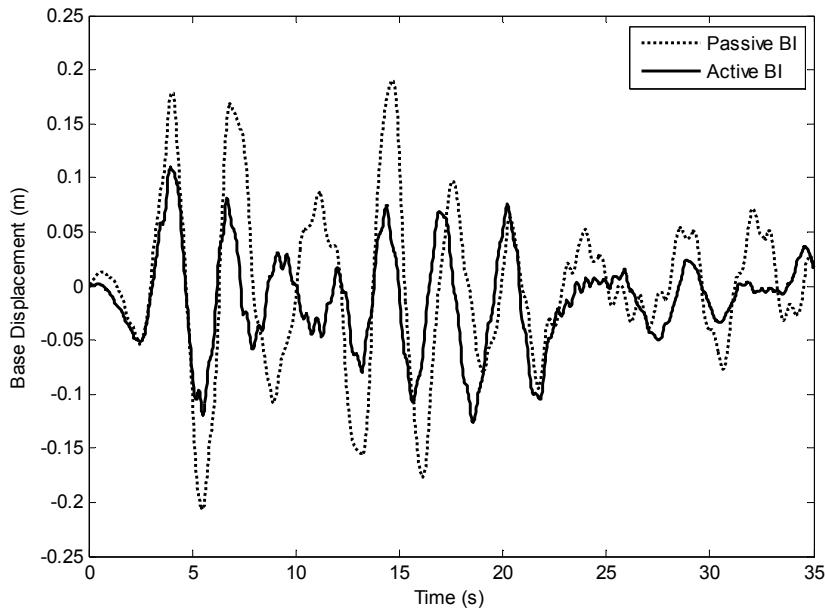
شتاب بیشینه وارد به بام (m/s ²)	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
مدل شماره ۱ بدون جداساز لرزه‌ای	13.03	9.74	25.35	35.4
مدل شماره ۱ با جداساز لرزه‌ای غیر فعال	3.71	3.12	9.2	10.01
مدل شماره ۱ با جداساز لرزه‌ای فعال	3.22	2.33	8.89	8.85
درصد کاهش شتاب بیشینه وارد به بام	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
حالت با جداساز غیر فعال نسبت به بدون جداساز	72%	68%	64%	72%
حالت با جداساز فعال نسبت به غیر فعال	13%	25%	3.4%	12%
حالت با جداساز فعال نسبت به بدون جداساز	75%	76%	65%	75%

۴-۵-۲- تحلیل و بررسی نتایج بر روی مدل شماره ۲

الف) بررسی تغییر مکان های پایه :

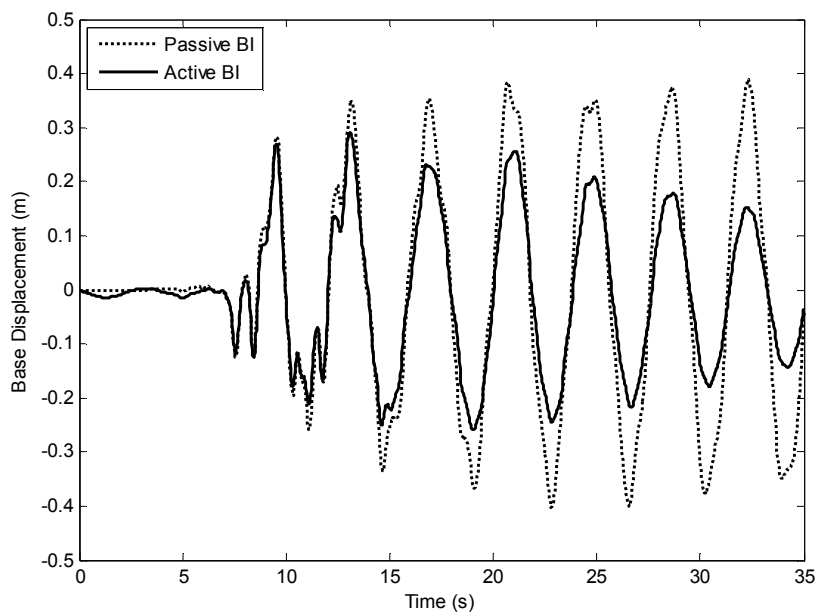


(الف)

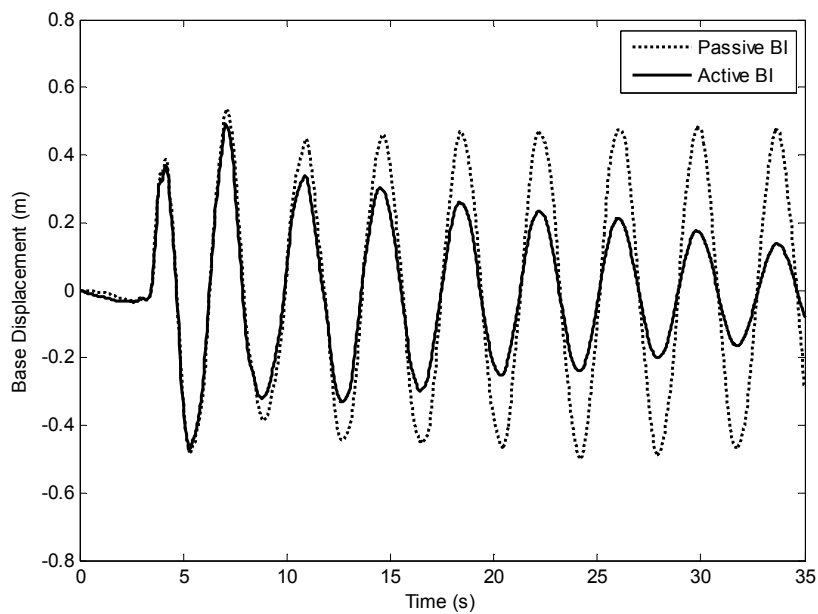


(ب)

شکل ۴-۲۸: تغییر مکان پایه در مدل شماره ۲ تحت اثر الف) زلزله El Centro ، ب) زلزله Hachinohe



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۹: تغییر مکان پایه در مدل شماره ۲ تحت اثر زلزله Kobe ، (ب) زلزله Northridge

جدول ۴-۱۴: بررسی تغییرمکان بیشینیه پایه در مدل شماره ۲

تغییرمکان بیشینیه پایه (m)	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
مدل شماره ۲ با جداساز لرزه‌ای غیرفعال	0.19	0.205	0.404	0.533
مدل شماره ۲ با جداساز لرزه‌ای فعال	0.097	0.118	0.301	0.488
درصد کاهش تغییرمکان بیشینیه پایه	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
حالت با جداساز فعال نسبت به غیرفعال	49%	42%	25%	8%

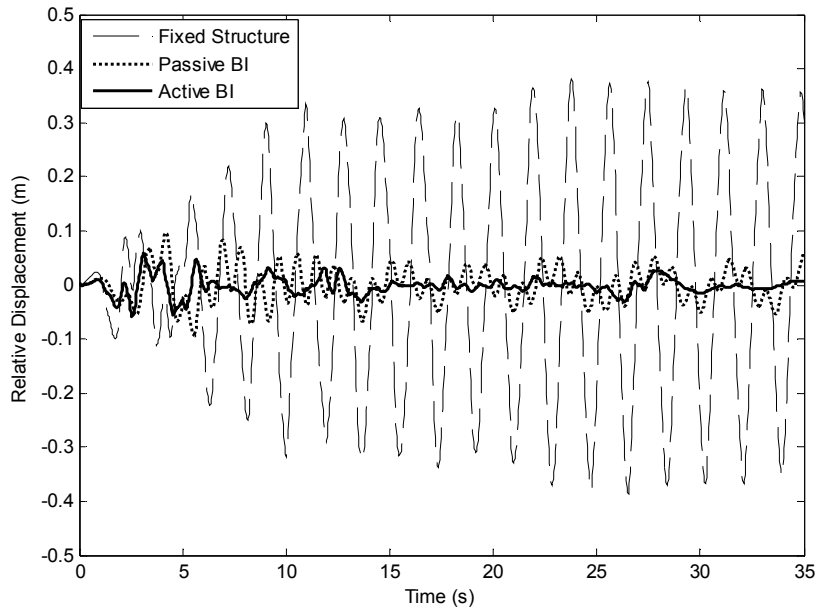
همانطور که در شکل ۴-۲۸ و جدول ۴-۱۴ مشاهده می‌شود، در زلزله حوزه‌دور El Centro تغییرمکان پایه در حالت کنترل فعال حدود کمتر از ۵۰ درصد حالت غیرفعال کاهش داشته‌است؛ همچنین در زلزله Hachinohe این کاهش تقریباً مشابه زلزله El Centro است.

مطابق شکل ۴-۲۹ (الف) و همچنین با توجه به جدول ۴-۱۴، ملاحظه می‌شود که در زلزله حوزه‌نزدیک Kobe تغییرمکان پایه در حالت کنترل فعال تنها تا حدود ۲۵ درصد حالت غیرفعال کاهش یافته‌است. همانند مدل شماره ۱ این امر نشان می‌دهد که کنترل فعال تأثیر کمتری روی کاهش تغییرمکان پایه در زلزله‌های حوزه‌نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه‌دور دارد. از طرفی شکل ۴-۲۹ (ب) نیز که مربوط به زلزله حوزه‌نزدیک Northridge است، همین قضیه را تأیید می‌کند و تغییرمکان پایه در حالت جداسازی فعال نسبت به حالت غیرفعال، کاهش بسیار ناچیزی از خود نشان

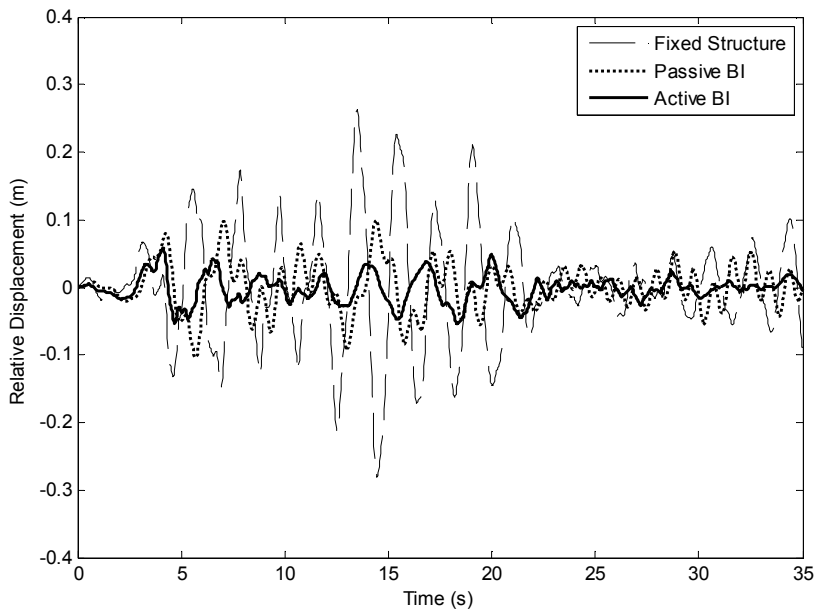
داده است.

طبق جدول ۴-۱۴ ملاحظه می‌گردد که درصد‌های کاهش در مدل شماره ۲ نسبت به مقادیر کاهش در مدل شماره ۱، کمتر است و نشان‌دهنده تأثیر ضعیف کنترل فعال در کاهش تغییر مکان پایه در مدل شماره ۲ است؛ بخصوص در زلزله‌های حوزه نزدیک این تأثیر بسیار ناچیز است.

ب) بررسی تغییر مکان نسبی بام :

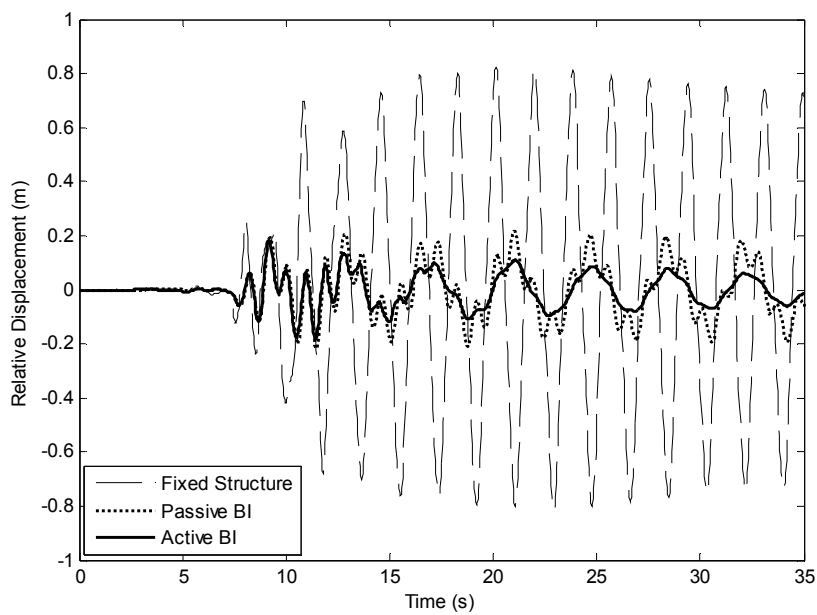


(الف)

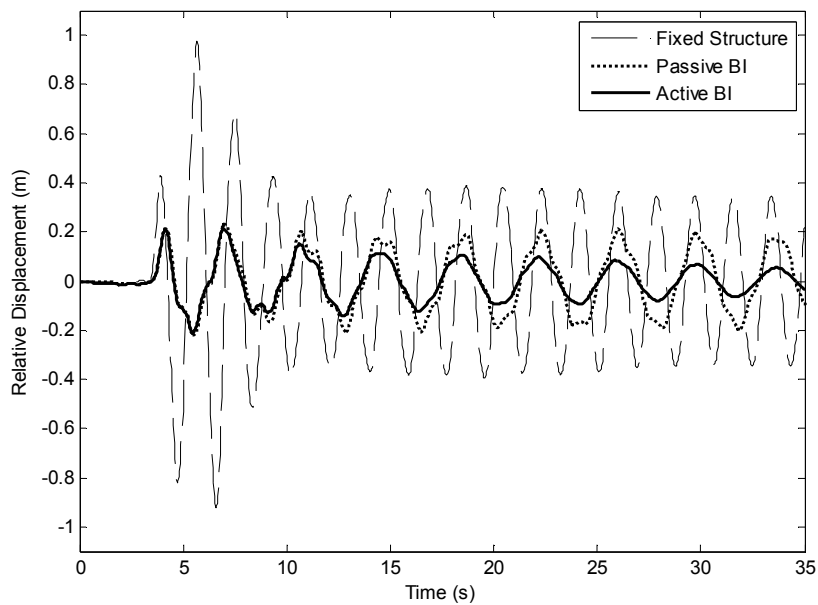


(ب)

شکل ۴-۳۰: تغییر مکان نسبی بام در مدل شماره ۲ تحت اثر الف) زلزله El Centro ، ب) زلزله Hachinohe



(الف)



(ب)

شکل ۴-۳۱: تغییر مکان نسبی بام در مدل شماره ۲ تحت اثر اثر الف) زلزله Kobe ، ب) زلزله Northridge

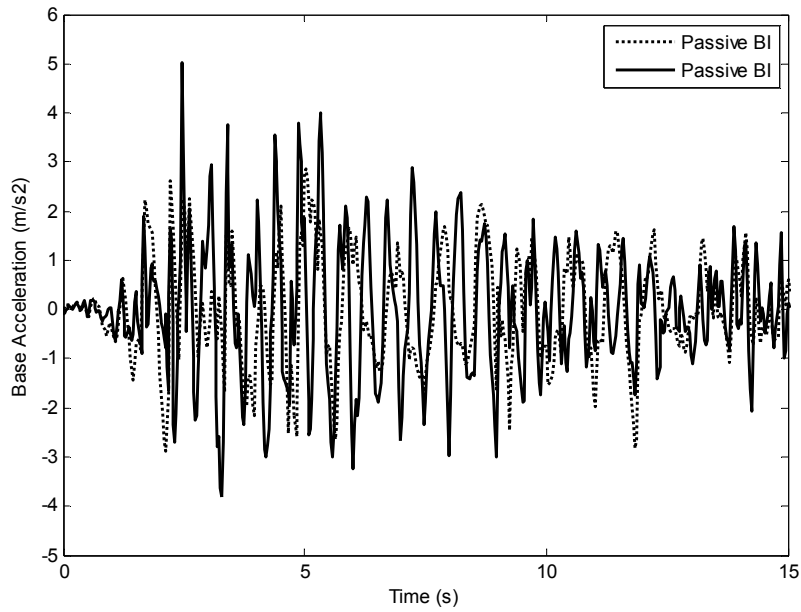
جدول ۴-۱۵: بررسی تغییرمکان بیشینیه بام نسبت به پایه در مدل شماره ۲

تغییرمکان بیشینه بام نسبت به پایه (m)	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
مدل شماره ۲ بدون جداساز لرزه‌ای	0.39	0.281	0.824	0.976
مدل شماره ۲ با جداساز لرزه‌ای غیرفعال	0.097	0.104	0.218	0.234
مدل شماره ۲ با جداساز لرزه‌ای فعال	0.059	0.059	0.185	0.213
درصد کاهش تغییرمکان بیشینه بام نسبت به پایه	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
حالت با جداساز غیرفعال نسبت به بدون جداساز	75%	63%	74%	76%
حالت با جداساز فعال نسبت به غیرفعال	39%	43%	15%	9%
حالت با جداساز فعال نسبت به بدون جداساز	85%	79%	78%	78%

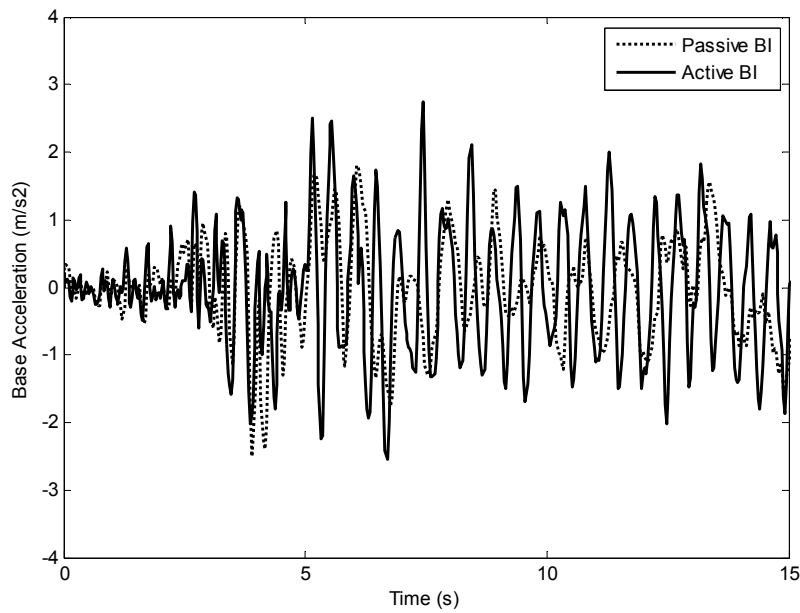
مطابق شکل ۳۰-۴ و ۳۱-۴ ملاحظه می‌گردد که تغییرمکان نسبی بام در حالت کنترل غیرفعال نسبت به حالت بدون جداساز لرزه‌ای کاهش چشمگیری داشته‌است؛ این امر به دلیل سختی بسیار ناچیز جداساز در مقایسه با سختی طبقات است که باعث می‌شود نیروی بسیار کمی به روسازه انتقال یابد. با اعمال سیستم کنترل فعال تغییرمکان بام مجدداً کاهش داشته‌است که نشان‌دهنده تأثیر مطلوب کنترل فعال بر روی سازه است. این کاهش در زلزله‌های حوزه‌دور مقدار بیشتری را نسبت به زلزله‌های حوزه‌نزدیک به خود اختصاص داده است.

لازم به ذکر است که به دلیل اینکه تغییرمکان‌های پایه در هر دو حالت کنترل فعال و غیرفعال در مدل شماره ۲ مقادیر بالایی دارند، لذا کاهش جزئی تغییرمکان نسبی بام در حالت کنترل فعال نمی‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد.

پ) بررسی شتاب وارده به سازه :

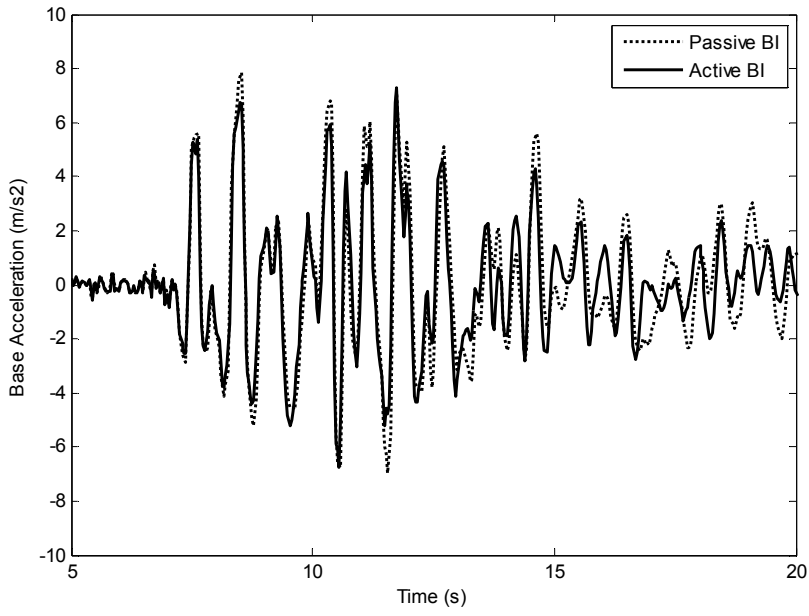


(الف)

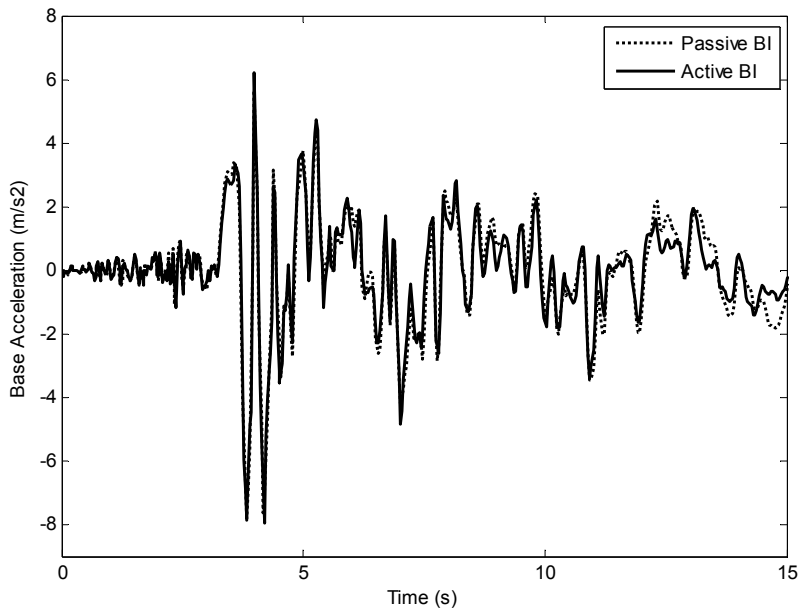


(ب)

شکل ۴-۳۲: شتاب وارده به پایه در مدل شماره ۲ تحت اثر الف) زلزله El Centro ، ب) زلزله Hachinohe

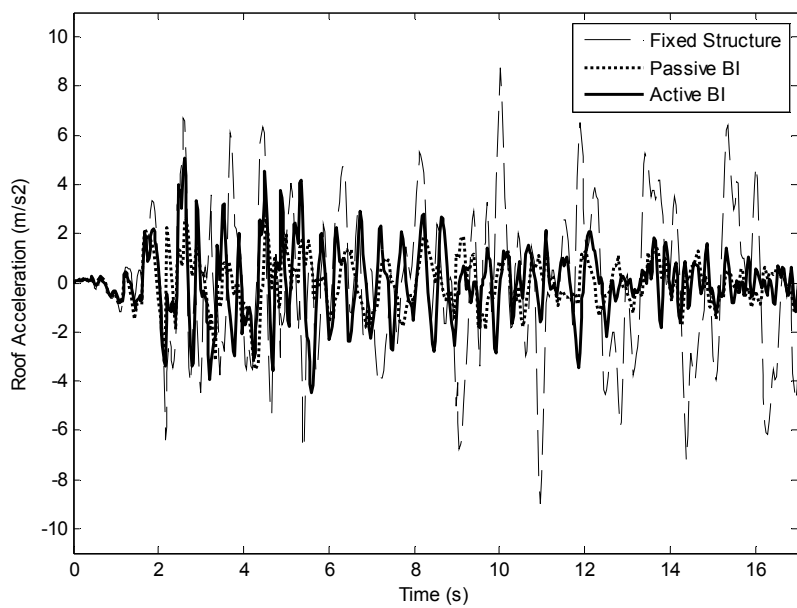


(الف)

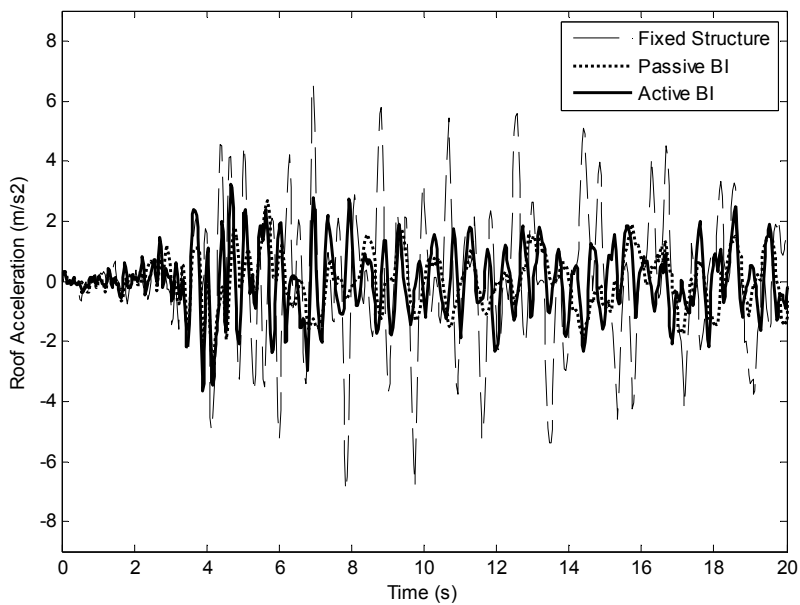


(ب)

شکل ۴-۳۳: شتاب وارده به پایه در مدل شماره ۲ تحت اثر الف) زلزله Kobe ، ب) زلزله Northridge

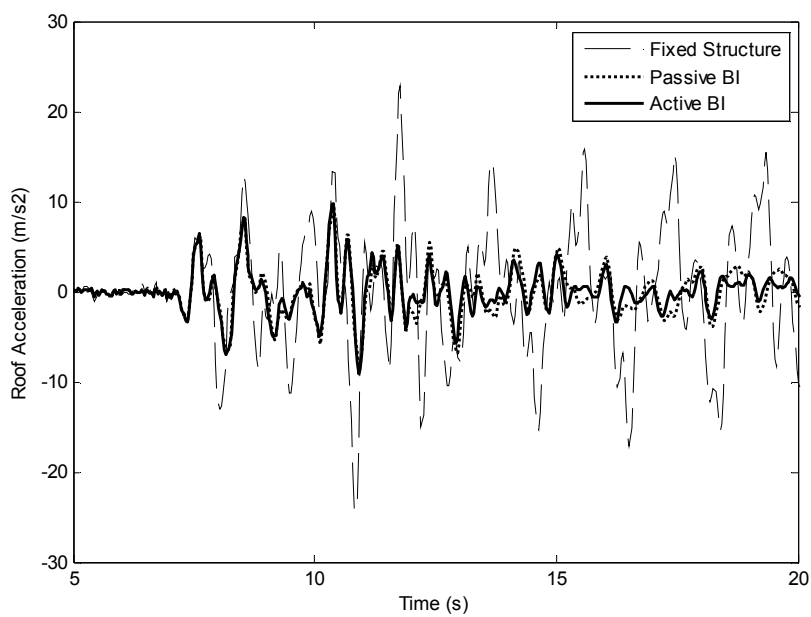


(الف)

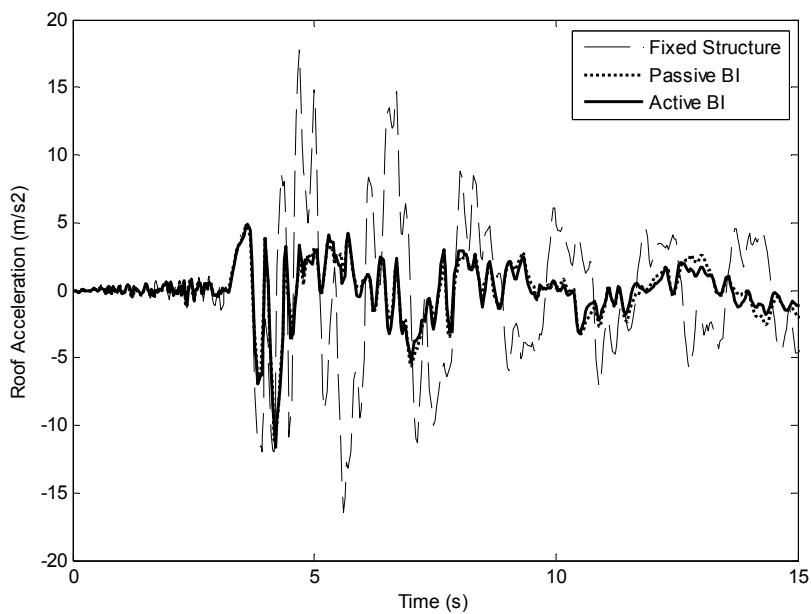


(ب)

شکل ۴-۳۴: شتاب وارده به بام در مدل شماره ۲ تحت اثر الف) زلزله El Centro ، ب) زلزله Hachinohe



(الف)



(ب)

شکل ۴-۳۵: شتاب وارده به بام در مدل شماره ۲ تحت اثر الف) زلزله Kobe ، ب) زلزله Northridge

جدول ۴-۱۶: بررسی شتاب بیشینیه وارد به پایه در مدل شماره ۲

شتاب بیشینیه وارد به پایه (m/s ²)	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
مدل شماره ۲ با جداساز لرزه ای غیر فعال	2.88	2.49	7.87	7.84
مدل شماره ۲ با جداساز لرزه ای فعال	4.1	2.48	7.24	7.94
درصد کاهش شتاب بیشینیه وارد به پایه	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
حالت با جداساز فعال نسبت به غیر فعال	-42%	0%	8%	-1.3%

مطابق شکل های ۴-۳۲ و ۴-۳۳ و همچنین جدول ۴-۱۶، ملاحظه می شود که شتاب وارد به پایه در هر دو نوع زلزله حوزه نزدیک و حوزه دور، بر اثر کنترل فعال تغییر قابل توجهی از خود نشان نداده است و حتی در مواردی تأثیر نامطلوبی داشته است.

مطابق شکل های ۴-۳۴ و ۴-۳۵ و جدول ۴-۱۷، مشاهده می گردد که در تمامی موارد کنترل فعال تأثیر نامطلوب بر شتاب وارد به بام داشته است؛ البته به دلیل اینکه در حالت جداساز لرزه ای غیر فعال شتاب وارد به سازه بطور قابل ملاحظه ای نسبت به حالت بدون جداساز لرزه ای کاهش یافته است، می توان نتیجه گرفت که در مجموع جداساز لرزه ای، تأثیر مطلوبی در کاهش شتاب وارد به سازه دارد.

با مقایسه درصدهای کاهش شتاب بیشینه وارده به بام در مدل شماره ۱ و ۲، نتیجه می‌شود که با زیاد شدن ارتفاع سازه از تأثیر کاهندگی شتاب وارده به سازه در اثر جداسازی لرزه‌ای بخصوص جداسازی لرزه‌ای فعال، کاسته شده است.

جدول ۴-۱۷: بررسی شتاب بیشینه وارده به بام در مدل شماره ۲

شتاب بیشینه وارده به بام (m/s^2)	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
مدل شماره ۲ بدون جداساز لرزه‌ای	8.96	6.99	24.30	17.78
مدل شماره ۲ با جداساز لرزه‌ای غیرفعال	3.49	2.89	9.79	11.07
مدل شماره ۲ با جداساز لرزه‌ای فعال	5.33	3.37	10.15	11.62
درصد کاهش شتاب بیشینه وارده به بام	El Centro	Hachinohe	Kobe	Northridge
حالت با جداساز غیرفعال نسبت به بدون جداساز	61%	59%	60%	38%
حالت با جداساز فعال نسبت به غیرفعال	-53%	-17%	-3.7%	-5%
حالت با جداساز فعال نسبت به بدون جداساز	41%	52%	58%	35%

فصل پنجم

نتیجه گیری

“Experimentalists think that it is a mathematical theorem while the mathematicians believe it to be an experimental fact.” *Gabriel Lippman*

در این تحقیق، تأثیر جداسازهای لرزه‌ای فعال بر روی سازه‌های با ارتفاع کم و متوسط تحت اثر زلزله‌های حوزه‌نزدیک و حوزه‌دور مورد بررسی قرار گرفت که نتایج شبیه‌سازی عددی حاکی از آن است که :

۱- یکی از مشکلات سیستم جداساز لرزه‌ای غیرفعال، تغییر مکان زیاد پایه در هر دو نوع زلزله، مخصوصاً زلزله حوزه‌نزدیک است که سیستم جداساز لرزه‌ای فعال با کاهش قابل ملاحظه تغییر مکان پایه، این مشکل را مرتفع می‌کند.

۲- بر اثر کنترل فعال جداسازهای لرزه‌ای، پاسخ تغییر مکان پایه در زلزله‌های حوزه‌دور کاهش بیشتری نسبت به زلزله‌های حوزه‌نزدیک از خود نشان می‌دهد. یکی از دلایل این امر پایین بودن فرکانس زمین‌لرزه‌های حوزه‌نزدیک و همچنین سازه‌های جداسازی شده است که باعث می‌شود سازه به حالت تشدید نزدیک شود.

۳- تغییر مکان نسبی بام در حالت جداساز لرزه‌ای غیرفعال نسبت به حالت بدون جداساز لرزه‌ای کاهش چشمگیری داشته‌است؛ با اعمال سیستم کنترل فعال تغییر مکان بام مجدداً کاهش داشته‌است که نشان‌دهنده تأثیر مطلوب کنترل فعال بر روی پاسخ سازه است. همچنین از بررسی نمودارهای مربوط به تغییر مکان بام در هر دو نوع زلزله نتیجه می‌شود که فرکانس سازه بر اثر جداسازی لرزه‌ای به شدت پایین آمده است.

۴- در هر دو نوع زلزله با استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای غیرفعال، شتاب وارده به سازه کاهش قابل توجهی نسبت به حالت بدون جداساز پیدا می‌کند. با اعمال سیستم کنترل فعال، پاسخ شتاب وارده به سازه تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند؛ در مجموع می‌توان

گفت که در هر دو حالت جداسازی فعال و غیرفعال، کاهش پاسخ شتاب مطلوب بوده است.

۵- درصد کاهش تغییر مکان پایه و تغییر مکان نسبی بام بر اثر کنترل فعال در هر دو نوع زلزله حوزه دور و حوزه نزدیک، در مدل شماره ۱ که یک سازه با ارتفاع کم محسوب می‌گردد، بطور قابل توجهی بیشتر از مدل شماره ۲ که یک سازه با ارتفاع متوسط است، می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که با زیاد شدن ارتفاع سازه، از کارآیی سیستم جداساز لرزه‌ای فعال، کاسته شده است.

۶- از مقایسه مدل شماره ۱ و ۲ نتیجه می‌شود که با زیاد شدن ارتفاع سازه از تأثیر کاهندگی سیستم جداساز لرزه‌ای بر روی پاسخ شتاب وارده به سازه، کاسته می‌شود و حتی با اضافه کردن سیستم کنترل فعال، این تأثیر ضعیفتر می‌گردد.

پیشنهادات

۱- بررسی تأثیر استفاده از جداسازها در نیروی برشی پایه و سایر نیروهای وارد بر سازه در اثر زلزله و در نتیجه تغییر مقاطع طراحی و کاهش وزن سازه.

۲- استفاده از رویتگر و خارج شدن از حالت full state feedback برای بررسی کارایی الگوریتم LQR.

۳- استفاده از سایر الگوریتم های موجود و مقایسه آن با الگوریتم LQR.

۴- بررسی روش های کنترل نیمه فعال و مقایسه عملکرد آن با روش های کنترل فعال.

مراجع

1. Komodromos. P., (2000), "Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures," WIT PRESS.
2. Fragiaco M., Rajgelj S. and Cimadam F., (2003), "Design of bilinear hysteretic isolation system," Earthquake Eng. Struct. Dyn.
3. Nagarajaiah S., Sahasrabudhe S., (2006), "Seismic response control of smart sliding isolated buildings using variable stiffness systems: An experimental and numerical study," Earthquake Eng. Struct. Dyn., 35, p.p.177-197.
4. Masahiko Higashino and Shin Okamoto, (2006), "Response Control and Seismic Isolation of Buildings," Taylor & Francis group, LONDON AND NEW YORK.
5. Franklin Y. Cheng, Hongping Jiang, Kangyu Lou, (2008), "Smart Structures Innovative Systems for Seismic Response Control," Taylor & Francis group, LONDON AND NEW YORK.
6. A. Preumont and K. Seto, (2008), "Active Control of Structures," John Wiley & Sons, Ltd, Publication.
7. T.T. Soong and M.C. Constantinou, (1994), "Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering," SPRINGER-VERLAG, WIEN-NEW YORK.
8. سونگ تی. تی.، دارگوش جی. اف.، "سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال در مهندسی سازه"، ترجمه مهراں تیو و بابک کریمخانی، (۱۳۸۱)، تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
9. T.T. Soong and Spencer Jr. B.F., (2002), "Supplemental Energy Dissipation : state of the art and state of the practice," Eng. Struct., Vol.24, Part.3.
۱۰. تقی راد ح، (۱۳۸۲)، "مقدمه‌ای بر کنترل مدرن"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
۱۱. نصراله الحسینی ه، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد : "استفاده از میراگر نیمه‌فعال MR برای کنترل سازه‌ها"، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
12. Dingyu Xue, Yang Quan Chen, Derek P. Atherton, (2007), "Linear Feedback

Control Analysis and Design with MATLAB,” siam, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.

13. Erik A. Johnson, Juan C. Ramallo, Billie F. Spencer, and Michael K. Sain, (1998), “**Intelligent Base Isolation Systems,**” Presented at the Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan.

14. Oral Buyukozturk and Oguz Gunes , (2003), “**Advances in Earthquake Risk Assessment and Hazard Reduction for Large Inventory of Structures with High Characteristic Variability,**” Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, U.S.A.

15. Rahmi Guclu, Hakan Yazici, (2008), “**Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers,**” Journal of Sound and Vibration 318 (2008) 36–49.

16. Tsang H.H., Su R.K.L, Chandler A.M., (2006), “**Simplified inverse dynamics models for MR fluid dampers,**” Journal of Engineering Structures. 28, p.p. 327–341.

17. Yang, J. N., Li, Z., and Vongchavalitkul, S., (1992), “**A generalization of optimal control theory: Linear and nonlinear control,**” Technical Rep. NCEER-92-26, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y.

18. Tzu-Ying Lee and Kazuhiko Kawashima (2006), “**Effectiveness of Seismic Displacement Response Control for Nonlinear Isolated Bridge,**” Doboku Gakkai Ronbunshuu A Vol.62 No.1.

19. Katsushiko Ogata, (1997), “**Modern Control Engineering,**” University of Minnesota, Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey.

20. Charles De Vore, Chia-Ming Chang, B.F. Spencer, (2007), “**Active Base Isolation of Building Structures in Two Dimensions,**” Proceeding of the 2007 Earthquake Engineering Symposium for Young Researchers.

21. J. C. Ramallo, E. A. Johnson and B. F. Spencer, (2002), “**Smart Base Isolation Systems,**” Journal of Engineering Mechanics, Page 1088.

۲۲. امانپور آ، زهرایی م، تقی خانی ت، (۱۳۸۷)، “**بررسی کارآیی الگوریتم LQR در راندمان**

جداسازی لرزه‌ای در برابر زلزله‌های حوزه‌دور و حوزه‌نزدیک،” ارائه‌شده در چهارمین کنگره ملی

مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

۲۳. تهرانی‌زاده حقیقی فر م، برومند پ، (۱۳۸۷)، " بررسی عملکرد جداسازی از پایه در برابر زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک،" ارائه‌شده در اولین کنفرانس بین‌المللی مقاوم‌سازی لرزه‌ای، تبریز، ایران.

24. Alessandro Baratta, Ileana Corbi, (2002), "**Optimal design of base-isolators in multi-storey buildings,**" Science Direct, Computers & Structures.

25. Wodek K. Gawronski, (2004), "**Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures,**" Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg.

Abstract

In this research the effectiveness of active base isolation system on vibration response of multi degree of freedom construction has been studied. Using of base isolation system is one of the most effective ways for vibration control of construction and mitigation of this vibration. Using of passive base isolation can not be desirable because constructions occur under variable condition of lateral loading. Apply of active base isolation system is proper solution for this problem.

Several algorithms is available for controlling of active systems, in this research have been used of Linear Quadratic Regulator algorithm (LQR). First, have been studied a five degree of freedom construction modeled by MATLAB in three states without base isolation, with passive base isolation and with active base isolation that have been occurred under two types of earthquakes near-field and far-field. Formulation has been done by matrix equations for without base isolation and with passive base isolation states, also formulation has been done by state space equations for with active base isolation state. Results indicate that active control system has desirable effect on vibration control of construction.

Then for investigation on performance of base isolation in high-rise structures, a fourteen degree of freedom construction has been studied. Results indicate that base isolation has not desirable effect on vibration control of high-rise structures.

In this method (LQR) for calculation of weighting matrixes Q and R in each type of earthquake and model, have been done parameteric study on weighting matrixes and have been determined based on desirable parameter of design.

Key words: Active base isolation, Vibration control, Near-field & Far-field Earthquakes, LQR.



Shahrood University of Technology
Architecture and Civil Engineering Faculty

Investigation on Active Seismic Isolation

Mohsen Barabadi

Supervisor:

Dr A. Keyhani

Advisor:

Dr R. Amini

Thesis submitted for the degree of Master of Science

June 2010