Archive of SID

مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۴۳-۵۴

Original Article

کنترل نیمه‌فعال ارتعاش قائم پل‌های معلق در برابر زلزله با استفاده از میراگرهای مگنتورئولوژیک و منطق فازی

سعید پورزینلی* (دانشیار)
آرش بهار (استادیار)
سولماز پورزینلی (کارشناس ارشد)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

در این پژوهش، کاهش ارتعاش قائم پل‌های معلق با استفاده از میراگرهای نیمه فعال مگنتورئولوژیک و منطق فازی مورد مطالعه قرارگرفته است. برای این منظور، از یک میراگر مگنتورئولوژیک بزرگ‌مقیاس ۲۲۰۰ کیلونیوتنی استفاده و پل معلق وینسنت توماس در آمریکا به‌عنوان مثال عددی انتخاب شده است. یکی از مسائل چالش‌برانگیز در این پژوهش، نحوه‌ی نصب میراگرها در درجات آزادی دور از پایه‌های پل، جهت افزایش کارایی میراگرها بوده است؛ که برای حل آن، استفاده از خرپای صلب پیشنهاد شده است. در این پژوهش، ۲ مدل بهینه از نظر تعداد و موقعیت میراگرها ارائه و برای هر مدل نیز ۳ نوع کنترل‌گر فازی پیشنهاد شده و مطالعات نشان داده است که مدل ۲ با ۸ میراگر با استفاده از کنترل‌گر فازی نوع یک، که یک ورودی دارد، بهترین عملکرد را در کاهش پاسخ‌های پل دارد. در ضمن میراگرهای نصب‌شده قادر به کاهش پاسخ پل در جهت افقی هم هستند.

واژگان کلیدی: کنترل نیمه‌فعال، میراگر مگنتورئولوژیک، منطق فازی، پل‌های معلق، ارتعاش قائم.

pourzeynali@guilan.ac.ir
bahar@guilan.ac.ir
solmazpourzeynali@gmail.com

۱. مقدمه

پل‌های معلق از جمله سازه‌هایی هستند که به دلیل سختی و میرایی کم، همیشه در معرض خطر بلایای طبیعی مانند زلزله و باد قرار دارند. از سال‌های دور، تلاش بسیاری جهت حفاظت از این‌گونه سازه‌ها به عمل آمده است، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به افزایش سختی و شکل‌پذیری سازه‌ها اشاره کرد. ولی با گذشت زمان و با بررسی عملکرد سازه‌های مختلف در برابر زلزله، نواقص این روش‌ها بیشتر بر مهندسان آشکار شده است. بدین ترتیب روش‌های جدیدی از جمله افزایش میرایی سازه جهت مقابله با بلایای طبیعی پیشنهاد شده است. در این راستا، سیستم‌های کنترل غیرفعال و به دنبال آن سیستم‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال توسعه یافته‌اند. سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است، این سیستم‌ها قابلیت اطمینان سیستم‌های کنترل غیرفعال را با مزیت پارامترهای قابل تنظیم سیستم‌های کنترل فعال به‌صورت هم‌زمان دارند. میراگرهای مگنتورئولوژیک از جمله‌ی این سیستم‌ها هستند، که مزایایی از قبیل عدم نیاز به منبع بزرگ انرژی، ظرفیت بالای نیرو، قابلیت تنظیم نیرو، پاسخ سریع، و عملکرد ایمن در هنگام آسیب دارند.

ایده‌ی اولیه‌ی سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال در سال ۱۹۲۰،[۱] مطرح و در سال ۱۹۵۰[۲] ایده‌ی استفاده از سیستم‌های مذکور به شکل قوی‌تری عنوان شده است، اما به دلیل ضعف در فنّاوری‌های مربوط به علوم رایانه، گامی به جلو برداشته نشده است. به نظر می‌رسد که اولین کاربرد این سیستم کنترل نیمه‌فعال در زمینه‌ی مهندسی سازه در پژوهشی در سال ۱۹۸۳ برای سیستم‌های تحت بارگذاری محیطی مطرح شده است.[۳] میراگرهای مگنتورئولوژیک، با توجه به عملکرد بسیار مطلوب، از اوایل سال ۲۰۰۰ میلادی به‌صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفته و بر روی سیستم تعلیق چندین نوع اتومبیل نصب شده‌اند.[۴] پژوهش‌ها و مطالعات اولیه بر روی مایعات مگنتورئولوژیک و تجهیزات مرتبط با آن‌ها، در پژوهشی در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰ در اداره‌ی ملی استاندارد آمریکا انجام شده است،[۵] که در آن بر روی ولتاژ کاری پایین، ایجاد نیروهای بسیار بزرگ و همچنین پاسخ سریع سیستم‌های مذکور تأکید بسیاری شده است. پس ازآن به مدت حدوداً ۴۰ سال، مطالعات و آزمایش‌ها بر روی مایعات مگنتورئولوژیک متوقف شده است.[۶]

مطالعات متعددی جهت ارائه‌ی مدل‌هایی برای تحلیل سیالات قابل کنترل درون میراگرهای مگنتورئولوژیک صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۲، ایده‌ی استفاده از مدل بینگهام برای توصیف رفتار میراگرهای مگنتورئولوژیک مطرح شده است.[۷] در تلاش برای تعیین مدل‌های دقیق‌تر برای میراگرهای مگنتورئولوژیک، برخی پژوهشگران

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۶/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۰/۲۸، پذیرش ۱۳۹۳/۱۱/۱۲.

www.SID.ir

Archive of SID

(۱۹۹۷) با مطالعه بر روی یک میراگر مگنتورئولوژیک کوچک‌مقیاس دریافته‌اند که مدل هیسترزیس بوک ـ ون قادر است ویژگی‌های میراگر مگنتورئولوژیک را به خوبی نشان دهد.[۸] همچنین پژوهشگران دیگری (۱۹۹۷) براساس مدل ساده‌ی بوک ـ ون، مدلی با دقت بسیار بالا نسبت به سایر مدل‌های موجود ارائه کرده و در آزمایش‌های مختلف با ایجاد تغییرمکان‌هایی با شکل‌های مختلف سینوسی، پله‌یی، و تصادفی در یک میراگر مگنتورئولوژیک و بررسی نتایج تجربی حاصله نشان داده‌اند که مدل ارائه‌شده کمترین خطا را در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد.[۶] هم‌زمان با تعیین نتایج غیررسمی اولیه از مدل پیشنهادی اسپنسر و همکاران،[۸] با توجه به توانمندی بالای مدل هیسترزیس بوک ـ ون در توصیف رفتار واقعی میراگر مگنتورئولوژیک، در مطالعه‌ی دیگری (۱۹۹۶)،[۹] یک الگوریتم کنترل نیمه‌فعال موسوم به الگوریتم بهینه‌ی حذفی[۱] برای کاهش ارتعاشات لرزه‌یی سازه‌ها به‌وسیله‌ی این میراگرها ارائه شده است.

در ادامه‌ی مطالعات برای ارائه‌ی الگوریتم‌های مؤثرکنترل نیمه‌فعال، در پژوهشی در سال ۲۰۰۰،[۱۰] دو الگوریتم نیمه‌فعال براساس کنترل پاسخ تغییرمکان سازه ارائه و عملکرد آن‌ها با الگوریتم کنترلی پیشنهادی دایک و همکارانش،[۹] مقایسه و نشان داده شده است که در یک سازه‌ی مشخص برای هر یک از الگوریتم‌های کنترل نیمه‌فعال، مقادیر بهینه‌یی از تنش تسلیم وگرانروی نیوتنی سیال وجود دارد که با تنظیم آن‌ها می‌توان به بیشترین درصد کاهش ارتعاشات لرزه‌یی دست یافت. نتایج نشان داده است که الگوریتم کنترل نیمه‌فعال براساس کنترل تغییرمکان، که اثر متقابل سازه و میراگر را نیز به‌حساب می‌آورد، بهترین عملکرد را در میان ۳ الگوریتم مقایسه‌شده از خود نشان می‌دهد، و همچنین کیفیت عملکرد الگوریتم بهینه‌ی حذفی تا حد زیادی به محتوای بسامدی زلزله وابسته است. در پژوهش مذکور از مدل بینگهام برای میراگرهای مگنتورئولوژیک استفاده شده است، که دقت کمتری نسبت به مدل‌های جدیدتر دارد.

با مشاهده‌ی عملکرد فوق‌العاده‌مناسب سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال توسط میراگرهای مگنتورئولوژیک، مطالعات به سمت بررسی عملکرد این تجهیزات در سازه‌هایی به شکل واقعی‌تر پیش رفته است. همچنین درپژوهشی در سال ۲۰۰۱،[۱۱] آزمایش‌هایی برای ارزیابی الگوریتم‌های کنترل نیمه‌فعال در سازه‌هایی با شکل واقعی و با چندین میراگر مگنتورئولوژیک، بر روی یک سازه‌ی ۶ طبقه با مقیاس کوچک در آزمایشگاه مهندسی زلزله‌ی دانشگاه واشنگتن انجام شده است، که در آن دو الگوریتم کنترل نیمه‌فعال لیاپانوف[۲] و بهینه‌ی حذفی مورد استفاده قرارگرفته است. از آنجایی که میراگر مگنتورئولوژیک خاصیت غیرخطی دارد و سطوح مختلفی از کارایی را در دامنه‌های ارتعاشی مختلف از خود نشان می‌دهد، سازه تحت اثر ۳ مقیاس متفاوت از زلزله‌ی ال‌سنترو قرارگرفته است. نتایج به‌دست‌آمده برای دو حالت کنترل غیرفعال با ولتاژ صفر و ولتاژ بیشینه و همچنین دو حالت کنترل نیمه‌فعال با یکدیگر مقایسه و نشان داده شده است که در تمامی سطوح زلزله‌ی ال‌سنترو، کنترل غیرفعال با ولتاژ بیشینه در مجموع عملکرد مناسب‌تری از کنترل غیرفعال با ولتاژ صفر از خود نشان می‌دهد؛ اما، در مورد زلزله با دامنه‌ی ارتعاشی پایین، شتاب سازه را به طور قابل ملاحظه‌یی افزایش می‌دهد. همچنین، کنترل نیمه‌فعال از طریق الگوریتم لیاپانوف عملکرد مؤثرتری از خود نشان داده است. درکاهش پاسخ شتاب بیشینه‌ی سازه، الگوریتم کنترلی بهینه‌ی حذفی در دو مقیاس کوچک و متوسط از زلزله‌ی قرارگرفته روی سازه، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم لیاپانوف داشته است، اما در مقیاس بزرگ از زلزله‌ی مذکور، توانمندی الگوریتم نیمه‌فعال لیاپانوف در کاهش پاسخ‌های سازه بیشتر بوده است.

برخی پژوهشگران نیز در سال ۲۰۰۳،[۱۲] یک پل‌کابلی به نام بیل امرسون[۳] با طول ۶۳۳ متر، که از رودخانه‌ی می‌سی‌سی‌پی عبور می‌کند، را به‌عنوان پل مرجع انتخاب کرده‌اند تا پژوهشگران مختلف بتوانند عملکرد سیستم‌های کنترلی متفاوتی را بر روی آن مورد مطالعه قرار دهند و نتایج را با یکدیگر مقایسه کنند. از جمله سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال که بر روی این پل مرجع مورد بررسی قرارگرفته است، می‌توان به میراگرهای مگنتورئولوژیک، میراگر با سختی نیمه‌فعال بازنشانی،[۴] میراگر با سختی نیمه‌فعال سویچینگ،[۵] و میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال،[۶] اشاره کرد.[۱۳] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۳،[۱۴] عملکرد میراگر مگنتورئولوژیک با الگوریتم کنترل مود لغزشی،[۷] بر روی پل مذکور مورد مطالعه قرارگرفته و نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش مذکور حاکی از مناسب‌بودن عملکرد میراگر مگنتورئولوژیک با الگوریتم کنترل مود لغزشی بوده است. در همان سال در پژوهش دیگری،[۱۵] عملکرد میراگرهای مگنتورئولوژیک با استفاده از الگوریتم کنترلی بهینه‌ی حذفی بر روی پل مرجع مذکور بررسی شده و مطالعه‌ی جامعی بر روی انواع مدل‌های دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیک از جمله: مدل بینگهام، مدل بوک ـ ون و مدل اصلاح‌شده‌ی بوک‌ـون صورت گرفته و نتایج حاکی از آن بوده است که عملکرد میراگر مگنتورئولوژیک با الگوریتم کنترلی بهینه‌ی حذفی به‌طورکلی همانند سیستم کنترل فعال است و همچنین عملکرد مدل‌های دینامیکی بوک ـ ون و اصلاح شده‌ی بوک ـ ون بهتر از مدل بینگهام بوده است. پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۰۷،[۱۶] عملکرد میراگرهای مگنتورئولوژیک را با الگوریتم کنترلی منطق فازی بر روی پل مرجع مذکور با هدف کاهش پاسخ‌ها در جهت طولی پل مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که این سیستم نه فقط عملکرد مؤثری درکاهش پاسخ لرزه‌یی سازه دارد، بلکه در زمینه‌ی عدم قطعیت سختی در پل نیز به‌صورت توانمند رفتار می‌کند. همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۳)،[۱۷] عملکرد ایزوله‌گر رَل ـ اِن ـ کِیج[۸] در راستای طولی پل مرجع ذکرشده مورد مطالعه قرار گرفت و نهایتاً این نتیجه به‌دست آمد که ایزوله‌گر مذکور می‌تواند به‌منزله‌ی یک ایزوله‌گر طولی ایزوتروپیک و قابل اطمینان در پل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در سال ۲۰۱۴،[۱۸] نیز مطالعه‌یی بر روی یک پل ترکه‌یی که به‌عنوان بنچ‌مارک[۹] توسط انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE) برای مطالعه‌ی سیستم‌های کنترل انتخاب شده بود، به‌منظور تعیین پاسخ‌های آن در جهت عرضی تحت اثر زلزله انجام شد و قیدهایی که در پیکربندی اولیه‌ی پل جهت جلوگیری از حرکت پل در جهت عرضی اعمال شده بودند، حذف شدند. راهبرد کنترل در پژوهش مذکور شامل کنترل غیرفعال و کنترل نیمه‌فعال نامتمرکز بود که در صفحه‌ی افقی کار می‌کرد و همچنین شامل سیستم‌های کنترلی بود که قبلاً برای بنچ‌مارک اولیه مورد مطالعه قرارگرفته بود. نتیجه‌ی مطالعات انجام‌شده آشکارا بیان‌گر عملکرد بسیار مطلوب سیستم‌های ذکرشده در جهت عرضی این پل بوده است.[۱۸]

علاوه بر مطالعاتی که جهت بررسی عملکرد میراگرها بر روی پاسخ‌های طولی در پل مرجع صورت گرفته است، مطالعات متعدد دیگری نیز بر روی سایر پل‌ها صورت گرفته است، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد:

در سال ۲۰۰۸ نیز،[۱۹] عملکرد میراگرهای مگنتورئولوژیک جهت کنترل پاسخ لرزه‌یی در پل‌های معلق از نوع خودمهاری مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیر مقادیر مختلف ولتاژ و تعداد میراگر بر روی کنترل پاسخ‌های طولی پل بررسی شد و این نتیجه به‌دست آمده است که درصد کاهش پاسخ‌های تغییرمکان پل با افزایش میزان جریان و تعدا میراگرها افزایش می‌یابد و بیشترین درصد کاهش پاسخ در شدت جریان ۰/۵ آمپر اتفاق می‌افتد و بعد از مقدار ذکرشده، با افزایش بیشتر شدت جریان تغییر قابل ملاحظه‌یی در درصد کاهش پاسخ تغییرمکان سازه مشاهده نمی‌شود و بیشترین جریان اعمال‌شده به میراگر مذکور ۲ آمپر بوده است. برخی پژوهشگران نیز در پژوهشی در سال ۲۰۱۱،[۲۰] مدل جدیدی از میراگر مگنتورئولوژیک جهت

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش پاسخ لرزه‌یی پل‌های معلق را پیشنهاد داده‌اند و به‌صورت تجربی به مطالعه‌ی آن پرداخته‌اند. تا قبل از آن زمان، اساس مطالعات تجربی نحوه‌ی عملکرد آن‌ها در ساختمان‌ها بود، نه پل‌ها. آنها چندین حالت را مورد بررسی قرار داده‌اند، که ۶ حالت از حالت‌های مذکور مربوط به جریان‌های مختلف و دوتا از آن‌ها مربوط به دو الگوریتم کنترلی بَنگ ـ بَنگ[10] بوده است. در مطالعه‌ی مذکور، پل پینگ ـ شِنگ[11] به‌عنوان مثال عددی انتخاب و به‌منظور کنترل پاسخ‌ها در جهت طولی پل، میراگرهای مذکور به‌صورت افقی بین عرشه و برج‌پل نصب شده و نتایج حاکی از آن بوده است که هر چند در حالت استفاده از الگوریتم کنترلی، از انرژی کمتری جهت تولید نیرو استفاده می‌شود؛ اما توانایی میراگر مورد مطالعه در کاهش پاسخ تغییرمکان در حالت کنترل غیرفعال بیشتر است.

از بحث عنوان شده در مقدمه‌ی این پژوهش مشاهده می‌شود که تاکنون پژوهشی در مورد کاهش پاسخ‌های قائم پل‌های کابلی توسط سیستم‌های کنترلی در برابر نیروهای قائم زلزله صورت نگرفته و در مراجع مختلف گزارشی در این مورد یافت نشده است. لذا، در این پژوهش، کنترل تغییرمکان‌های قائم پل‌های معلق تحت اثر زلزله‌های مختلف و با استفاده از سیستم کنترلی نیمه‌فعال و میراگرهای مگنتورئولوژیک انجام شده است. برای این منظور، از منطق فازی برای تعیین ولتاژ ورودی میراگرهای مگنتورئولوژیک استفاده و رفتار غیرخطی میراگر نیز توسط مدل بوک ـ ون بیان شده است. یکی از مشکلات اساسی پیش‌آمده در این پژوهش این است که چگونه می‌توان یک میراگر مگنتورئولوژیک را در یک نقطه‌ی دور از پایه‌های پل، در زیر عرشه‌ی پل نصب کرد، به‌طوری که قادر باشد در جهت قائم عمل کند و ارتعاش قائم پل را در برابر زلزله کاهش دهد؟ برای این منظور، روش استفاده از خرپای صلب پیشنهاد شده است. همچنین در این پژوهش، پل وینسنت توماس واقع در لوس‌آنجلس آمریکا به‌عنوان مثال عددی انتخاب شده و پاسخ‌های آن تحت تأثیر ۱۵ شتاب‌نگاشت از زلزله‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. تعداد و موقعیت نصب میراگرهای مگنتورئولوژیک در طول پل نیز بهینه‌یابی شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد مناسب سیستم کنترلی نیمه‌فعال پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های قائم پل است.

۲. معادلات حرکت پل تحت اثر شتاب قائم زلزله

معادلات حرکت پل، روابط ریاضی حاکم بر تغییرمکان دینامیکی سازه پل هستند. با حل معادلات مذکور می‌توان تاریخچه‌ی زمانی پاسخ سازه‌ی موردنظر را به‌دست آورد. اساسی‌ترین پاسخ سازه در یک تحلیل دینامیکی، تغییرمکان آن است. معادلات دینامیکی حرکت یک سیستم چند درجه آزادی تحت اثر نیروی زلزله‌یی که در جهت قائم به آن اعمال می‌شود، به‌صورت رابطه‌ی ۱ نوشته می‌شود:[21]

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{r\}\,\ddot{u}_g(t) \qquad (۱)$$

که در آن، $[M]$، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی، و سختی سازه؛ بردارهای $\{u(t)\}$، $\{\dot{u}(t)\}$ و $\{\ddot{u}(t)\}$ به‌ترتیب بردارهای تغییرمکان، سرعت، و شتاب سازه؛ $\ddot{u}_g(t)$ شتاب قائم حرکت زمین؛ و بردار $\{r\}$ بردار تأثیر مربوط به شتاب قائم زلزله است که در آن اعضاء نظیر درجات آزادی در جهت حرکت زلزله ۱ و مابقی صفر هستند. تعیین معادله‌ی حرکت دینامیکی پل‌های معلق، فرایندی بسیار پیچیده بوده و در اینجا سعی شده است فقط مختصری از آن ارائه شود و ارائه‌ی جزئیات آن از حوصله‌ی این نوشتار خارج است.[22و23] در تحلیل دینامیکی پل‌های معلق، از جمله در این پژوهش، این فرضیات ساده‌کننده در نظر گرفته شده است:

۱. همه‌ی تنش‌ها در محدوده‌ی قانون هوک هستند، یعنی هیچ‌گونه رفتار غیرخطی مصالح در نظر گرفته نشده است.

۲. کل بار مرده‌ی اولیه‌ی پل فقط توسط کابل اصلی حمل می‌شود و تحت بار مرده، هیچ‌گونه تنشی در عرشه‌ی پل ایجاد نمی‌گردد.

۳. کابل اصلی پل سطح مقطع یکنواخت دارد و شکل آن تحت اثر بار مرده به شکل سهمی است، به‌طوری که وزن کابل را می‌توان در امتداد طول دهانه‌ی پل (به جای طول کابل) به‌صورت یکنواخت فرض کرد.

۴. فرض شده است کابل‌های قائمی که عرشه‌ی پل را به کابل اصلی آویزان می‌کنند و آویز (یا هنگر) نامیده می‌شوند، قائم و بدون تغییرشکل هستند و بارهای آن‌ها به‌صورت یکنواخت فرض شده است، یعنی فاصله‌ی آن‌ها بسیار کم در نظر گرفته شده است.

۵. اتصال کابل‌های اصلی به بالای برج‌ها به‌صورت غلتکی در نظر گرفته شده است.

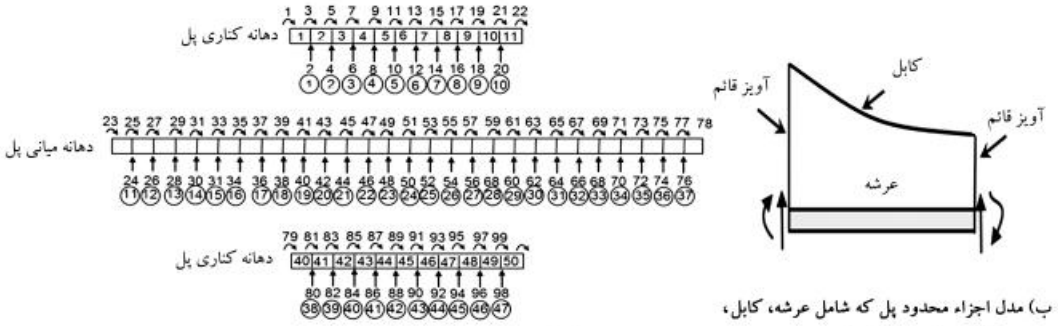
در این پژوهش، برای به‌دست‌آوردن معادله‌ی حرکت دینامیکی پل از روش انرژی استفاده شده است، بدین معنی که ابتدا کل انرژی پتانسیل و جنبشی پل تعیین شده و سپس از اصل هامیلتون (رابطه‌ی ۲) استفاده شده است:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta\,(T_E - V_E)\,dt = 0 \qquad (۲)$$

که در آن، T_E کل انرژی جنبشی پل؛ V_E کل انرژی پتانسیل پل؛ δ اپراتور تغییرات؛ و t پارامتر زمان است. با استفاده از اصل هامیلتون می‌توان ماتریس‌های سختی و جرم پل را به‌دست آورد و سپس معادله‌ی حرکت پل را مطابق معادله‌ی عمومی حرکت در دینامیک (رابطه‌ی ۱) نوشت. برای این منظور، ابتدا باید کل عرشه‌ی پل، شامل تیرها یا خرپاهای اصلی و کابل اصلی آن (شکل ۱)، که مربوط به پل معلق توماس است و در این پژوهش برای مطالعه‌ی عددی انتخاب شده است، به المان‌های مختلف تقسیم‌بندی شود. شکل ۱ب، المان محدود پل را نشان می‌دهد که شامل المان تیر، المان کابل اصلی، و دست‌کم دو آویز قائم (یا هنگر) است که در تحلیل دینامیکی پل در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌های مورد استفاده در هر کدام از دهانه‌های کناری این پل ۱۱ عدد و در دهانه‌ی میانی آن ۲۸ عدد و در کل پل ۵۰ عدد که توسط عبدالغفار بهینه‌یابی و تعیین شده است[22] (شکل ۱الف). در این روش، کل عرشه‌ی پل به‌صورت تیرهای دو سر مفصل ساده در نظر گرفته می‌شود که توسط تعدادی آویز معلق به کابل اصلی آویزان و در محل برج‌ها به‌صورت غلتکی تکیه داده شده‌اند. با تعیین مقدار انرژی پتانسیل و جنبشی در هر المان و به‌کارگیری اصل هامیلتون مطابق رابطه‌ی ۱، ماتریس‌های سختی و جرم هر المان به‌دست می‌آید، که پس از سرهم‌بندی آن‌ها برای کل المان‌ها، ماتریس‌های سختی و جرم کل پل تعیین می‌شود.[22و23] لازم به یادآوری است که این بخش از محاسبات به کمک برنامه‌یی انجام شده است که در تحقیقات قبلی[23] ارائه شده است. در محاسبات مربوطه، خود پایه‌ها مدل نشده‌اند.[22] همچنین، جهت کاهش حجم محاسبات، درجات آزادیی که جرم آنها صفر است، با استفاده از اصول فشرده‌سازی از سیستم حذف شده‌اند.[25] این تذکر لازم است که فشرده‌کردن درجات آزادی به معنای حذف آن‌ها از محاسبات دینامیکی نیست.[21]

www.SID.ir

Archive of SID



الف) تعداد درجات آزادی در مدل اجزاء محدود پل؛

ب) مدل اجزاء محدود پل که شامل عرشه، کابل، و دست کم دو آویز قائم است.

شکل ۱. المان‌بندی پل معلق توماس.

جدول ۱. جزئیات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این پژوهش.

شماره	نام زلزله	ایستگاه ثبت زلزله	تاریخ وقوع زلزله	بزرگی زلزله (Ms)	کمترین فاصله از گسل (km)	PGA (g)	مرجع زلزله
۱	بم ـ ایران	گلباف	۱۳۸۲/۱۰/۵	۵٫۸	۲۰	۰٫۱۳۹	NEIC
۲	منجیل ـ ایران	رودبار	۱۳۶۹/۰۳/۳۱	۷٫۴	۱۳	۰٫۲۱۷	NEIC
۳	اردکول ـ ایران	تربت حیدریه	۱۳۸۹/۰۵/۸	۵٫۸	-	۰٫۱۸۶	NEIC
۴	فیروز آباد ـ ایران	آبیر	۱۳۸۳/۰۳/۸	۶٫۳	-	۰٫۲۳۷	EMSC
۵	سرین ـ ایران	آستارا	۱۳۷۵/۱۲/۰۵	۶٫۱	۵۵	۰٫۱۹۱	NEIC
۶	قشم ـایران	بندرعباس	۱۳۸۴/۰۹/۶	۶٫۲	۵۶	۰٫۲۹۵	IIEES
۷	چی چی ـ تایوان	CHY۰۱۰	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	۷٫۶	۱۹٫۹۶	۰٫۱۲۵	CWB
۸	لوما پریتا	Hollister City Hall	۱۹۸۹/۱۰/۱۸	۷٫۱	-	۰٫۲۱۶	USGS
۹	ایمپریال ولی	Centro Array #۱	۱۹۷۹/۱۰/۱۵	۶٫۹	۱۵٫۵	۰٫۰۵۶	USGS
۱۰	کوچالی ـ ترکیه	Fatih	۱۹۹۹/۰۸/۱۷	۷٫۸	۶۴٫۵	۰٫۱۲۸	KOERI
۱۱	ارزینکن ـ ترکیه	Erzincan	۱۹۹۲/۰۳/۱۳	۶٫۹	۲	۰٫۲۴۸	-
۱۲	سنفرناندو	Hollywood Stor Lot	۱۹۷۱/۰۲/۰۹	۶٫۶	۲۱٫۲	۰٫۱۳۶	USGS
۱۳	طبس ـ ایران	Tabas	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	۷٫۷	-	۰٫۶۸۸	-
۱۴	نورتریج ـ ریناldی	Pacoima Dam	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	۶٫۷	۸	۱٫۲۲۹	CDMG
۱۵	کوبه	Takarazuka	۱۹۹۵/۰۱/۱۶	۶٫۹	۱٫۲	۰٫۴۳۳	CUE

برای نوشتن معادله‌ی حرکت دینامیکی سازه در حالت کنترل‌شده، اثر نیروی کنترلی به‌صورت یک نیروی خارجی در سمت راست معادله اعمال می‌شود. لذا معادله‌ی حرکت در حالت کنترل‌شده را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۳ نوشت:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=[D]\{f\} - [M]\{r\}\ddot{u}_g(t) \quad (۳)$$

که در آن، $[D]$ ماتریسی است که نیروهای کنترلی را به درجات آزادی مربوطه انتقال می‌دهد و $\{f\}$ نیز نیروهای مقاوم تولیدشده توسط میراگرهای مگنتورئولوژیک است. معادلات ارائه‌شده پس از انتقال به فضای حالت حل می‌شوند و پاسخ‌های کنترل‌شده و کنترل‌نشده‌ی سازه به‌دست می‌آیند. لازم به یادآوری است که در پژوهش حاضر، کلیه‌ی معادلات دینامیکی پل، چه بدون ابزار کنترل (پاسخ‌های کنترل‌نشده) و چه با ابزار کنترل (پاسخ‌های کنترل‌شده) با استفاده از نرم‌افزار متلب و جعبه ابزار سیمیولینک حل شده‌اند. شکل کلی معادله‌ی فضای حالت به‌صورت رابطه‌ی ۴ است:[۲۵و۲۶]

$$\{\dot{x}\}=[A]\{x\}+[B]\{z\}$$
$$\{y\}=[C]\{x\}+[D]\{z\} \quad (۴)$$

که در آن، $[A]$ ماتریس سیستم؛ $[B]$ ماتریس ورودی؛ $[C]$ ماتریس خروجی؛ و $[D]$ ماتریس تبدیل مستقیم نام دارند. $\{z\}$ بردار ورودی؛ $\{x\}$ بردار فضای حالت؛ و $\{y\}$ بردار خروجی هستند.[۲۵و۲۶]

در این پژوهش، رفتار پل موردنظر تحت اثر مؤلفه‌ی قائم ۱۵ شتاب‌نگاشت مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به شتاب‌نگاشت‌های مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

شتاب‌نگاشت‌های مذکور به گونه‌یی انتخاب شده‌اند که طیف وسیعی از محتوای بسامدی و بیشینه‌ی شتاب حرکت زمین را داشته باشند. همچنین در کنار زلزله‌های دور از گسل، تعدادی از زلزله‌های نزدیک به گسل‌نیز در نظر گرفته شده‌اند. از آنجایی

www.SID.ir

Archive of SID

که هدف مطالعه در این پژوهش، پاسخ سازه فقط در جهت قائم است، فقط از مؤلفه‌ی قائم شتاب‌نگاشت‌های ذکرشده استفاده شده است و نیز از آنجا که هدف از انجام پژوهش حاضر، مطالعه‌ی عملکرد میراگر نیمه‌فعال MR در کاهش پاسخ‌های قائم پل‌های معلق بوده است نه طراحی پل؛ لذا نیازی به مقیاس‌کردن شتاب‌نگاشت‌ها احساس نشده است، و کلیه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها در مقیاس واقعی خود به پل اعمال شده‌اند.

۳. کنترل نیمه فعال پل با استفاده از میراگر MR

یک ماده‌ی مگنتورئولوژیک، مایعی است که خصوصیات رئولوژیکی آن مانند تنش تسلیم و گرانروی به میدان مغناطیسی وابسته است. این نوع از میراگرها نسبت به اعمال میدان مغناطیسی، با تغییر در رفتار جریان سیال عکس‌العمل نشان می‌دهند و به دلایل: سادگی، محدوده‌ی عمل گسترده، و بی‌نیازی به منابع انرژی خارجی پرقدرت مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین بی‌نیازی به منابع بزرگ انرژی در میراگرهای مذکور سبب افزایش قابلیت اعتماد در آن‌ها شده است.

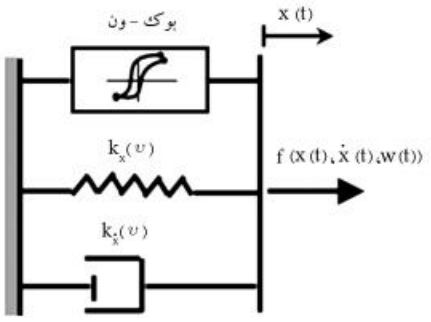
میراگرهای مگنتورئولوژیک در صورت نبود منبع انرژی به میراگر ویسکوز تبدیل می‌شوند. مدل‌های مکانیکی بسیاری جهت توصیف میراگر مگنتورئولوژیک پیشنهاد شده‌اند. از جمله‌ی آنها، مدل بوک ـ ون است که در این پژوهش برای مدل‌کردن رفتار هیسترزیس میراگر مگنتورئولوژیک مورد استفاده قرار گرفته است. نمای شماتیک این مدل در شکل ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش از مدل نرمالیزه‌شده‌ی میراگر مگنتورئولوژیک بزرگ‌مقیاس ۲۲۰۰ کیلونیوتنی استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شده است، در این پژوهش برای حل معادلات حرکت پل از نرم‌افزار متلب و جعبه ابزار سیمیولینک استفاده شده است. هنگام شبیه‌سازی مسئله در محیط سیمیولینک از بلوک مرجع مربوط به میراگر مگنتورئولوژیک استفاده شده است. این بلوک مقادیر تغییرمکان، سرعت، و ولتاژ را دریافت می‌کند و نیروی میراگر را به‌عنوان خروجی ارائه می‌دهد.[۲۷] نیروی میراگر در این سیستم با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود:

$$f(x(t),\dot{x}(t),w(t)) = k_x(v)x(t) + k_{\dot{x}}(v)\dot{x}(t) + k_w w(t) \qquad (۵)$$

$$\dot{w}(t) = \rho(v)\{\dot{x}(t) - \sigma(v)\,|\dot{x}(t)|\,|w(t)|^{\eta(v)-1}\,w(t) + (\sigma(v)-1)\dot{x}(t)\,|w(t)|^{\eta(v)} \qquad (۶)$$

که در آن‌ها، $f(x,\dot{x},w)$ نیروی تولیدشده توسط میراگر MR؛ و $x(t)$، $\dot{x}(t)$، و v به ترتیب تغییرمکان، سرعت، و ولتاژ هستند، که به‌عنوان ورودی‌های میراگر MR



شکل ۲. مدل مکانیکی میراگر مگنتورئولوژیک مورد استفاده در این پژوهش.

هستند. $w(t)$ یک متغیر فیزیکی نیست، که قابل محاسبه باشد و در نتیجه از رابطه‌ی ۶ برای به‌دست آوردن آن استفاده می‌شود. سایر متغیرهای موجود در روابط ۵ و ۶، از رابطه‌ی ۷ به‌دست می‌آیند:

$$K_x(v) = K_x \qquad (۷\text{ الف})$$

$$K_{\dot{x}} = K_{\dot{x}a} + K_{\dot{x}b}v \qquad (۷\text{ ب})$$

$$\eta(v) = \eta_a + \eta_b \exp(-۱۳v) \qquad (۷\text{ پ})$$

$$\rho(v) = \rho_a + \rho_b \exp(-۱۴v) \qquad (۷\text{ ت})$$

$$\sigma(v) = \sigma_a + \sigma_b \exp(-۱۴v) \qquad (۷\text{ ت})$$

$$K_w(v) = \begin{cases} k_{w_۱} + k_{w_۲}v^{۱/۱۵}, & v \le ۰/۳ \\ k_{w_۳} + k_{w_۴}\sin(\frac{\pi(v-۰/۳)}{۰/۸}) + k_{w_۵}\sin(\frac{۲\pi(v-۰/۳)}{۰/۸}), & ۰/۳ \le v \le ۰/۷ \\ k_{w_۶} + k_{w_۷}v + k_{w_۸}v^{۳} + k_{w_۹}v^{۵}, & ۰/۷ \le v \end{cases} \qquad (۷\text{ ج})$$

۴. کاربرد منطق فازی در تعیین مقدار ولتاژ

چنانچه ولتاژ ورودی به میراگر مگنتورئولوژیک متغیر باشد، عملکرد آن در کاهش پاسخ سازه، کنترل نیمه‌فعال نامیده می‌شود. در کنترل نیمه‌فعال، جریان الکتریکی به‌صورت کنترل‌شده و متغیر با زمان به میراگر اعمال می‌شود. تعیین میزان جریان الکتریکی اعمال‌شده به میراگر به عهده‌ی کنترل‌گر است. از این رو طراحی یک کنترل‌گر مناسب نقش به‌سزایی در کاهش پاسخ‌های سازه توسط میراگر مگنتورئولوژیک دارد. در این پژوهش، منطق فازی به‌عنوان کنترل‌گر سیستم انتخاب شده و عملکرد آن در سیستم مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

استنتاج فازی فرایندی است که طی آن عمل نگاشت از ورودی‌ها به خروجی‌ها با استفاده از منطق فازی ضابطه‌مند می‌شود. ۲ نوع سیستم استنتاج فازی قابل پیاده‌سازی است، که عبارت‌اند از ممدانی و سوگنو.[۲۸] در این پژوهش، روش بسیار رایج استنتاج فازی ممدانی استفاده شده است.

اولین مرحله در طراحی سیستم کنترل‌گر فازی، فازی‌ساز است. فازی‌ساز عبارت از تبدیل داده‌های عددی به داده‌های فازی توسط توابع عضویت است. مرحله‌ی بعدی، طراحی قوانین کنترل‌گر فازی است. این مرحله بر روی عملکرد کنترل‌گر فازی نقش به‌سزایی دارد. در واقع قوانین کنترل‌گر فازی، گروهی از قوانین «اگر ـ آنگاه» هستند، که برای برقراری ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی به‌کار می‌روند. در نهایت، خروجی که یک مقدار فازی است، توسط عملیات غیرفازی‌ساز، به یک داده‌ی گسسته‌ی غیرفازی تبدیل می‌شود. نحوه‌ی عملکرد کنترل‌گر منطق فازی برای سیستم کنترل نیمه‌فعال با میراگر مگنتورئولوژیک بدین صورت است که این کنترل‌گر در هر لحظه مقادیر پاسخ سازه را، توسط حس‌گرهایی که بر روی سازه نصب هستند، به‌صورت عددی دریافت و توسط توابع عضویت، این مقادیر را به داده‌های فازی تبدیل می‌کند. سپس توسط موتور استنتاج و با استفاده از جدول قوانین فازی، خروجی تعیین می‌شود. البته در پژوهش حاضر، پاسخ‌های سازه با استفاده از شبیه‌سازی تعیین شده‌اند. طراحی این کنترل‌گرهای فازی در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۵. مطالعه‌ی عددی

درپژوهش حاضر، پل معلق وینسنت توماس واقع درلوس‌آنجلس آمریکا به‌عنوان مثال عددی انتخاب شده است. این پل، پیشتر توسط پژوهشگران مختلف در نرم‌افزارهای اجزاء محدود مدل شده و مشخصات مربوط به جرم و سختی آن به‌دست آمده است (ماتریس‌های جرم و سختی در مراجع[۲۲و۲۳] موجود هستند). همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شده است، در محاسبه‌ی ماتریس‌های مذکور، کل عرشه‌ی پل به صورت تیرهای دو سر مفصل ساده در نظر گرفته شده است، که توسط تعدادی آویز معلق به کابل اصلی آویزان و در محل برج‌ها (که در واقع تکیه‌گاه‌های میانی هستند)، به‌صورت غلتکی تکیه داده شده‌اند. در محاسبات مربوط خود پایه‌ها مدل نشده‌اند.[۲۲]

نمای طولی پل معلق وینسنت توماس در شکل ۳الف و بسامدها و اشکال مودی شش مود اول پل مذکور نیز در شکل ۳ب ارائه شده است.[۲۳] پل ذکرشده ۳ دهانه دارد، که طول دهانه‌ی میانی آن ۴۶۰ متر و طول هر کدام از دهانه‌های کناری آن ۱۵۵ متر است. وزن عرشه و دو کابل اصلی به ترتیب $52438\ N/m$ و $12390\ N/m$ هستند. مساحت مقطع هر کدام از کابل‌ها $780\ cm^2$ و مقدار کشش اولیه ناشی از بارهای مرده در هر کابل $300\,38 \times 10^3\ N$ است. شکل ۱، نمایش‌گر مدل اجزاء محدود پل معلق وینسنت توماس است. همان‌طور که قبلاً نیز بحث شده است (مطابق شکل ۱الف)، دهانه‌های کناری پل به ۱۱ المان و دهانه‌ی میانی آن به ۲۸ المان تقسیم شده‌اند.[۲۲و۲۳] مدل مذکور ۴۹ درجه آزادی انتقالی در جهت قائم و ۵۳ درجه آزادی دورانی دارد. هر المان شامل: عرشه، کابل اصلی، و دست‌کم دو آویز معلق طبق شکل ۱ب است. برای نقاطی از عرشه که بر روی تکیه‌گاه قرار دارند، چون در جهت قائم حرکتی نخواهند داشت، درجه آزادی انتقالی در نظر گرفته نشده است. رفتار مصالح پل در محدوده‌ی کشسان و خطی فرض شده است.[۲۹] با داشتن ماتریس جرم و سختی پل،[۲۳] می‌توان ماتریس میرایی را نیز به روش رایله محاسبه کرد.

۱.۵. مدل‌های پیشنهادی برای استفاده از میراگر MR در پل معلق وینسنت توماس

از جمله مسائلی که در این پژوهش بسیار حائز اهمیت بوده و ذهن را بسیار به چالش وا داشته است، مسئله‌ی موقعیت نصب میراگرها در پل است. به‌عبارت دیگر، به دلیل طویل‌بودن دهانه‌ها، پیش‌بینی شده است که نصب میراگر فقط در نزدیکی پایه‌های پل و در محل درجات آزادی قبل و بعد از آن به تنهایی پاسخ‌گو نباشد و یا اینکه از نیروی میراگر استفاده‌ی بهینه نشود. در نتیجه پژوهشگران باید به‌دنبال چاره‌یی جهت نصب میراگر در فاصله‌هایی دورتر از پایه‌های پل و یا در نزدیکی وسط دهانه پل می‌بودند، که برای این منظور استفاده از خرپای صلب پیشنهاد شده است. بنابراین، برای نصب میراگر بر روی پل به دو روش می‌توان عمل کرد:

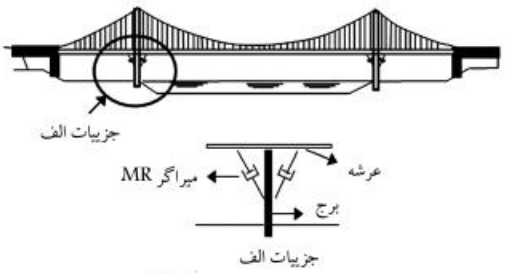
الف) روش اول: در این روش میراگر از یک طرف به پایه و از طرف دیگر به عرشه‌ی پل متصل می‌شود. لذا در این حالت میراگر فقط درکنار پایه‌ها قابل نصب است.

ب) روش دوم: در این روش یک خرپای صلب برای نصب میراگر پیشنهاد شده است، که با استفاده از آن می‌توان در هر نقطه‌یی از پل میراگر را نصب کرد. جزئیات این خرپا در بخش‌های بعدی بیشتر تشریح شده است.

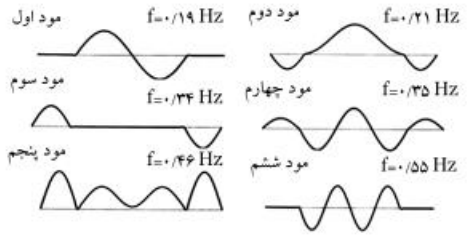
در این پژوهش مدل‌های بسیاری جهت دست‌یابی به یک مدل بهینه‌ی نصب میراگرها (چه از نظر تعداد و چه از نظر موقعیت نصب)، برای کاهش پاسخ تغییرمکان پل مورد بررسی و مطالعه قرارگرفته است. این نکته قابل ذکر است که تعداد پارامترهای مجهول در حالت کنترل نیمه‌فعال توسط منطق فازی بسیار بیشتر از حالت‌غیرفعال (حالتی که ولتاژ ورودی صفر و یا بیشینه است) است. از جمله‌ی این پارامترها می‌توان به تعداد ورودی‌های کنترل‌گر فازی، قواعد فازی، شکل توابع عضویت، تعداد و موقعیت میراگرها و... اشاره کرد. به همین دلیل، جهت مطالعه‌ی تعداد و موقعیت میراگرها در پل و انتخاب مدل بهینه، ابتدا حالت غیرفعال میراگر مطالعه شده است (که نتایج مربوط در اینجا ارائه نشده است)، تا بتوان با استفاده از نتایج آن، مدل‌های بهینه برای تعداد میراگرها و نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها را تعیین کرد، و سپس مدل‌های بهینه‌ی مذکور (مدل‌های ۱، ۲-۱ و ۲-۲) برای حالت کنترل نیمه‌فعال مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، که نتایج آن در ادامه ارائه شده است.[۲۵] در حالت کنترل نیمه‌فعال سعی شده است تا کنترل‌گر فازی از جهت تعداد و نوع ورودی‌ها، قوانین فازی، و شکل توابع عضویت به روش سعی و خطا بهینه شود.

۱.۱.۵. مدل ۱. نصب میراگر MR در محل پایه‌های پل

در این مدل فقط از روش (الف) برای نصب میراگر استفاده شده است (شکل ۳)، یعنی یک انتهای میراگر به پایه‌ی پل و انتهای دیگر آن به یکی از درجات آزادی عرشه‌ی پل در نزدیکی پایه وصل شده است. در این مدل مجهولات فقط تعداد میراگر و قدرت میراگر هستند. در اینجا لازم به ذکر است که گاهی اوقات زیادبودن نیروی میراگر بر کاهش پاسخ سازه نتیجه‌ی عکس‌می‌دهد. به‌عبارت دیگر، همیشه نیروی زیاد میراگر سبب افزایش درصد کاهش پاسخ نمی‌شود. به همین دلیل، در این مدل و سایر مدل‌ها، از میراگر ۱۱۰۰ کیلونیوتنی نیز به همراه میراگر ۲۲۰۰ کیلونیوتنی استفاده شده است. به‌طور کلی در مرحله‌ی مطالعات شبیه‌سازی می‌توان نیروی میراگر را مقیاس کرد، ولی درکاربردهای عملی باید میراگری ساخت که قادر باشد آن نیرو را تولید کند.[۳۰] میراگرها در مدل ۱، بین پایه‌های پل و درجات آزادی شماره‌های ۱۰، ۱۱، ۳۷ و ۳۸ عرشه قرار دارند (برای شماره‌ی درجات آزادی به شکل ۱ مراجعه شود). بنابراین، در مدل مذکور فقط از ۴ میراگر استفاده شده است، که زاویه‌ی آن‌ها با پایه‌های پل ۴۵ درجه است، که به روش سعی و خطا بهینه شده



الف) نمای طولی پل معلق توماس؛[۲۲]



ب) شش مود اول پل.[۲۳]

شکل ۳. برخی مشخصات پل معلق وینسنت توماس.

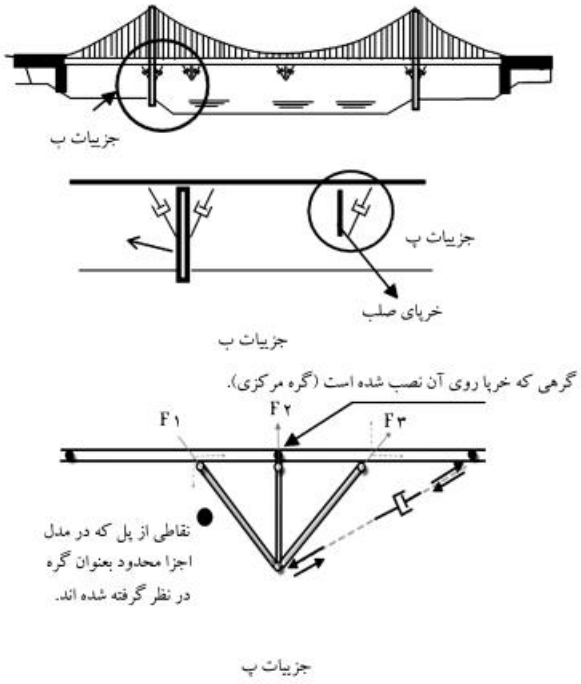
www.SID.ir

Archive of SID

است. در درجات آزادی ۱۰ و ۳۸ از میراگر ۲۲۰۰ کیلونیوتنی و در درجات آزادی ۱۱ و ۳۷ از میراگر مقیاس‌شده‌ی ۱۱۰۰ کیلونیوتنی استفاده شده است.

۲.۱.۵. مدل ۲. استفاده از یک خرپای صلب جهت نصب میراگر MR در هر درجه آزادی دلخواه در طول پل

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شده است، از جمله مسائل چالش‌برانگیز در این پژوهش، ارائه‌ی راهکاری جهت نصب میراگر در درجات آزادی پل دور از پایه‌های آن است. در این پژوهش، جهت رفع مشکل عنوان‌شده، استفاده از خرپای صلب (روش الف در بخش ۱.۵.) پیشنهاد شده است. روش مذکور به این صورت است که خرپایی صلب در زیر عرشه‌ی پل اجرا می‌شود، سپس میراگر مگنتورئولوژیک را می‌توان بین خرپای صلب و درجات آزادی عرشه‌ی پل در قبل یا بعد از آن نصب کرد (نمای کلی این مدل در شکل ۴ ارائه شده است). مطابق شکل مذکور، نیروی تولیدشده توسط میراگر بین اعضاء مختلف خرپا توزیع شده و به المان عرشه انتقال یافته است. نیروها در داخل اعضاء خرپا به‌صورت نیروی محوری هستند. در محل اتصال اعضاء خرپا به المان‌های پل، این نیروها را می‌توان به دو مؤلفه‌ی افقی و قائم تقسیم کرد. از آنجایی که مؤلفه‌ی افقی تقریباً هم‌تراز عرشه‌ی پل خواهد بود، می‌تواند در کاهش ارتعاشات طولی پل مؤثر واقع شود. مؤلفه‌ی قائم مدنظر در این پژوهش، نیروی تولیدشده توسط میراگر بوده است، که با کمی تقریب فرض شده است در درجه آزادی مرکزی خرپا وارد می‌شود. به‌عبارت دیگر، مؤلفه‌های قائم F_1 و F_3 در طول یک المان از مدل اجزاء محدود اثر می‌کنند، اما از آنجایی که محل اثر این نیروها در مدل اجزاء محدود به‌عنوان یک گره در نظر گرفته نشده است، لذا به‌طور تقریبی فرض شده است که مجموع مؤلفه‌های قائم نیروهای F_1، F_2 و F_3 در یک گره اعمال شود، و این گره همان گره مرکزی خرپاست (محل تأثیر نیروی F_2 در جزئیات پ در شکل ۴ قابل مشاهده است). لازم به یادآوری است که در محل نصب میراگر، اعضاء خرپا باید به‌صورت صلب اجرا شوند تا بتوان از تغییرشکل محوری آن صرف‌نظر کرد. بدیهی است که این خرپای صلب برای نیروهایی که از طرف میراگر به



شکل ۴. نحوه‌ی قرارگیری میراگرها در مدل ۲ (با استفاده از خرپای صلب).

آن وارد می‌شود، طوری طراحی می‌شود که در پل‌های نوساز طراحی و اجرای آن به راحتی صورت گیرد. ولی در امر بهسازی پل‌های موجود، باید برای نصب و اتصال خرپای صلب به زیر عرشه‌ی پل تمهیدات لازم اندیشیده شود، که از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به اتصال خرپای طراحی‌شده با استفاده از کاشت انکربولت به زیر عرشه اشاره کرد. در مدل ۲، میراگرها هم در کنار پایه‌های پل و هم دور از پایه‌ها و با استفاده از خرپای صلب نصب می‌شوند. برای مدل مذکور با استفاده از روش سعی و خطا آرایش‌های متعددی از نحوه‌ی قرارگیری میراگرها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. درنهایت، پس از بررسی حالت‌های متعدد برای مدل مذکور، ۲ آرایش بهینه برای تعداد و موقعیت میراگرها پیشنهاد شده است، که یکی از آن‌ها ۶ میراگر و دیگری ۸ میراگر دارد. بسته به سطح توقعی که از عملکرد پل در برابر زلزله وجود دارد و همچنین با درنظرگرفتن جنبه‌های اقتصادی آن، می‌توان از بین این دو حالت، یکی را انتخاب کرد. جزئیات بیشتر در مورد موقعیت قرارگیری میراگرها در دو حالت عنوان‌شده در شکل ۵ ارائه شده است. در هر کدام از دو مدل مذکور، هر شماره بیانگر شماره‌ی درجه آزادی است که میراگر بر روی آن نصب می‌شود. در مدلی که ۶ میراگر دارد، میراگرهایی که در دهانه‌ی وسطی قرار دارند میراگرهای مقیاس‌شده یعنی میراگر ۱۱۰۰ کیلونیوتنی و میراگرهایی که در دهانه‌های کناری قرار دارند، میراگر ۲۲۰۰ کیلونیوتنی هستند. در مدلی هم که ۸ میراگر دارد، میراگرهایی که به درجات آزادی ۱۰ و ۳۸ متصل هستند، از نوع میراگر ۲۲۰۰ کیلونیوتنی، و میراگرهایی که به سایر درجات آزادی متصل هستند، از نوع میراگر ۱۱۰۰ کیلونیوتنی هستند.

از این به بعد دو مدل عنوان‌شده به ترتیب به‌عنوان مدل‌های ۲-۱ و ۲-۲ نامیده می‌شوند، که اولی ۶ میراگر و دومی ۸ میراگر دارد. در اینجا توجه به این نکته ضروری است که به دلیل پیچیدگی‌های مدل ۲ نسبت به مدل ۱ (از جهت تعداد و موقعیت میراگرها و همچنین نیاز به نصب خرپا در پل در مدل ۲)، مدل ۲ فقط در صورتی به‌عنوان مدل بهینه انتخاب می‌شود که نسبت به مدل ۱، درصد کاهش پاسخ بیشتری داشته باشد. لذا هنگام بررسی حالت‌های مختلف مدل ۲، علاوه بر مقایسه‌ی پاسخ‌های به‌دست‌آمده از حالت‌های مختلف آن با حالت کنترل‌نشده، میزان درصد کاهش پاسخ نسبت به مدل ۱ نیز باید مد نظر قرار گیرد.

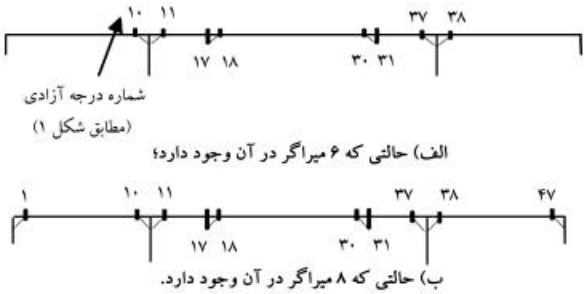
۲.۵. کنترل‌گرهای فازی مورد استفاده در پژوهش حاضر

کنترل‌گرهای فازی که در این پژوهش مورد استفاده قرارگرفته‌اند، از جهت نوع ورودی به ۳ دسته تقسیم شده‌اند:

۱. کنترل‌گر نوع یک: کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی (حاصل‌ضرب تغییرمکان در سرعت)؛

۲. کنترل‌گر نوع دو: کنترل‌گر فازی با ۲ ورودی (تغییرمکان و سرعت)؛

۳. کنترل‌گر نوع سه: کنترل‌گر فازی با ۳ ورودی (تغییرمکان، سرعت، و شتاب).



شکل ۵. موقعیت قرارگیری میراگرها در مدل ۲.

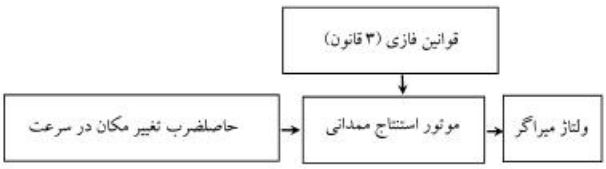
www.SID.ir

Archive of SID

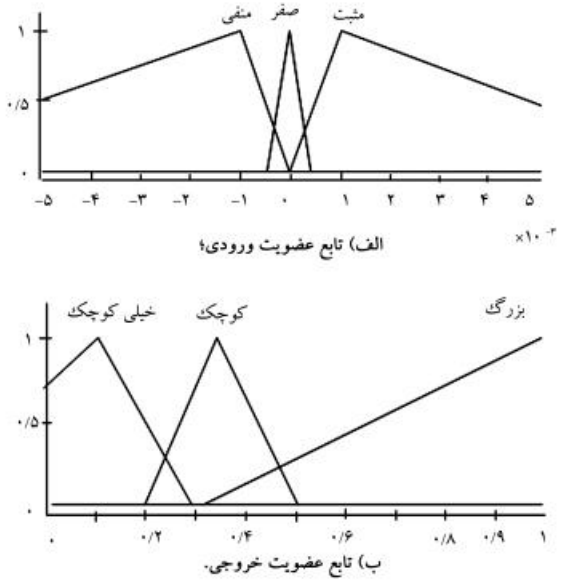
برای تعیین جداول قوانین فازی در هر یک از ۳ کنترل‌گر مذکور از منطق خاصی استفاده شده است، که جزئیات بیشتر در این‌باره در ادامه ارائه شده است.

۱.۲.۵. کنترل‌گر فازی با یک ورودی (حاصل‌ضرب تغییرمکان در سرعت)

در این حالت کنترل‌گر فازی، یک ورودی (حاصل‌ضرب تغییرمکان در سرعت) و یک خروجی (ولتاژ) دارد (معماری کلی این کنترل‌گر در شکل ۶ ارائه شده است). به‌عبارت دیگر، حس‌گرهای نصب‌شده بر روی عرشه‌ی پل در محل نصب میراگر، در هر لحظه، تغییرمکان و سرعت را ثبت می‌کنند و حاصل‌ضرب این مقادیر به‌عنوان ورودی به کنترل‌گر فازی داده می‌شود (البته در پژوهش حاضر، این مقادیر از طریق حل معادله‌ی دیفرانسیل پل به‌دست آمده‌اند). این مقادیر ورودی از طریق توابع عضویتی که برای آن تعریف شده‌اند، به داده‌های فازی تبدیل خواهند شد. جهت ساده‌سازی محاسبات، توابع عضویت ورودی و خروجی به‌صورت مثلثی‌شکل انتخاب شده‌اند (شکل ۷). بعد از آنکه مقادیر ورودی از طریق توابع عضویت به داده‌های فازی تبدیل شدند، وارد موتور استنتاج می‌شوند. در این مرحله، با استفاده از قوانین فازی، در رابطه با خروجی ولتاژ تصمیم‌گیری خواهد شد. در کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی، ۳ قانون فازی انتخاب شده است (جدول ۲). ایده‌ی استفاده از کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی و همچنین منطقی که در نوشتن قوانین آن استفاده شده است، بدین‌صورت است: هنگامی که درجه آزادی موردنظر در حالت تعادل (مرکز) و یا در دورترین نقطه نسبت به حالت تعادل (انتها) قرار دارد، کمترین ولتاژ به میراگر اعمال می‌شود.



شکل ۶. معماری کلی کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی.



الف) تابع عضویت ورودی؛

ب) تابع عضویت خروجی.

شکل ۷. توابع عضویت ورودی و خروجی در کنترل‌گر نوع یک.

جدول ۲. پایگاه قواعد فازی در کنترل‌گر فازی نوع دو با ۱ ورودی.

حاصل‌ضرب تغییرمکان در سرعت	منفی	صفر	مثبت
ولتاژ	بزرگ	خیلی کوچک	کوچک

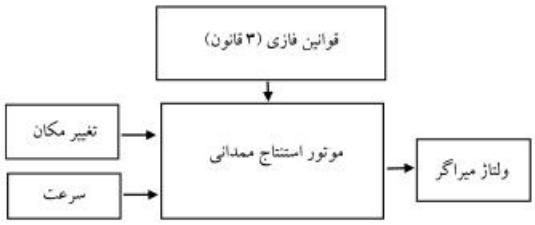
زیرا پیش‌بینی می‌شود که اعمال نیرو هنگامی که جسم در مرکز قرار دارد (یعنی تغییرمکان صفر است)، می‌تواند سبب خارج‌شدن جسم از حالت تعادل شود و هنگامی که جسم در یکی از دو انتها قرار دارد (سرعت صفر است)، جسم بالقوه تمایل به بازگشت به حالت تعادل دارد، که نیازی به اعمال نیرو به سازه نیست.[۳۱] ولتاژ اعمال‌شده در زمانی که جسم در میانه‌ی مسیر قرار دارد، افزایش می‌یابد.

در اینجا لازم است که به ۲ مسئله توجه شود: ۱. بازه‌ی در نظر گرفته‌شده برای توابع عضویت، ۲. میزان هم‌پوشانی توابع عضویت. در ارتباط با بازه‌ی توابع عضویت ورودی، چون نحوه‌ی قرارگیری میراگرها به گونه‌یی است که مقادیر تغییرمکان و سرعت در دو سر میراگر کم هستند، مقداری که برای بازه‌ی حاصل‌ضرب تغییرمکان در سرعت انتخاب می‌شود، تأثیر چندانی در عملکرد کنترل‌گر نخواهد داشت، ولی در هر صورت مقدار در نظر گرفته‌شده، بزرگ‌ترین مقداری است که از ۱۵ شتاب‌نگاشت اعمال‌شده به‌دست آمده است. میزان هم‌پوشانی نمودارها نیز به روش سعی و خطا تعیین شده است، تا بهترین نتیجه در کاهش پاسخ‌ها به‌دست آید. قوانین فازی این کنترل‌گر، در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

۲.۲.۵. کنترل‌گر فازی نوع دو با ۲ ورودی (تغییرمکان و سرعت)

در این حالت کنترل‌گر فازی ذکرشده، ۲ ورودی (تغییرمکان و سرعت) و ۱ خروجی (ولتاژ) دارد، که معماری کلی آن در شکل ۸ ارائه شده و برای آن نیز همانند کنترل‌گر قبلی، پیرو توضیحاتی که پیش‌تر داده شده است، توابع مثلثی با ۵۰٪ هم‌پوشانی انتخاب شده‌اند (شکل ۹). در شکل ذکرشده، «NM» و «NL» به ترتیب بیانگر اعداد منفی متوسط و بزرگ؛ «PM» و «PS» به ترتیب بیانگر اعداد مثبت متوسط و بزرگ هستند. همچنین «S»، «M» و «L» بیانگر اعداد کوچک، متوسط، و بزرگ، و «ZE» بیانگر صفر هستند.

برای کنترل‌گر فازی با ۲ ورودی، جداول قوانین فازی بسیاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نهایتاً بهینه‌ترین حالت در این نوشتار (جدول ۳) ارائه شده است، که در آن از ۱۲ قانون در کنترل‌گر فازی استفاده و جدول قوانین فازی براساس نمودار نیرو ـ سرعت در حالت کنترل غیرفعال طراحی شده است. نمای کلی نمودار نیرو ـ سرعت



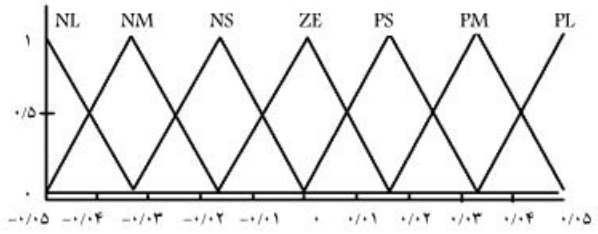
شکل ۸. معماری کلی کنترل‌گر فازی نوع دو با ۲ ورودی.

جدول ۳. پایگاه قواعد فازی در کنترل‌گر فازی نوع دو با ۲ ورودی.

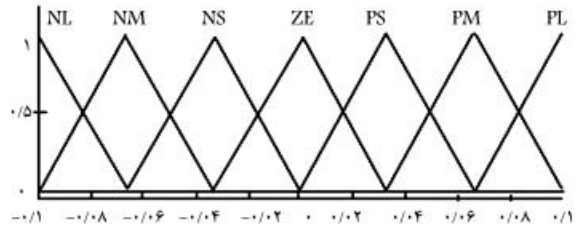
تغییرمکان	سرعت						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	-	-	-	ZE	-	-	-
NM	-	-	S	-	S	-	-
NS	-	M	-	-	-	M	-
ZE	L	-	-	-	-	-	L
PS	-	M	-	-	-	M	-
PM	-	-	S	-	S	-	-
PL	-	-	-	ZE	-	-	-

www.SID.ir

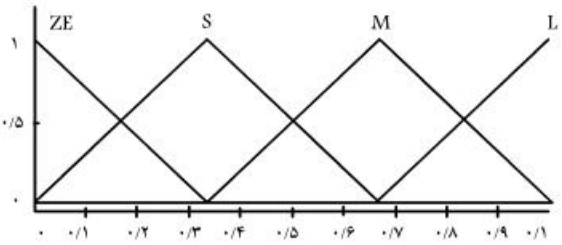
Archive of SID



الف) تابع عضویت تغییر مکان؛

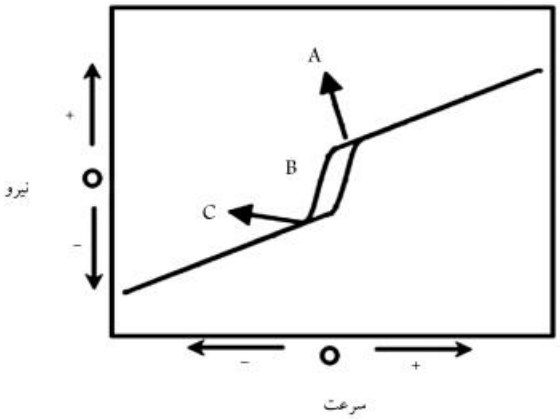


ب) تابع عضویت سرعت؛



ج) تابع عضویت ولتاژ.

شکل ۹. توابع عضویت ورودی و خروجی در کنترل‌گر نوع دو.



شکل ۱۰. نمای کلی نمودار نیرو ـ سرعت در حالت کنترل غیرفعال.

در حالت کنترل غیرفعال (با ولتاژ ۰ و ۱) در شکل ۱۰ ارائه شده است. در نمودار ذکرشده، هنگامی که جسم (درجه آزادی) در نقطه‌ی A است و بیشترین سرعت را دارد (به‌عبارت دیگر، جسم در مرکز تعادل خود قرار دارد)، بیشترین ولتاژ به میراگر اعمال می‌شود و هنگامی که این درجه آزادی به سمت نقطه‌ی B حرکت می‌کند (به‌عبارت دیگر از مرکز دور می‌شود)، از مقدار ولتاژ اعمال‌شده کاسته می‌شود. زمانی که درجه آزادی در نقطه‌ی B قرار دارد، سرعت تقریباً صفر است (به‌عبارت دیگر، درجه آزادی موردنظر در یکی از دو انتها قرار دارد) و مقدار ولتاژ نیز کم است (در این موقعیت، درجه آزادی موردنظر بالقوه تمایل به بازگشت به حالت تعادل خود دارد و اعمال مقدار کمی ولتاژ به میراگر کفایت می‌کند).

هنگامی که درجه آزادی به نقطه‌ی C نزدیک می‌شود، درواقع در حال بازگشت به حالت تعادل است. کل این روند در طول مدت زمان وقوع زلزله تکرار می‌شود. در هنگام طراحی جدول ۳ پیش‌بینی شده است که بعضی از حالت‌های تغییرمکان و سرعت، هرگز به‌طور هم‌زمان اتفاق نخواهند افتاد. هر چند قوانینی که طراحی شده‌اند، براساس منطقی است که توضیحات آن پیش‌تر ارائه شده است، ولی در راستای بهینه‌کردن قوانین مذکور، تغییراتی در آنها به روش سعی و خطا ایجاد شده است.

۳.۲.۵. کنترل‌گر فازی نوع سه با ۳ ورودی (تغییرمکان، سرعت و شتاب)

در این حالت کنترل‌گر فازی نوع سه، ۳ ورودی (تغییرمکان، سرعت، و شتاب) و ۱ خروجی (ولتاژ) دارد و همانند حالت‌های قبل، توابع عضویت مثلثی‌شکل هستند؛ که به‌منظور جلوگیری از طولانی‌شدن نوشتار، از آوردن شکل این توابع در اینجا صرف‌نظر شده است. کنترل‌گر فازی نوع سه ذکرشده، ۲۱ قانون دارد که تصویر سه‌بُعدی آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. منطقی که برای به‌دست‌آوردن قوانین فازی در این حالت استفاده شده است، همانند منطق به‌کارگرفته‌شده در کنترل‌گر با ۱ ورودی است. با این تفاوت که برای پیش‌بینی حالت‌هایی که امکان وقوع‌شان است، از روشی که به واقعیت نزدیک‌تر است، استفاده و یک موج سینوسی از تغییرمکان مربوط به یکی از شتاب‌نگاشت‌ها انتخاب شده است، که با توجه به بازه‌ی زمانی آن، سرعت و شتاب معادل آن نیز رسم و سپس نمودارها در جهت عرضی به قسمت‌های مختلف تقسیم‌بندی شده‌اند. تقسیم‌بندی انجام‌شده به صورتی است که در توابع عضویت از آنها استفاده می‌شود. با انتخاب تعدادی از نقاط بر روی نمودار تغییرمکان و پیداکردن معادل آن‌ها بر روی نمودارهای سرعت و شتاب، می‌توان به اطلاعات دقیق‌تری در مورد حالت‌هایی که در یک زلزله برای سازه‌ی مذکور اتفاق می‌افتد، رسید و قانون فازی مربوط را استخراج کرد که نتایج حاصل در شکل ۱۱ ارائه شده است.

۳.۵. مقایسه‌ی عملکرد سیستم‌های کنترل پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های پل

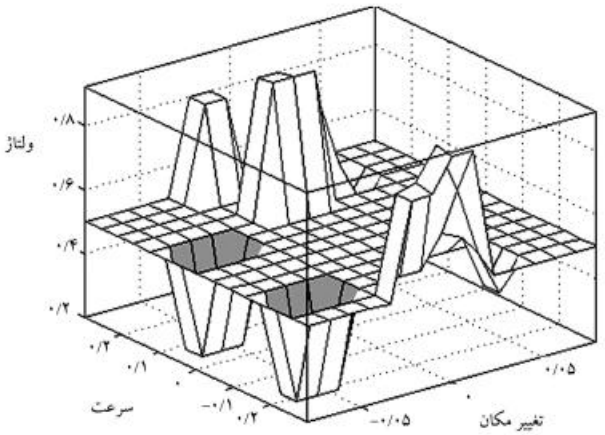
نتایج مربوط به کاهش پاسخ توسط میراگر مگنتورئولوژیک در مدل ۱ در شکل ۱۲ ارائه شده است، که در آن عملکرد کنترل‌گرهای فازی معرفی‌شده در قسمت‌های پیشین با هم مقایسه شده است. نمودار کاهش پاسخ حاکی از آن است که عملکرد هر سه کنترل‌گر فازی در مدل ۱ در دهانه‌های کناری یکسان هستند و میزان کاهش پاسخ در دهانه‌های کناری بین ۴۰ تا ۶۰ درصد است. اما در دهانه‌ی وسطی عملکرد کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی بهتر از دو کنترل‌گر دیگر بوده و حدوداً بین ۲۵ تا ۴۰ درصد است. عملکرد کنترل‌گرهای فازی با ۲ و ۳ ورودی در دهانه‌ی وسطی یکسان است و حدوداً بین ۱۳ تا ۴۰ درصد است. نتایج مربوط به کاهش پاسخ توسط میراگر مگنتورئولوژیک در مدل ۲-۱، که در آن از ۶ میراگر استفاده شده است، در شکل ۱۳ ارائه شده است.

به‌طورکلی عملکرد مدل ۲-۱ در دهانه‌ی وسطی بهتر از عملکرد مدل ۱ است، اما در دهانه‌های کناری میزان کاهش پاسخ در دو مدل ۱ و ۲-۱ تقریباً یکسان است. کنترل‌گرهای فازی در مدل ۲-۱ تقریباً عملکرد یکسان دارند، اما عملکرد کنترل‌گر نوع اول در درجات آزادی میانی در دهانه‌ی وسطی کمی بهتر از دو کنترل‌گر فازی نوع دوم و سوم است. میزان کاهش پاسخ در درجات آزادی میانی در دهانه‌های کناری حدوداً ۴۰٪ و در درجات آزادی میانی در دهانه‌ی وسطی حدوداً ۳۵٪ تحت اثر کنترل‌گر نوع اول و حدوداً ۳۰٪ تحت اثر دو کنترل‌گر فازی نوع دوم و سوم است.

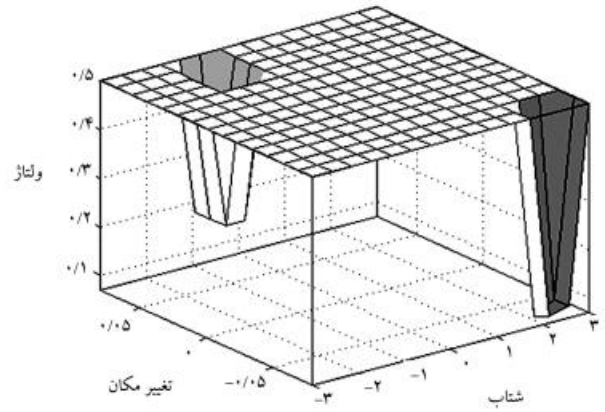
نتایج مربوط به کاهش پاسخ توسط میراگر مگنتورئولوژیک در مدل ۲-۲، که در آن از ۸ میراگر استفاده شده است، در شکل ۱۴ ارائه شده است. کنترل‌گرهای

www.SID.ir

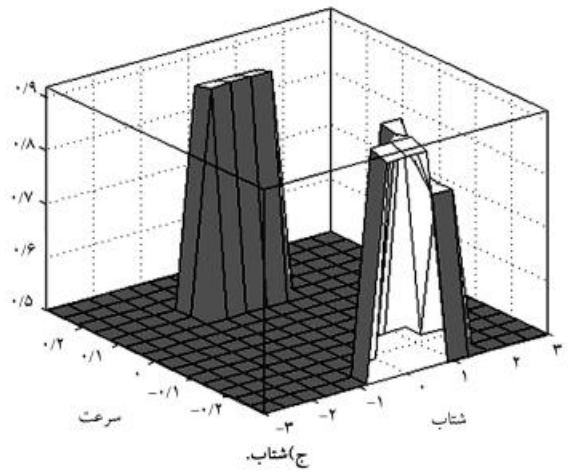
Archive of SID



الف) تغییر مکان ؛



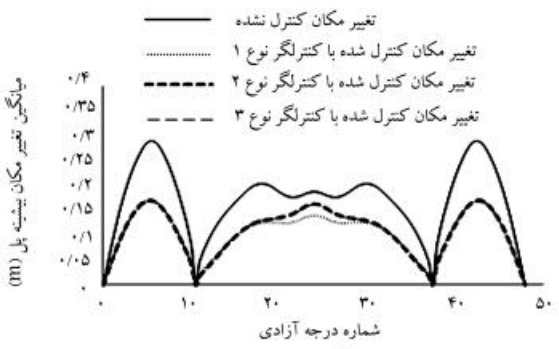
ب) سرعت؛



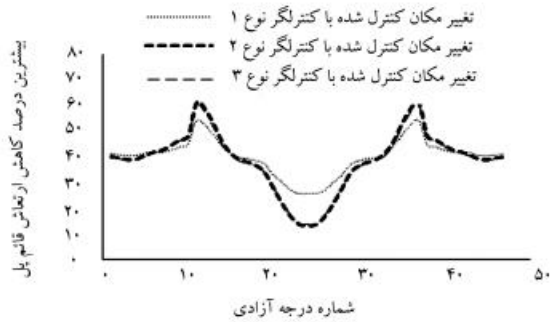
ج)شتاب.

شکل ۱۱. قوانین فازی کنترل‌گر نوع سه با ۳ ورودی.

فازی در این مدل تقریباً عملکرد یکسانی در دهانه‌های کناری دارند و پاسخ سازه را تقریباً بین ۵۰ تا ۶۵ درصد کاهش می‌دهند. لازم به ذکر است که عملکرد کنترل‌گر فازی با ۲ ورودی در دهانه‌های کناری، اندکی بهتر از سایر کنترل‌گرهاست. در دهانه‌ی وسطی، کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی بهترین عملکرد را دارد و پاسخ سازه را به میزان قابل توجهی که از ۴۰ تا ۵۰ درصد متغیر است، کاهش می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان ادعا کرد که کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی در مدل ۲-۲، بهترین عملکرد را در بین تمام حالت‌های بررسی‌شده در پژوهش حاضر دارد.

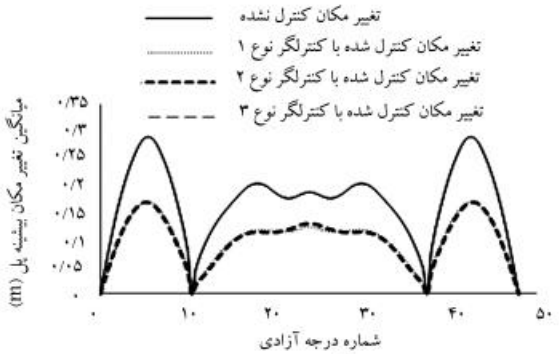


الف) مقایسه تغییر مکان ها در حالت های مختلف؛

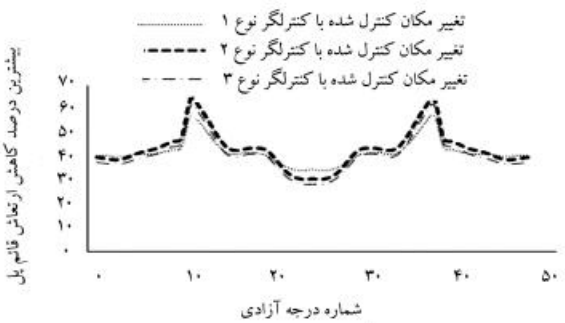


ب) درصد کاهش در حالت های مختلف.

شکل ۱۲. میزان کاهش میانگین بیشینه‌ی پاسخ تغییرمکان پل تحت اثر ۱۵ شتاب‌نگاشت توسط میراگر مگنتورئولوژیک و منطق فازی با ورودی‌های مختلف در مدل ۱.



الف) مقایسه تغییر مکان ها در حالت های مختلف؛

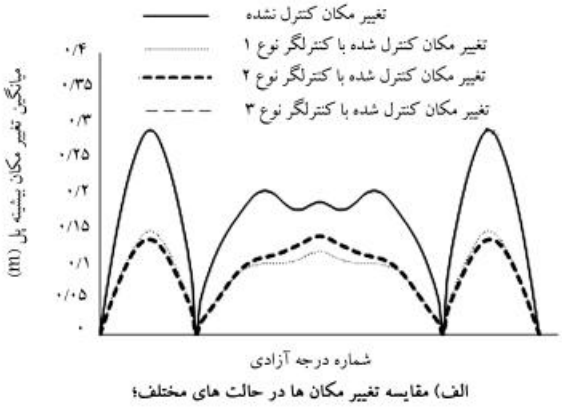


ب) درصد کاهش در حالت های مختلف.

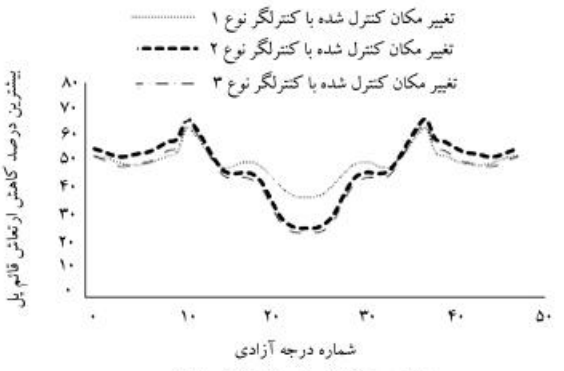
شکل ۱۳. میزان کاهش میانگین بیشینه‌ی پاسخ تغییرمکان پل تحت اثر ۱۵ شتاب‌نگاشت توسط میراگر مگنتورئولوژیک و منطق فازی با ورودی‌های مختلف در مدل ۲-۱.

www.SID.ir

Archive of SID



الف) مقایسه تغییر مکان ها در حالت های مختلف؛



ب) درصد کاهش در حالت های مختلف.

شکل ۱۴. میزان کاهش میانگین بیشینه‌ی پاسخ تغییرمکان پل تحت اثر ۱۵ شتاب‌نگاشت توسط میراگر مگنتورئولوژیک و منطق فازی با ورودی‌های مختلف در مدل ۲-۲.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کنترل نیمه‌فعال ارتعاش قائم پل‌های معلق با استفاده از میراگرهای مگنتورئولوژیک و منطق فازی مورد مطالعه قرارگرفته است. برای مطالعات عددی، پل معلق وینسنت توماس واقع در لوس‌آنجلس آمریکا به‌عنوان مثال عددی انتخاب و از میراگر بزرگ‌مقیاس ۲۲۰۰ کیلونیوتنی برای کنترل پاسخ‌های آن استفاده شده است. در این پژوهش، ۲ مدل بهینه از نظر تعداد و موقعیت میراگرها ارائه شده است (مدل‌های ۱ و ۲)، که مدل ۲ خود دو زیرمدل دارد (مدل‌های ۲-۱ و ۲-۲). در مدل ۱، چهار میراگر؛ در مدل ۲-۱، شش میراگر؛ و در مدل ۲-۲، هشت میراگر استفاده شده است. جهت نصب میراگر در نقاطی از دهانه‌های پل که دور از پایه‌ها هستند، استفاده از خرپای صلب پیشنهاد شده است. برای هرکدام از مدل‌های ذکرشده، ۳ نوع کنترل‌گر فازی پیشنهاد شده است. تفاوت کنترل‌گرهای فازی پیشنهادی در تعداد و نوع ورودی و همچنین در قوانین فازی مورد استفاده است. کنترل‌گر فازی نوع یک: ۱ ورودی و ۳ قانون، کنترل‌گر فازی نوع دو: ۲ ورودی و ۱۲ قانون، و کنترل‌گر نوع سه: ۳ ورودی و ۲۱ قانون، دارند. تمامی کنترل‌گرهای مذکور یک خروجی دارند، که همان ولتاژ اعمال‌شده به میراگر است. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به‌این صورت خلاصه کرد:

۱. کنترل‌گر فازی نوع یک با ۱ ورودی و ۳ قانون بین ۳ کنترل‌گر فازی پیشنهادی به‌عنوان کنترل‌گر بهینه انتخاب شده است، زیرا با تعداد ورودی و قوانین کمتر، کاهش پاسخ بهتری دارد.

۲. جهت بهینه‌سازی تعداد و موقعیت نصب میراگرها، و استفاده‌ی بهتر از نیروی میراگرها، مدل‌های ۱ و ۲-۱ و ۲-۲ پیشنهاد شده‌اند، که در دو مدل ۲-۱ و ۲-۲، ایده‌ی استفاده از خرپای صلب مطرح شده است، که بسیار هم مناسب عمل کرده است و نتایج مطلوبی دارد. درصد کاهش پاسخ در دو مدل ۲-۱ و ۲-۲ نسبت به مدل ۱ بیشتر است. در مدل ۱ از ۴ میراگر؛ در مدل ۲-۱ از ۶ میراگر؛ و در مدل ۲-۲ از ۸ میراگر استفاده شده است. مؤثرترین مدل جهت کاهش پاسخ‌های تغییرمکان پل، مدل ۲-۲ با کنترل‌گر فازی نوع یک با ۱ ورودی است. البته این مسئله به معنای ناکارآمدبودن مدل ۱ نیست، بلکه مدل ۱ با توجه به آنکه کمترین تعداد میراگر را نسبت به سایر مدل‌ها دارد و همچنین اجرای آن آسان‌تر است (نیاز به نصب خرپا نیست)، و به تبع آن کم هزینه‌تر نیز است، مدل مناسبی محسوب می‌شود.

۳. در این مطالعه‌ی عددی از میراگرها جهت کاهش پاسخ پل در جهت قائم استفاده شده است، ولی با توجه به آنکه میراگرها در مدل‌های پیشنهادی با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به افق قرار دارند، قادر هستند پاسخ‌های طولی پل را نیز کاهش دهند.

پانوشت‌ها

1. clipped optimal
2. Lyapunov
3. Bill Emerson memorial
4. resetting semi-active stiffness damper
5. switching semi-active stiffness damper
6. semi-active friction damper
7. sliding mode control
8. Roll-N-Cage
9. benchmark
10. Bang-Bang
11. Ping-Sheng

منابع (References)

1. Karnopp, D., Corsby, M.J. and Hrwood, R.A. "Vibration control using semi-active force generators", *J. of Eng. for Industry*, **96**(2), pp. 619-626 (1974).
2. Kobori, T. and Minai, R. "Analytical study on active seismic response control", *Trans. of AIJ*, **66**, pp. 257-260 (1960).
3. Hrovat, D., Barak, P. and Rabins, M. "Semi-active versus passive or active tuned mass dampers of structural control", *J. of Eng. Mech.*, **109**(3), pp. 691-705 (1983).
4. Dixon, J.C., *The Shock Absorber Handbook*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 432 p. (September 2007).
5. Robinow, J. "Magnetic fluid torque and force transmitting device", *US Patent*, **575**(2), (1951).

www.SID.ir

Archive of SID

6. Shames, I.H. and Cozzarelli, F.A., *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1992).
7. Carleson, J.D. "The promise of controllable fluids", *In Proc. of Actuator*, **94**, pp. 266-270 (1994).
8. Spencer, B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D. "Phenomenological model of magneto rheological damper", *J. of Eng. Mech., ASCE*, **123**(3), pp. 230-238 (1997).
9. Dyke, S.J., Spencer, B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. "Seismic response reduction using magneto rheological dampers", *In Proc. of IFAC World Cong.*, Sanfrancisco, CA, (1996).
10. Xu, Y.L., Qu, W.L. and Ko, J.M. "Seismic response control of frame structures using magneto rheological/electro rheological dampers", *J. of Earth. Eng. and Struct. Dyns.*, **29**(5), pp. 557-575 (2000).
11. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, J.D. "Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers", *J. of Eng. Mech., ASCE*, **127**(11), pp. 1152-1164 (2001).
12. Dyke, S.J., Turan, G.J., Caicedo, M.L., Bergman, A. and Hague, S. "Phase –I benchmark control problem for seismic Response of cable-stayed bridges", *J. of Struct. Eng., ASCE*, **129**(7), pp. 857-872 (2003).
13. Alapati, A. and Saha, P. "Review of the performance of semi-active control systems for benchmark cable-stayed bridge", *Int. J. of Earth Sci. and Eng.*, **4**(6), pp. 720-725 (2011).
14. Moon, S.J., Bergman, L.A. and Voulgaris, P.G. "Sliding mode control of cable-stayed bridge subjected to seismic excitation", *J. of Eng. Mech., ASCE*, **129**(1), pp. 171-178 (2003).
15. Jung, H.J., Spencer, B.F. and Lee, I.W. "Control of seismically excited cable stayed bridge employing magneto rheological fluid dampers", *J. of Struct. Eng.*, **129**(7), pp. 873-883 (2003).
16. Ok, S.Y., Park, D.S., Park, K.S. and Koh, H.M. "Semi-active fuzzy control of cable stayed bridges using magneto-rheological dampers", *J. of Eng. Struct.*, **29**(5), pp. 776-788 (2007).
17. Ismail, M., Rodellar, J., Carusone, G., Domaneschi, M. and Martinelli, L. "Characterization, modeling and assessment of roll-N-cage isolator using the cable-stayed bridge benchmark", *Acta Mechanica*, **224**(3), pp. 525-547 (2013).
18. Domaneschi, M. and Martinelli, L. "Extending the benchmark cable-stayed bridge for transverse response under seismic loading", *J. of Bridge Eng.*, **19**(3), (March 2014).
19. Yang, M., Chen, Z. and HU, J. "Investigations concerning seismic response control of self-anchored suspension bridge with MR dampers", *Front. of Archit. and Civil Eng. In China*, **2**(1), pp. 43-48 (2008).
20. Yang, M.G., Chen, Z.Q. and Hua, X.G. "An experimental study on using MR damper to mitigate longitudinal seismic response of a suspension bridge", *J. of Soil Dyn. and Earth. Eng.*, **31**(8), pp. 1171-1181 (2011).
21. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall Int. Series in Civil Eng. and Eng. Mechs. (1995).
22. Abdolghaffar, A.M. "Vertical vibration analysis of suspension bridges", *J. of the Struct. Eng., ASCE*, **106**(10), pp. 2053-2075 (1980).
23. Pourzeynali, S. "Reliability analysis of suspension bridges for wind forces" Ph. D. Thesis, Indian Inst. of Tech. Delhi, Hauz Khas, New Delhi-110016, India (2001).
24. Abdelghaffar, A.M. and Rubin, L.I. "Suspension bridge response to multiple support excitations", *J. of the Eng. Mech. Div.*, **108**(2), pp. 419-435 (1982).
25. Pourzeynali, S. "Semi-active control of suspension bridges using MR dampers and fuzzy logic", M. Sc. Thesis, Faculty of Civil Eng., Univ. of Guilan, Guilan (2013). (in Persian)
26. Ogata, K., *Modern Control Engineering*, Engle Wood Cliffs, Prentice Hall Inc., NJ. (1982).
27. Narashiman, S., Nagarajaiah, S., Johnson, E. and Gavin, H. "Smart base isolated benchmark building part I: Problem definition", *J. of Struct. Control and Health Monit.*, **13**(2-3), PP. 573-588 (2006).
28. Kia, M., *Fuzzy Logic in the MATLAB*, Kian Rayaneh (2010). (in Persian)
29. Pourzeynali, S. and Esteki, S. "Optimization of the TMD parameters to suppress the vertical vibrations of suspension bridges subjected to earthquake excitation", *J. of IJE Trans. B: Applications*, **22**(1), pp. 23-34 (2009).
30. Rodriguez, A., Iwata, N., Ikhouane, F. and Rodellar, J. "Model identification of a large-scale magneto rheological fluid damper", *J. of Smart Mater. and Struct.*, **18**(1), pp. 1-12 (2009).
31. Mehrkian, B. "Hierarchical semi-active fuzzy control of a non-linear base-isolated structure using multi-objective GA in a benchmark frame", M. Sc. thesis, Faculty of Civil Eng., Univ. of Guilan, Guilan (2012). (in Persian)

www.SID.ir