



دانشکده فنی مهندسی عمران

گروه سازه

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی عمران-سازه

عنوان

کنترل نیمه‌فعال پاسخ لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده مجهز به میراگرهای ویسکوز متغیر

استاد راهنما

دکتر جواد کاتبی

استاد مشاور

دکتر حسین غفارزاده

پژوهشگر

حمیدرضا نعمتی

زمستان ۱۳۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نام خانوادگی: نعمتی	نام: حمیدرضا
<b>عنوان پایان نامه:</b> کنترل نیمه فعال پاسخ لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده مجهز به میراگرهای ویسکوز متغیر	
استاد راهنما: دکتر جواد کاتبی	
استاد مشاور: دکتر حسین غفارزاده	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: عمران
گرایش: سازه	دانشگاه: تبریز
دانشکده: مهندسی عمران	تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۳
تعداد صفحه: ۱۱۷	
<b>کلمات کلیدی:</b> کنترل نیمه فعال، پل‌های جداسازی شده، میراگر ویسکوز متغیر، کنترل مُد لغزشی، سطح لغزش، پاسخ لرزه‌ای	
<b>چکیده:</b>	
<p>پل‌های جداسازی شده از جمله مهمترین اجزا در سیستم حمل و نقل به شمار می‌آیند. با این حال، زلزله‌های اخیر نشان داده که این سازه‌ها حتی تحت تحریکات لرزه‌ای متوسط زمین از خود ضعف نشان می‌دهند. چنانچه این پل‌ها تحت تحریکات شدید زلزله قرار گیرند، عرشه‌ی پل جابجایی بسیار بزرگی خواهد داشت. لذا یکی از نگرانی‌ها و چالش‌های مهندسان حفاظت این پل‌ها در مقابل این تحریکات می‌باشد. در سال‌های اخیر با پیشرفت دانش و فناوری در زمینه‌ی کنترل سازه‌ها، این ایده در پل‌ها نیز به خدمت گرفته شده است. از میان سیستم‌های کنترلی متداول، کنترل نیمه فعال به دلیل مزایا و امتیازاتی که نسبت به سایر سیستم‌های کنترلی دارد بیشتر مورد توجه بوده است. این سیستم‌های کنترلی مزیت‌های سیستم کنترل فعال و غیر فعال را به طور همزمان دارا می‌باشد و برخی نواقص این دو را نیز ندارند.</p> <p>پژوهش حاضر به مطالعه‌ی سیستم‌های مختلف کنترلی در پل‌های جداسازی شده می‌پردازد و رفتار آن را نسبت به حالت بدون کنترل بررسی خواهد کرد. بدین منظور از میراگر ویسکوز متغیر به عنوان یکی از مناسب‌ترین تجهیزات در سیستم‌های کنترل نیمه فعال استفاده گردیده است. در مطالعه‌ی رفتار پل جداسازی شده، سیستم پایه-جداساز-عرشه به عنوان یک سیستم دو درجه آزادی با جرم متمرکز مدل شده است. به منظور حداکثر استفاده از ظرفیت میراگر متغیر، به یک طرح کنترلی موثر که باعث افزایش کارایی آن شود، نیاز است. در تحقیق حاضر این مهم با استفاده از الگوریتم کنترلی مُد لغزشی صورت گرفته است. این روش کنترلی ابزاری بسیار قدرتمند در میان طرح‌های کنترلی مرسوم، محسوب می‌شود که در آن با تعریف یک سطح لغزشی مشخص به بررسی عملکرد لرزه‌ای پل پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کنترل مُد لغزشی با سطح لغزش مناسب، تاثیر قابل توجهی در کاهش پاسخ لرزه‌ای عرشه‌ی پل و بهبود وضعیت دینامیکی آن در مقایسه با حالت بدون کنترل دارد.</p>	

## فهرست مطالب

۱.....	فصل اول: مقدمه
۱.....	۱-۱ پیشگفتار
۲.....	۲-۱ سیستم کنترل سازه‌ها
۳.....	۱-۲-۱ سیستم‌های کنترل غیرفعال
۴.....	۲-۲-۱ سیستم‌های کنترل فعال
۵.....	۳-۲-۱ سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال
۷.....	۴-۲-۱ سیستم‌های کنترل ترکیبی یا مرکب
۷.....	۳-۱ پل‌های جداسازی شده
۱۰.....	۱-۳-۱ جداگرهای الاستومری چندلایه‌ای مسلح به ورقهای فولادی (ELRB)
۱۰.....	۲-۳-۱ جداگرهای لاستیکی - سربی (LRB)
۱۱.....	۴-۱ میراگر ویسکوز متغیر
۱۴.....	۵-۱ لزوم انجام تحقیق حاضر
۱۴.....	۶-۱ ساختار پایان نامه
۱۶.....	فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته
۱۶.....	۱-۲ مقدمه
۱۷.....	۲-۲ مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال
۱۹.....	۳-۲ مطالعات انجام شده در زمینه‌ی میراگر ویسکوز متغیر
۲۲.....	۴-۲ کاربرد میراگرهای ویسکوز در مقیاس واقعی
۲۲.....	۵-۲ مطالعات صورت گرفته روی سیستم‌های کنترلی در پل‌های جداسازی شده
۲۶.....	فصل سوم: الگوریتم‌های کنترلی
۲۶.....	۱-۳ مقدمه
۲۶.....	۱-۱-۳ معادله‌ی دینامیکی حرکت در یک سیستم هوشمند
۳۰.....	۲-۳ بررسی معادله‌ی حرکت سازه‌ی هوشمند در فضای حالت

۳۲	۳-۳ الگوریتم کنترل بهینه‌ی LQR.....
۳۲	۱-۳-۳ شاخص بهره‌وری.....
۳۳	۲-۳-۳ به دست آوردن کمینه مقدار شاخص بهره‌وری.....
۳۵	۴-۳ الگوریتم کنترلی تخصیص قطب‌ها.....
۳۸	۱-۴-۳ نحوه‌ی محاسبه‌ی ماتریس بهره‌ی F.....
۴۰	۵-۳ کنترل مد لغزشی.....
۴۰	۱-۵-۳ کاربردها و موارد استفاده‌ی SMC.....
۴۱	۲-۵-۳ اشباع محرک‌ها و خطر ناپایداری سیستم کنترلی.....
۴۲	۳-۵-۳ لحاظ کردن المان‌های خطی و غیرخطی سیستم در محاسبات.....
۴۴	۴-۵-۳ سطح لغزش.....
۴۸	۱-۴-۵-۳ طراحی سطح لغزش.....
۵۰	۵-۵-۳ طراحی کنترلرها با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف.....
۵۲	۶-۵-۳ بازخورد مستقیم شمار محدود خروجی‌ها.....
۵۵	فصل چهارم:
۵۵	۱-۴ مقدمه.....
۵۶	۲-۴ مشخصات زلزله‌های مورد استفاده.....
۵۷	۳-۴ معیارهای ارزیابی.....
۵۸	۴-۴ مثال‌های عددی.....
۵۹	۱-۴-۴ مثال اول.....
۶۴	۱-۱-۴-۴ مقایسه عملکرد الگوریتمهای LQR و CSMC.....
۷۲	۲-۴-۴ مثال دوم.....
۷۸	۳-۴-۴ کنترل نیمه‌فعال پل‌های جداسازی شده.....
۷۸	۱-۳-۴-۴ مقدمه.....
۷۹	۲-۳-۴-۴ مدل ارائه شده برای آنالیز پل جداسازی شده.....
۸۰	۳-۳-۴-۴ پل جداسازی شده‌ی مورد مطالعه.....
۸۲	۴-۳-۴-۴ مشخصات زلزله‌های وارد شده به پل مورد مطالعه.....

۸۵.....	سیستم‌های کنترلی مختلف در پل جداسازی شده ۵-۳-۴-۴
۹۱.....	سیستم کنترلی فعال و طراحی سطح لغزش ۶-۳-۴-۴
۱۰۱.....	کنترل نیمه‌فعال در پل ۷-۳-۴-۴
۱۱۱.....	فصل پنجم:
۱۱۱.....	۱-۵ نتیجه‌گیری
۱۱۲.....	۲-۵ پیشنهاد برای کارهای آینده
۱۱۳.....	منابع ...

## فهرست شکل‌ها

۴.....	شکل ۱-۱: الف) دیاگرام بلوکی سازه با طراحی سنتی؛ ب) دیاگرام بلوکی سیستم‌های کنترل غیرفعال
۵.....	شکل ۲-۱: دیاگرام بلوکی سیستم‌های کنترل حلقه باز
۶.....	شکل ۳-۱: دیاگرام بلوکی سیستم‌های کنترل حلقه بسته
۶.....	شکل ۴-۱: دیاگرام بلوکی سیستم‌های کنترل حلقه باز - بسته
۹.....	شکل ۵-۱: تصویری شماتیک از یک پل جداسازی شده‌ی دلخواه با عرشه‌ی پیوسته
۱۰.....	شکل ۶-۱: تکیه‌گاه الاستومریک چندلایه‌ای مسلح به ورقهای فولادی
۱۱.....	شکل ۷-۱: تکیه‌گاه الاستومریک لاستیکی با هسته‌ی سربی
۱۲.....	شکل ۸-۱: ساختار تشکیل دهنده‌ی میراگر ویسکوز
۱۳.....	شکل ۹-۱: نحوه‌ی عملکرد میراگر ویسکوز متغیر با باز و بسته شدن دریچه‌ی سیلندر
۳۷.....	شکل ۱-۳: نمایش کلی قطب‌های ماتریس A در یک سازه‌ی هوشمند
۴۲.....	شکل ۲-۳: مدل مربوط به سازه‌ی جداسازی شده
۴۳.....	شکل ۳-۳: نحوه‌ی استخراج ماتریس $\alpha$ در صورت در اختیار داشتن ماتریس [A]
۴۵.....	شکل ۴-۳: نحوه‌ی حرکت خط مسیر پاسخ در محدوده‌ی سطح لغزش
۵۹.....	شکل ۱-۴: شتاب نگاشت زلزله‌ی El Centro با حداکثر شتاب $0.112g$
۶۰.....	شکل ۲-۴: مدل سازه سه طبقه مجهز به سیستم بادبند فعال

شکل ۳-۴: مقایسه‌ی جابجایی طبقه‌ی آخر در حالت بدون کنترل، کنترل غیرفعال، کنترل فعال (الگوریتم LQR)، کنترل فعال (الگوریتم SMC).....	۶۳
شکل ۴-۴: مقایسه‌ی جابجایی نسبی طبقه‌ی آخر در حالت بدون کنترل، کنترل غیرفعال، کنترل فعال (الگوریتم LQR)، کنترل فعال (الگوریتم SMC).....	۶۳
شکل ۵-۴: مقایسه‌ی شتاب مطلق طبقه‌ی آخر در حالت بدون کنترل، کنترل غیرفعال، کنترل فعال (الگوریتم LQR)، کنترل فعال (الگوریتم SMC).....	۶۴
شکل ۶-۴: مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم LQR و SMC؛ الف. جابجایی طبقه سوم؛ ب. جابجایی نسبی طبقه سوم؛ ج. شتاب طبقه سوم.....	۶۵
شکل ۷-۴: مقایسه‌ی نیروی کنترل فعال نتیجه شده از الگوریتم‌های LQR کلاسیک و CSMC.....	۶۶
شکل ۸-۴: مقایسه‌ی جابجایی طبقه‌ی اول در دو حالت کنترل فعال با استفاده از الگوریتم LQR کلاسیک و کنترل مد لغزشی اشباع.....	۶۹
شکل ۹-۴: مقایسه‌ی شتاب مطلق طبقه‌ی اول در دو حالت کنترل فعال با استفاده از الگوریتم LQR کلاسیک و کنترل مد لغزشی اشباع.....	۶۹
شکل ۱۰-۴: مقایسه‌ی نیروی کنترل فعال نتیجه شده از الگوریتم‌های LQR کلاسیک و CSMC.....	۷۰
شکل ۱۱-۴: شتاب نگاشت زلزله‌ی El Centro با حداکثر شتاب $1g$ .....	۷۳
شکل ۱۲-۴: منحنی هیستریزیس الف: طبقه‌ی اول؛ ب: طبقه‌ی آخر در حالت بدون کنترل تحت رکورد زلزله‌ی ال سنترو.....	۷۵
شکل ۱۳-۴: مدل مربوط به جداساز پایه در سازه‌ی هشت طبقه.....	۷۶
شکل ۱۴-۴: مقایسه‌ی جابجایی طبقه اول در حالات بدون کنترل، استفاده از جداساز پایه و سیستم کنترل فعال.....	۷۷
شکل ۱۵-۴: رفتار زیرسازه و روسازه در یک پل تحت تحریکات زلزله؛ الف: بدون حضور جداساز لرزه‌ای؛ ب: در حضور جداساز لرزه‌ای.....	۷۸
شکل ۱۶-۴: مدل ایده آل مورد مطالعه‌ی پل جداسازی شده الف: شکل شماتیک سیستم ستون-جداساز-عرشه، ب: سیستم دو درجه آزادی جرم متمرکز.....	۷۹
شکل ۱۷-۴: شکل و ابعاد پل جداسازی شده با عرشه‌ی پیوسته؛ الف: نمای جانبی؛ ب: نمای برشی از روسازه‌ی پل؛ ج: نمای برشی از پایه‌ی پل؛ د: نمای جانبی از پایه‌ی پل.....	۸۱
شکل ۱۸-۴: شتاب نگاشت زلزله‌ی JMA Kobe.....	۸۳
شکل ۱۹-۴: شتاب نگاشت زلزله‌ی Northridge.....	۸۳
شکل ۲۰-۴: شتاب نگاشت زلزله‌ی Parkfield.....	۸۴
شکل ۲۱-۴: شتاب نگاشت زلزله‌ی Mammoth Lake.....	۸۴
شکل ۲۲-۴: تاثیر نیروی کنترل روی جابجایی ستون و جداساز؛ الف: نیروی کنترل مثبت، ب: نیروی کنترل منفی.....	۸۵
شکل ۲۳-۴: مقایسه‌ی جابجایی عرشه‌ی پل در الگوریتم کنترلی SMC-LQR و SMC-Pole تحت رکورد الف: JMA Kobe، ب: Northridge، ج: Parkfield، د: Mammoth Lake.....	۹۳
شکل ۲۴-۴: مقایسه‌ی الف: جابجایی عرشه؛ ب: جابجایی جداساز؛ ج: جابجایی پایه با استفاده از الگوریتم LQR و SMC تحت زلزله‌ی JMA Kobe.....	۹۴

شکل ۲۵-۴: مقایسه‌ی الف: جابجایی عرشه؛ ب: جابجایی جداساز؛ ج: جابجایی پایه با استفاده از الگوریتم LQR و SMC تحت زلزله‌ی Northridge	۹۵
شکل ۲۶-۴: مقایسه‌ی الف: جابجایی عرشه؛ ب: جابجایی جداساز؛ ج: جابجایی پایه با استفاده از الگوریتم LQR و SMC تحت زلزله‌ی Parkfield	۹۶
شکل ۲۷-۴: مقایسه‌ی الف: جابجایی عرشه؛ ب: جابجایی جداساز؛ ج: جابجایی پایه با استفاده از الگوریتم LQR و SMC تحت زلزله‌ی Mammoth Lake	۹۷
شکل ۲۸-۴: مقایسه‌ی نیروی کنترلی حاصل از الگوریتم‌های LQR و SMC در رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به گسل الف: JMA Kobe؛ ب: Northridge	۹۸
شکل ۲۹-۴: مقایسه‌ی نیروی کنترلی حاصل از الگوریتم‌های LQR و SMC در رکوردهای دور از گسل الف: Parkfield؛ ب: Mammoth Lake	۹۹
شکل ۳۰-۴: منحنی هیستریزیس ستون؛ الف: بدون کنترل، ب: کنترل LQR؛ ج: کنترل SMC	۹۹
شکل ۳۱-۴: منحنی هیستریزیس جداساز؛ الف: بدون کنترل، ب: کنترل LQR؛ ج: کنترل SMC	۱۰۰
شکل ۳۲-۴: منحنی هیستریزیس محرک فعال تحت رکوردهای نزدیک به گسل؛ الف: Kobe، ب: Northridge	۱۰۰
شکل ۳۳-۴: منحنی هیستریزیس محرک فعال تحت رکوردهای دور از گسل؛ الف: Parkfield، ب: Mammoth Lake	۱۰۱
شکل ۳۴-۴: مقایسه‌ی نیروی کنترل و جابجایی عرشه در کنترل فعال و نیمه‌فعال بر اساس الگوریتم مد لغزشی تحت رکورد JMA Kobe؛ الف: نیروی کنترل؛ ب: ضریب میرایی میراگر ویسکوز متغیر؛ ج: جابجایی عرشه	۱۰۳
شکل ۳۵-۴: مقایسه‌ی نیروی کنترل و جابجایی عرشه در کنترل فعال و نیمه‌فعال بر اساس الگوریتم مد لغزشی تحت رکورد Northridge؛ الف: نیروی کنترل؛ ب: ضریب میرایی میراگر ویسکوز متغیر؛ ج: جابجایی عرشه	۱۰۴
شکل ۳۶-۴: مقایسه‌ی نیروی کنترل و جابجایی عرشه در کنترل فعال و نیمه‌فعال بر اساس الگوریتم مد لغزشی تحت رکورد Parkfield؛ الف: نیروی کنترل؛ ب: ضریب میرایی میراگر ویسکوز متغیر؛ ج: جابجایی عرشه	۱۰۵
شکل ۳۷-۴: مقایسه‌ی نیروی کنترل و جابجایی عرشه در کنترل فعال و نیمه‌فعال بر اساس الگوریتم مد لغزشی تحت رکورد Mammoth Lake؛ الف: نیروی کنترل؛ ب: ضریب میرایی میراگر ویسکوز متغیر؛ ج: جابجایی عرشه	۱۰۶
شکل ۳۸-۴: مقایسه‌ی منحنی هیستریزیس نیروهای کنترلی تحت سیستم‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال برای رکوردهای الف: JMA Kobe، ب: Northridge، ج: Parkfield، د: Mammoth Lake	۱۰۷
شکل ۳۹-۴: مقادیر جابجایی عرشه‌ی پل در سیستم‌های کنترلی مختلف نسبت به حالت بدون کنترل (شاخص $J_d$ ) تحت زلزله‌ی Kobe	۱۰۸
شکل ۴۰-۴: مقادیر جابجایی عرشه‌ی پل در سیستم‌های کنترلی مختلف نسبت به حالت بدون کنترل (شاخص $J_d$ ) تحت زلزله‌ی Northridge	۱۰۹
شکل ۴۱-۴: مقادیر جابجایی عرشه‌ی پل در سیستم‌های کنترلی مختلف نسبت به حالت بدون کنترل (شاخص $J_d$ ) تحت زلزله‌ی Parkfield	۱۰۹
شکل ۴۲-۴: مقادیر جابجایی عرشه‌ی پل در سیستم‌های کنترلی مختلف نسبت به حالت بدون کنترل (شاخص $J_d$ ) تحت زلزله‌ی Mammoth Lake	۱۱۰



## فهرست جداول

- جدول ۱-۴: جزئیات شتاب نگاشت‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه ..... ۵۶
- جدول ۲-۴: نتایج حداکثر پاسخ‌های تحلیل ساختمان سه طبقه مقیاس شده در سیستم‌های کنترلی مختلف ..... ۶۲
- جدول ۳-۴: مقادیر شاخص پاسخ‌ها برای دو حالت الگوریتم کنترلی LQR کلاسیک و کنترل مد لغزشی ..... ۶۷
- جدول ۴-۴: نتایج حداکثر پاسخ‌های تحلیل ساختمان سه طبقه مقیاس شده تحت نیروی کنترلی اشباع ..... ۶۸
- جدول ۵-۴: مقادیر جرم و سختی و میرایی و جابجایی تسلیم سازه‌ی هشت طبقه مورد مطالعه ..... ۷۲
- جدول ۶-۴: نتایج حداکثر پاسخ‌های تحلیل ساختمان هشت طبقه در حالت بدون کنترل؛ کنترل غیرفعال (سیستم جداساز پایه)؛ کنترل فعال با استفاده از الگوریتم کنترلی مد لغزشی ..... ۷۴
- جدول ۷-۴: مقادیر پارامترهای مورد نیاز در تحلیل دینامیکی پل جداسازی شده ..... ۸۲
- جدول ۸-۴: نتایج حداکثر پاسخ‌های تحلیل ستون، جداساز و عرشه در پل جداسازی شده تحت زلزله‌ی JMA Kobe در سیستم‌های کنترلی مختلف ..... ۸۷
- جدول ۹-۴: نتایج حداکثر پاسخ‌های تحلیل ستون، جداساز و عرشه در پل جداسازی شده تحت زلزله‌ی Northridge در سیستم‌های کنترلی مختلف ..... ۸۸
- جدول ۱۰-۴: نتایج حداکثر پاسخ‌های تحلیل ستون، جداساز و عرشه در پل جداسازی شده تحت زلزله‌ی Parkfield در سیستم‌های کنترلی مختلف ..... ۸۹
- جدول ۱۱-۴: نتایج حداکثر پاسخ‌های تحلیل ستون، جداساز و عرشه در پل جداسازی شده تحت زلزله‌ی Mammoth Lake در سیستم‌های کنترلی مختلف ..... ۹۰

## ۱ فصل اول:

### مقدمه

#### ۱-۱ پیشگفتار

با پیشرفت روزافزون بشر در زمینه‌های مختلف، امروزه سازه‌ها و بناهای مختلف نیز با سرعت بیشتری در حال ساخته شدن هستند. از این رو حفاظت این سازه‌ها در برابر عوامل خارجی از جمله تحریکات ناشی از زلزله و باد نیز حائز اهمیت بوده و یکی از نگرانی‌ها و چالش‌های مهندسين سازه محسوب می‌گردد. در مواردی که این امر به خوبی محقق نگردد، شاهد تلفات جبران ناپذیر جانی و مالی می‌باشیم. برای حصول به این مهم یکی از رویکردهای سنتی این است که حتی الامکان اعضای سازه را قوی و نیرومند می‌سازند. در این حالت سازه به گونه‌ای طراحی می‌گردد که مقاومت، سختی و قابلیت جذب انرژی کافی را جهت پایداری در مقابل بارهای جانبی دارا باشد. در روش‌های مرسوم طراحی، عملکرد سازه در طول ارتعاشات لرزه‌ای، بستگی به جذب انرژی در مفاصل پلاستیک تشکیل شده دارد؛ به عبارتی مفاصل پلاستیک، نواحی متمرکز شده از آسیب در قاب‌های ثقلی هستند که اغلب غیرقابل تعمیر می‌باشند. با این وجود، بهره‌گیری از چنین روش‌هایی به دلیل ملاحظات اقتصادی، عدم فروریختگی سازه و حفظ امنیت جانی مجاز می‌باشند. لیکن، بعضاً این روش‌ها چندان مناسب به نظر نمی‌رسند؛ مثلاً در طراحی سازه‌هایی که می‌بایست پس از وقوع بلایای طبیعی همچنان پابرجا و قابل استفاده باشند مانند بیمارستانها، ایستگاههای پلیس، ایستگاههای آتش نشانی و ...

یکی دیگر از راهکارها در مقاوم‌سازی سازه، این است که سازه به قدری مقاوم طراحی گردد که احتمال تشکیل مفاصل پلاستیک در آن کم باشد. البته ناگفته نماند که چنین روشی بسیار پرهزینه می‌باشد. علاوه بر این بسیاری از سازه‌های موجود دارای مقاومت کافی و مورد نیاز برای داشتن رفتار پلاستیک نمی‌باشند. اگرچه ممکن است که مقاوم‌سازی لرزه‌ای چنین سازه‌هایی قابل حصول باشد، ولی یقیناً این عمل مستلزم صرف هزینه‌های بالا و اعمال تغییرات نامناسب در معماری سازه می‌باشد.

عموماً در روش سنتی مقاومت جانبی سازه عمدتاً با به کار بردن سیستم‌های سازه‌ای نظیر دیوارهای برشی، قاب‌های مهاربندی شده، قاب‌های خمشی، دیافراگم‌ها و خرپاهای افقی تأمین می‌گردد. این نوع رویکرد با چند محدودیت کلی همراه است؛ از جمله اینکه این سازه‌ها وابسته به سختی و میرایی ذاتی ناچیز مصالح خود جهت مستهلک کردن انرژی می‌باشند. همچنین دارای ظرفیت مشخص و محدود در تحمل بار و استهلاک انرژی هستند. در نتیجه به آن صورت که باید نمی‌توانند

در مقابل تحریکات محیطی خارجی مثل باد و زلزله از خود سازگاری نشان دهند. این محدودیت‌ها محققین را به کشف مواد و مصالح طبیعی با ویژگی‌ها و خواص غیر معمول موسوم به مصالح هوشمند<sup>۱</sup> و همچنین سیستم‌هایی که می‌توانند خودشان را با تغییرات و تحریکات محیطی تطبیق دهند، سوق داد. با کشف این تجهیزات و مصالح، مفهوم سازه‌ی هوشمند<sup>۲</sup> به شکل خاص خود ظهور پیدا کرد. یک سیستم سازه‌ای هوشمند می‌تواند هر گونه تغییرات محیطی را شناسایی کند و اطلاعات مورد نیاز مربوط به سازه را در هر لحظه فراخوانی کند و به فراخور شرایط موجود برای آن، بهترین عمل را اتخاذ نماید و به این ترتیب ایمنی و قابلیت سرویس دهی سازه تامین می‌گردد. تاریخچه‌ی استفاده از این ایده به اوایل سال ۱۹۷۰ میلادی باز می‌گردد. در آن زمان مشاهده گردید در صورت استفاده از این تجهیزات الحاقی در سازه‌ها، سازه نه تنها سختی و میرایی ذاتی خود را جهت پاسخ به تحریکات خارجی در فعل و انفعالات صورت گرفته شرکت می‌دهد، بلکه علاوه بر آن این سیستم‌ها و تجهیزات هوشمند نیز وارد عمل شده و به طور بسیار موثر و قابل توجهی در برابر این بارهای اعمالی ایستادگی می‌کنند [۱].

## ۱-۲ سیستم کنترل سازه‌ها

همان طور که گفته شد کاهش پاسخ لرزه‌ای در سازه‌ها به عنوان اصلی ترین دغدغه‌ی مهندسين، از اهمیت بالایی برخوردار است و روش‌های مختلفی نیز برای رسیدن به این هدف وجود دارد که از میان آنها کنترل سازه‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. به کمک روش‌های کنترل می‌توان ارتعاشات لرزه‌ای سازه را کنترل کرد و پاسخ‌های آن را در محدوده‌ی قابل قبولی نگه داشت.

ایده‌ی کنترل سازه‌ها بر این اصل استوار است که در آن با استفاده از تجهیزات کنترلی، سازه‌ی مورد نظر در برابر بارهای جانبی کنترل شده؛ به طوری که پاسخ سازه از حد معینی فراتر نرود و سلامت سازه تهدید نشود. اساس عملکرد این سیستم‌ها افزایش میرایی و یا سختی در سازه است. این سیستم‌ها انرژی سازه را جذب کرده و عموماً به گرما تبدیل می‌کنند. گاهی اوقات نیز از ترکیب کنترل سازه‌ها و رویکرد سنتی جهت دستیابی به یک سیستم بهینه استفاده می‌شود [۲]. تا به امروز سیستم‌های کنترلی متنوعی مورد استفاده قرار گرفته که در یک دسته بندی کلی می‌توان آنها را به سیستم‌های کنترلی غیرفعال<sup>۳</sup>، نیمه‌فعال<sup>۴</sup>، فعال<sup>۵</sup> و مرکب<sup>۶</sup> که ترکیبی از سیستم‌های قبل است تقسیم کرد. در ادامه به طور خلاصه به شرح

<sup>1</sup> Smart Materials

<sup>2</sup> Smart Structures

<sup>3</sup> Passive Control

<sup>4</sup> Semi-Active Control

<sup>5</sup> Active Control

<sup>6</sup> Hybrid Control

مختصری از هر یک از این سیستم‌های کنترلی پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲-۱ سیستم‌های کنترل غیرفعال

سیستم‌هایی که در آنها ابزار کنترل سازه جهت عملکرد، به منبع انرژی خارجی نیاز ندارند و از حرکت خود سازه برای تولید نیروی کنترل استفاده می‌شود، غیرفعال نامیده می‌شوند. به همین علت این گونه سیستم‌ها بسیار قابل اعتماد بوده و از آنجا که انرژی خارجی به سیستم تزریق نمی‌کنند امکان ناپایداری سازه نیز وجود ندارد. علی‌رغم اینکه سیستم‌های طراحی سنتی سازه‌ها نظیر قاب مهاربندی شده، دیوارهای برشی و قاب خمشی نیز در این گروه طبقه بندی می‌شوند، مهم ترین ابزارهای کنترلی غیرفعال در سیستم کنترل مدرن عبارتند از:

✓	جداگرهای پایه <sup>۱</sup>
✓	میراگر جرم تنظیم شده (TMD) <sup>۲</sup>
✓	میراگر مایع تنظیم شده (TLD) <sup>۳</sup>
✓	میراگر اصطکاکی <sup>۴</sup>
✓	میراگر ویسکوالاستیک <sup>۵</sup>
✓	میراگر فلزی جاری شونده <sup>۶</sup>
✓	میراگر ویسکوز مایع <sup>۷</sup>

ابزار کنترل غیرفعال در سازه کار گذاشته می‌شوند و بخش قابل توجهی از انرژی ورودی به سیستم را با استفاده از حرکت نسبی درونی ایجاد شونده به علت حرکت‌های سازه یا تبدیل انرژی جنبشی به گرما، تلف می‌کنند. از فواید این سیستم‌ها عدم تاثیرپذیری آن‌ها از قطع جریان برق می‌باشد که غالباً در جریان زلزله‌ها اتفاق می‌افتد؛ لذا این سیستم‌ها از ضریب اطمینان بالایی برخوردارند. مزیت دیگر سیستم‌های غیرفعال، نگهداری آسان و کم هزینه‌ی آن‌ها می‌باشد. اما اشکال این سیستم‌ها همانند طراحی سازه‌ها به روش سنتی، ظرفیت محدود آن‌هاست. همچنین پس از تعبیه در سیستم، قابلیت انطباق در شرایط مختلف بارگذاری را نیز نخواهند داشت. دیاگرام بلوکی نحوه‌ی عملکرد سیستم‌های کنترل غیرفعال در شکل ۱-۱ نشان داده شده است [۱].

<sup>1</sup> Base-Isolation

<sup>5</sup> Viscoelastic Damper

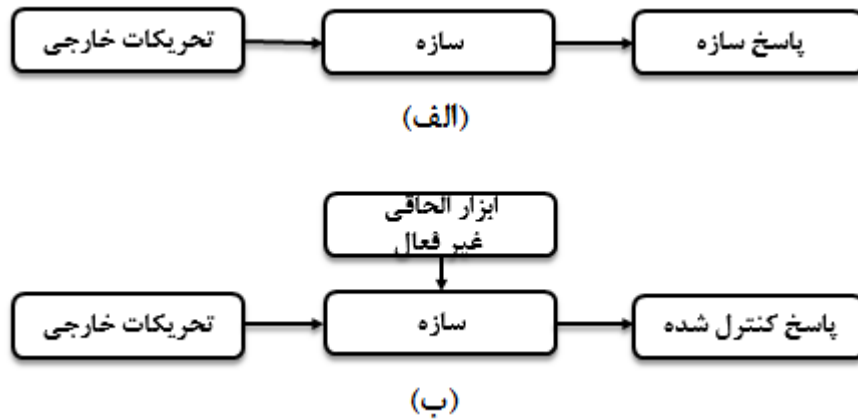
<sup>2</sup> Tuned Mass Damper

<sup>6</sup> Metallic Yield Damper

<sup>3</sup> Tuned Liquid Damper

<sup>7</sup> Viscous Fluid Damper

<sup>4</sup> Friction Damper



شکل ۱-۱: الف) دیاگرام بلوکی سازه با طراحی سنتی؛ ب) دیاگرام بلوکی سیستم‌های کنترل غیرفعال

## ۲-۲-۱ سیستم‌های کنترل فعال

همان‌گونه که در قسمت قبل گفته شد کنترل غیرفعال دارای ظرفیت بسیار محدودی بوده و قابلیت انطباق با تحریکات متغیر و پیش‌بینی نشده‌ی بارهای دینامیکی طبیعی نظیر زلزله و باد را ندارند. از این رو نیاز به یک سیستم کنترل کارا تر جهت ایجاد سازه‌ی هوشمند با قابلیت انطباق بر تحریکات دینامیکی مختلف در مدت زمان بارگذاری، احساس می‌گردد. سیستم‌های کنترل فعال با استفاده از یک منبع انرژی خارجی قابل ملاحظه که توسط یک دستگاه محرک (actuator) با ظرفیت ده‌ها کیلووات تأمین می‌شود، نیروهای لازم جهت کنترل پاسخ‌های سازه را در هر لحظه به سازه اعمال می‌نمایند. نیروهای اعمال‌شونده، با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی پاسخ‌های سازه در مدت اعمال بارهای دینامیکی یا تحریکات خارجی ورودی و یا هر دو آن‌ها که توسط حس‌گر (sensor) ثبت می‌شوند، به وسیله‌ی کامپیوتر حاوی الگوریتم کنترل (controller) در هر لحظه محاسبه می‌شوند.

مهم‌ترین ابزارهای کنترلی غیرفعال در سیستم کنترل مدرن عبارتند از:

- ✓ میراگر جرم فعال (AMD)<sup>۱</sup>
- ✓ سیستم کابل فعال<sup>۲</sup>
- ✓ سیستم مهاربند فعال<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> Active Mass Damper System (Active Mass Driver System)

<sup>۲</sup> Active Tendon System

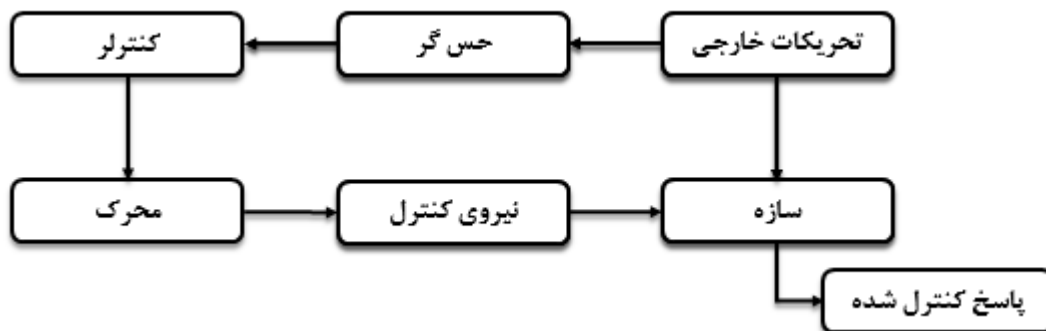
<sup>۳</sup> Active Bracing System

از معایب سیستم‌های کنترل فعال می‌توان به نیاز این گونه سیستم‌ها به یک منبع انرژی بزرگ خارجی و ازدیاد مقادیر نیروهای کنترل، عدم توجه اقتصادی طرح و هزینه‌های زیاد نگهداری اشاره کرد. همچنین در این سیستم‌ها به دلیل تزریق انرژی زیاد به سیستم، امکان ناپایداری سازه نیز وجود دارد [۱].

### ۳-۲-۱ سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال را در واقع می‌توان شکل تکامل یافته سیستم‌های کنترل غیرفعال دانست که هوشمندند و بر تغییرات بارهای دینامیکی وارده قابل انطباق می‌باشند. از طرفی از آنجا که این سیستم‌ها انرژی خارجی به سیستم تزریق نمی‌کنند، همانند سیستم‌های کنترل فعال نیاز به منبع انرژی بزرگی نداشته و احتمال ناپایداری سازه نیز در آن‌ها به آن شکل وجود ندارد. این سیستم‌ها تنها دارای خواص مکانیکی متغیر و قابل کنترلی هستند که در هر لحظه با مطالعه اطلاعات پیش‌خور<sup>۱</sup> (اندازه‌گیری سیگنال ورودی) یا پس‌خور<sup>۲</sup> (اندازه‌گیری پاسخ سازه) یا هر دو تغییر داده می‌شوند تا عملکرد مناسب‌تری نسبت به حالت غیر فعال در کاهش پاسخ‌های سازه از خود نشان دهند. در شکل‌های ۱-۲ تا ۱-۴ نحوه‌ی عملکرد سیستم‌های نیمه‌فعال هنگام مواجه شدن با تحریکات خارجی به صورت دیاگرام بلوکی نشان داده شده است.

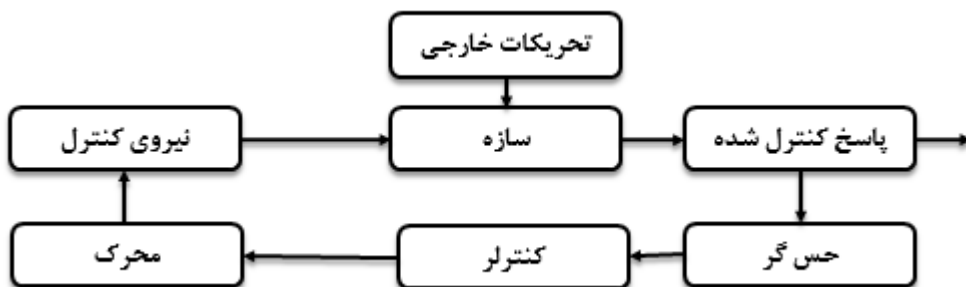
یک سیستم کنترل نیمه‌فعال نیز همانند سیستم فعال از حس‌گرها، کنترلر و محرک تشکیل می‌یابد. عملکرد سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال دقیقاً همانند سیستم‌های فعال است تنها با این تفاوت که دستگاه محرک به جای اعمال نیروی کنترل به صورت مستقیم به سازه، در هر لحظه مشخصات مکانیکی میراگرهای نیمه‌فعال را تنظیم می‌کند. بنابراین یک منبع انرژی بسیار کوچک نظیر باتری هم کافی به نظر می‌رسد. این خود مزیت بزرگی است زیرا امکان قطع برق در هنگام زلزله وجود دارد [۱].



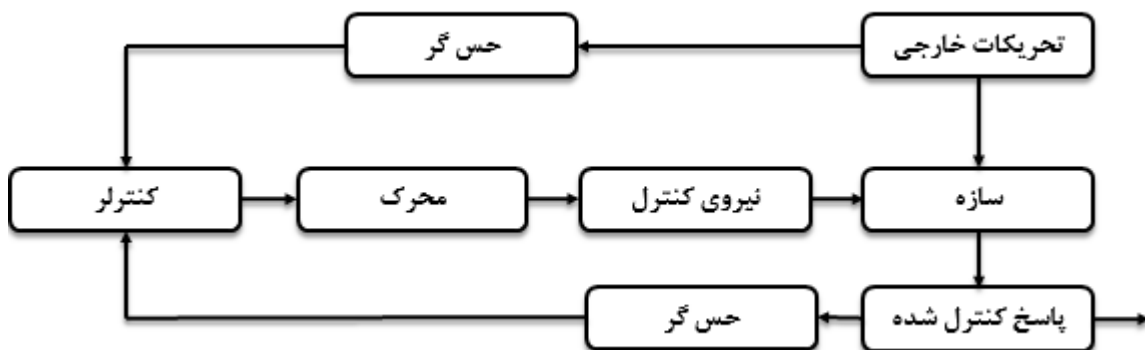
شکل ۱-۲: دیاگرام بلوکی سیستم‌های کنترل حلقه باز

<sup>۱</sup> Feedforward

<sup>۲</sup> Feedback



شکل ۳-۱: دیاگرام بلوکی سیستم‌های کنترل حلقه بسته



شکل ۴-۱: دیاگرام بلوکی سیستم‌های کنترل حلقه باز - بسته

از ابزارهای کنترلی نیمه‌فعال رایج می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ سیستم میراگر جرم تنظیم شده نیمه فعال<sup>۱</sup>
- ✓ سیستم میراگر مایع تنظیم شده نیمه فعال<sup>۲</sup>
- ✓ سیستم میراگر اصطکاکی نیمه فعال<sup>۳</sup>
- ✓ میراگر هیدرولیکی نیمه فعال (SAHD)<sup>۴</sup>
- ✓ سیستم سختی متغیر نیمه فعال (SAVS)<sup>۵</sup>
- ✓ میراگر ER<sup>۶</sup>
- ✓ میراگر MR<sup>۷</sup>
- ✓ میراگر ویسکوز متغیر<sup>۸</sup>

<sup>۱</sup> Semi-Active Tuned Mass Damper System

<sup>۲</sup> Semi-Active Tuned Liquid Damper System

<sup>۳</sup> Semi-Active Friction Damper System

<sup>۴</sup> Semi-Active Hydraulic Damper

<sup>۵</sup> Semi-Active Variable-Stiffness System

<sup>۶</sup> Electro-Rheological Fluid Damper

<sup>۷</sup> Magneto-Rheological Fluid Damper

<sup>۸</sup> Variable Viscous Damper

نقص سیستم‌های نیمه‌فعال، محدود بودن ظرفیت آن‌ها به حداکثر ظرفیت ابزار غیرفعال به کار رفته است که اغلب سبب می‌شود کنترل سازه از حالت کنترل بهینه خارج گردد. با این حال سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، از مزایای هر دو سیستم غیرفعال و فعال بهره مند بوده و معایب آن‌ها را نیز مرتفع می‌سازند و بسیار قابل اعتماد و کم هزینه هستند. بنابراین شیوه بسیار مناسبی در کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های مهندسی عمران به شمار می‌روند.

### ۴-۲-۱ سیستم‌های کنترل ترکیبی یا مرکب

یک سیستم کنترل که در آن پاسخ‌های سازه با استفاده از ترکیب یک یا چند سیستم غیرفعال، نیمه فعال و یا فعال کنترل شود، ترکیبی نامیده می‌شود. همانطور که قبلاً هم اشاره شد، هر یک از سیستم‌های کنترل معرفی شده در بخش‌های پیشین، هنگامی که به تنهایی مورد استفاده قرار گیرند، دارای نواقصی از قبیل عدم هوشمندی سیستم‌های غیرفعال، ظرفیت محدود در سیستم‌های غیرفعال و نیمه فعال و همچنین هزینه‌ی بالا، نیاز به منبع انرژی خارجی بزرگ و ازدیاد نیروی‌های کنترل در سیستم‌های کنترل فعال می‌باشند.

استفاده از یک سیستم کنترل ترکیبی، این کاستی‌ها و محدودیت‌ها را مرتفع می‌سازد و در عین حال مزایای هر دو حالت فعال و غیر فعال را نیز دارا می‌باشد. در نتیجه سیستم کنترل ترکیبی در بسیاری از موارد به سایر سیستم‌های کنترلی ترجیح داده می‌شود [۱].

از مهم ترین سیستم‌های کنترل ترکیبی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ سیستم جداگر پایه ترکیبی<sup>۱</sup>
- ✓ میراگر جرم ترکیبی<sup>۲</sup>

### ۳-۱ پل‌های جداسازی شده<sup>۳</sup>

پل‌ها به عنوان یکی از اجزای کلیدی شبکه حمل و نقل و شریان‌های ارتباطی هر شهر، نقش مهمی را در سرویس‌دهی حین و پس از وقوع حوادث غیرمترقبه، از جمله زلزله ایفا می‌کنند. از این رو عملکرد پل‌ها به عنوان یک سیستم سازه‌ای مهم

<sup>1</sup> Hybrid Base Isolation System

<sup>2</sup> Hybrid Mass Damper

<sup>3</sup> Isolated Bridges

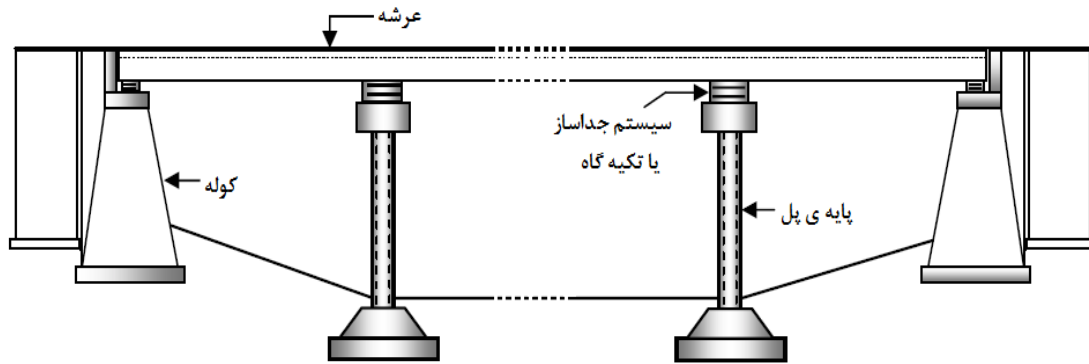


همواره مورد توجه بوده است. اگرچه پل‌ها سازه‌های خاصی از نظر هندسه‌ی سیستم باربر و نوع بارگذاری هستند، اما مبانی طراحی لرزه‌ای آنها تا حدودی با سایر سازه‌های متعارف اشتراکاتی دارد. روش مرسوم طراحی مقاوم در برابر زلزله در پل‌ها، افزایش مقاومت یا افزایش ظرفیت جذب انرژی (معرف شکل پذیری) اجزای آن است. این شکل پذیری دربردارنده خسارت بوده، در نتیجه روش طراحی مرسوم از فروپاشی پل جلوگیری می‌کند ولی خسارت آن را می‌پذیرد.

زلزله‌های اخیر در کشورهای مختلف و به خصوص زلزله‌های شدید نشان دادند که بسیاری از پل‌های طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های موجود زلزله، دچار خرابی‌های زیادی شدند و این در حالی بود که گزارش‌های لرزه‌نگاری نشان دادند شدت این زلزله‌ها کمتر از مقادیر نظیر در آیین‌نامه‌های طراحی بودند [۳]. در واقع می‌توان تخمین کمتر از واقع نیروهای زلزله را عامل اصلی بسیاری از این خسارات دانست. به عنوان نمونه زلزله کوبه‌ی ژاپن در سال ۱۹۹۵ میلادی با بزرگی  $7/3$  ریشتر شدیدترین زلزله در این کشور بوده که باعث کشته شدن حدود ۶۰۰۰ نفر و آسیب دیدن ۲۵۰ هزار سازه گردید. آسیب دیدگی‌های پل‌ها در زلزله کوبه نشان داد که معیار افزایش ظرفیت سازه (افزایش مقاومت اجزا، افزایش سختی جانبی سازه و افزایش شکل‌پذیری) به تنهایی جوابگوی عملکرد مناسب پل‌ها در مقابل نیروهای زلزله نمی‌باشد؛ بنابراین به جای مقابله با نیروی زلزله، روش همراه شدن با آن و کاهش نیروی زلزله مدنظر قرار گرفت. از این رو تا به امروز کاهش پاسخ لرزه‌ای در پل‌ها به عنوان اصلی‌ترین دغدغه‌ی مهندسین، از اهمیت بالایی برخوردار است و این مهم می‌تواند از طرق مختلف تامین گردد.

از جمله روش‌های مدرن که در کاهش خرابی و همچنین نگهداری پل‌ها بسیار متداول است، جداسازی پل با استفاده از جداگرهای لرزه‌ای<sup>۱</sup> است. اگرچه بیش از سه دهه از کاربرد جداساز لرزه‌ای در پل‌ها می‌گذرد، اما مطالعات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته است که همگی برکارایی آنها در پل‌ها مهر تأیید می‌زنند. هدف جداسازی در پل‌ها نسبت به ساختمان‌ها متفاوت است. در یک ساختمان جداساز لرزه‌ای بین فونداسیون و سازه، جهت کاهش نیروهای اینرسی انتقال داده شده به سازه‌ی روی جداساز (ساختمان) نصب می‌گردد؛ اما در یک پل معمولاً جداساز لرزه‌ای بین عرشه و زیرسازه قرار می‌گیرد تا نیروهای اینرسی انتقال داده شده به سازه‌ی زیر جداساز (زیرسازه) را کاهش دهد. شکل ۱-۵ تصویری شماتیک از پل جداسازی شده با عرشه‌ی پیوسته را ارائه می‌دهد. جداسازها مابین روسازه و زیرسازه‌ی پل و در محل تکیه‌گاه‌ها تعبیه می‌گردند. مناسبت و نحوه‌ی استفاده از جداسازها به عوامل مختلفی از جمله نوع دهانه‌ها و تعداد دهانه‌های پیوسته، لرزه‌خیزی منطقه، فرکانس‌های لرزه‌ای تحریکات خارجی، نگهداری و تسهیلات مربوط به جایگزینی جداسازها بستگی دارد [۳].

<sup>۱</sup> Seismic Isolator



شکل ۱-۵: تصویری شماتیک از یک پل جداسازی شده دلخواه با عرشه‌ی پیوسته

به دلیل مزیت‌هایی که جداسازی لرزه‌ای دارد، از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های مقاوم‌سازی به شمار می‌رود؛ زیرا با جایگزینی تکیه‌گاه‌های موجود پل‌ها با جداگرهای لرزه‌ای، ضمن جلوگیری از قطع ترافیک و همچنین سرعت کار، به تعویض یا ترمیم اجزای دیگر پل نیاز نیست و در این هزینه‌ها صرفه جویی شده و تنها هزینه واحدهای جداگر جایگزین باید در نظر گرفته شود.

دو گروه کلی جداگرهای لرزه‌ای تا به حال ابداع و از آنها در پل‌ها استفاده شده است:

- ✓ جداگرهای الاستومری<sup>۱</sup>
- ✓ جداگرهای لغزشی<sup>۲</sup>

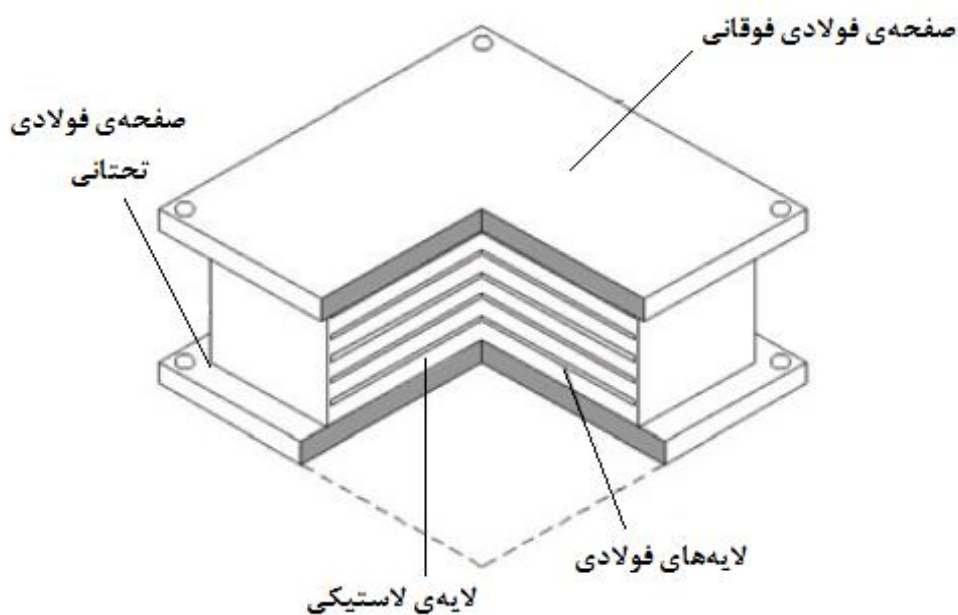
هریک از این دو گروه، دارای انواع مختلف است که موارد استفاده از آنها با توجه فناوری ساخت هر کشور و اهمیت پل‌ها و نیاز عملکردی آنها، متفاوتند. این سیستم‌های جداگر، عمدتاً دارای رفتار غیرخطی می‌باشند و رابطه نیرو - تغییر مکان تقریباً دوخطی از خود نشان می‌دهند؛ مانند جداگرهای لاستیکی-سربی، پاندول اصطکاکی و یا سیستم‌های دوگانه شامل سطوح لغزش با فنرهای بازگرداننده [۴]. با توجه به استفاده از تکیه‌گاه‌های نئوپرنی در پل‌های موجود و امکان ساخت جداگرهای الاستومری در کشور، استفاده از جداگرهای الاستومری، منطقی و عملی به نظر می‌رسد. این جداگرها خود در دو نوع موجودند که در ادامه به توضیح مختصری از هر یک پرداخته می‌شود.

<sup>1</sup> Elastomeric Bearings

<sup>2</sup> Sliding Bearings

### ۱-۳-۱ جداگرهای الاستومری چندلایه‌ای مسلح به ورق‌های فولادی (ELRB)<sup>۱</sup>

در این جداگرها، لاستیک طبیعی یا مصنوعی توسط ورق‌های فولادی مسلح می‌شود؛ به این صورت که صفحات فولادی و لاستیکی یک در میان روی هم قرار می‌گیرند. کاربرد اولیه‌ی این جداگرها در روسازه‌ی پل‌ها البته به صورت ساده و ابتدائی و برای تحمل تغییرشکل‌های ناشی از تغییرات درجه حرارت بوده است. این جداگرها طوری طراحی می‌شوند که وزن‌های بزرگ را تحمل می‌کنند؛ در حالی که در برابر جابجایی‌های افقی بزرگ مقاومت اندکی از خود نشان می‌دهند. چنین سیستمی عموماً دو صفحه‌ی انتهایی ضخیم فولادی و نیز تعدادی صفحات نازک فولادی داخلی دارد (شکل ۶-۱).



شکل ۶-۱: تکیه‌گاه الاستومریک چندلایه‌ای مسلح به ورق‌های فولادی [۵]

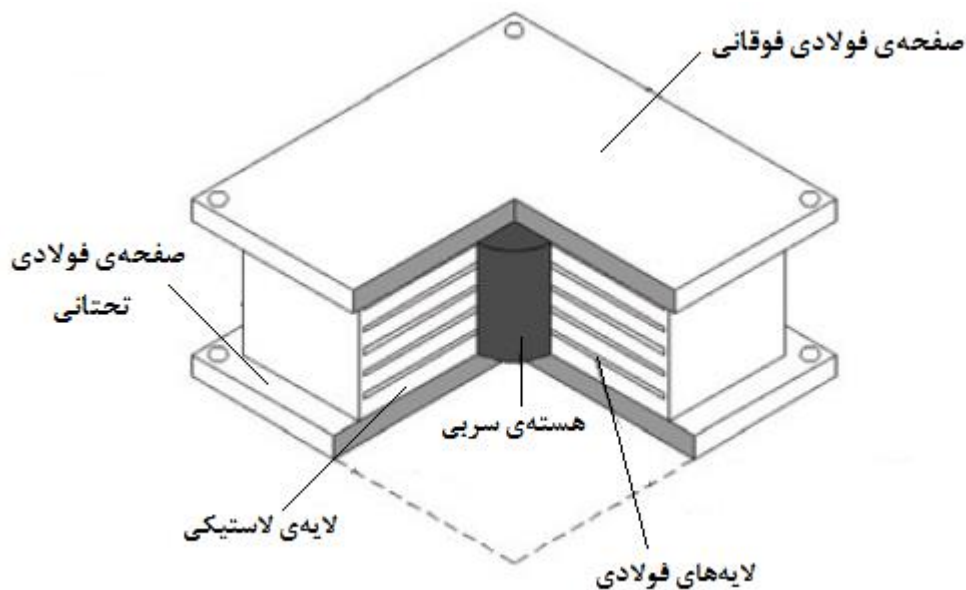
### ۲-۳-۱ جداگرهای لاستیکی - سربی (LRB)<sup>۲</sup>

جداگرهای لاستیکی - سربی، از نوع جداگرهای لاستیکی شبیه به جداگرهای الاستومری چند لایه هستند؛ ولی دارای یک یا چند هسته‌ی سربی می‌باشند که به منظور اضافه کردن میرایی به این سیستم جداگر در منافذی قرار گرفته‌اند (شکل ۷-۱). صفحات فولادی از انبساط حجمی لاستیک جلوگیری کرده و سختی قائم نشیمن را افزایش می‌دهند و هسته‌ی سربی را وادار می‌کنند که در برش تغییر شکل بدهد. رفتار نیرو - تغییر مکان این جداگر تحت بارهای بهره‌برداری بصورت ارتجاعی بوده، ولی در هنگام زلزله، هسته‌ی سربی بصورت پلاستیک تغییر شکل می‌دهد. بنابراین جداگرهای با هسته سربی قادرند به

<sup>1</sup> Elastomeric Laminated Rubber Bearing

<sup>2</sup> Lead-Rubber Bearing

طور همزمان بار قائم سازه را تحمل کرده، انعطاف‌پذیری افقی به همراه نیروی بازگرداننده را تأمین نمایند. قابلیت جذب انرژی توسط هسته سربی، جابجایی‌های افقی جداگر را کاهش می‌دهد. مشکلی که در سیستم‌های جداساز لرزه‌ای پل‌ها نسبت به ساختمان‌ها وجود دارد ضربه‌ای است که در جهت طولی توسط حرکت عرشه به پایه‌های کناری پل وارد می‌شود که بایستی با تمهیدات ویژه‌ای از ضربه ایجاد شده جلوگیری کرد [۴].



شکل ۱-۷: تکیه‌گاه الاستومریک لاستیکی با هسته‌ی سربی [۵]

## ۴-۱ میراگر ویسکوز متغیر

میراگر ویسکوز یکی از سیستم‌های جاذب انرژی می‌باشد که در مقایسه با اندازه‌ی فیزیکی خود از توانایی جذب انرژی بالایی برخوردار می‌باشد. بنابراین، این نوع میراگرها می‌توانند برای استهلاک انرژی ناشی از زلزله در سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. این میراگرها عموماً از یک سیلندر هیدرولیکی و یک پیستون از جنس فولاد ضد زنگ با کلاهک برنزی تشکیل شده‌اند. در کلاهک پیستون روزنه‌ای تعبیه شده است که وقتی پیستون حرکت داده می‌شود مایع با فشار از درون روزنه عبور داده می‌شود و منجر به اتلاف انرژی به صورت گرما می‌گردد. ساختار کلی این میراگرها در شکل ۱-۸ قابل ملاحظه است. وقتی پیستون طبق تحریکات خارجی با سرعت مشخصی حرکت می‌کند سیال داخل سیلندر در مقابل این حرکت مقاومت