

کنترل نیمه فعال ارتعاش قائم پل های 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

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۵ (۳-۳۳-۵)
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۳/۲، ص. ۵۴-۳۳

در این پژوهش، کاهش ارتعاش قائم پل های معلق با استفاده از میراگرهای نیمه فعال مگنتورئولوژیک و منطق فازی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، از یک میراگر مگنتورئولوژیک بزرگ مقیاس 220° کیلو نیوتنی استفاده و پل معلق وینسنت توماس در آمریکا به عنوان مثال عددی انتخاب شده است. یکی از مسائل چالش برانگیز در این پژوهش، نحوه ی نصب میراگرها در درجات آزادی دور از پایه های پل، جهت افزایش کارایی میراگرها بوده است؛ که برای حل آن، استفاده از خرابای صلب پیشنهاد شده است. در این پژوهش، ۲ مدل بهینه از نظر تعداد و موقعیت میراگرها ارائه و برای هر مدل نیز ۳ نوع کنترل گر فازی پیشنهاد شده و مطالعات نشان داده است که مدل ۲ با ۸ میراگر با استفاده از کنترل گر فازی نوع یک، که یک ورودی دارد، بهترین عملکرد را در کاهش پاسخ های پل دارد. در ضمن میراگرهای نصب شده قادر به کاهش پاسخ پل در جهت افقی هم هستند.

واژگان کلیدی: کنترل نیمه فعال، میراگر مگنتورئولوژیک، منطق فازی، پل های معلق، ارتعاش قائم.

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

۱. مقدمه

پل های معلق از جمله سازه هایی هستند که به دلیل سختی و میرایی کم، همیشه در معرض خطر بلایای طبیعی مانند زلزله و باد قرار دارند. از سال های دور، تلاش بسیاری جهت حفاظت از این گونه سازه ها به عمل آمده است، که از جمله ی آن ها می توان به افزایش سختی و شکل پذیری سازه ها اشاره کرد. ولی با گذشت زمان و با بررسی عملکرد سازه های مختلف در برابر زلزله، نواقص این روش ها بیشتر بر مهندسان آشکار شده است. بدین ترتیب روش های جدیدی از جمله افزایش میرایی سازه جهت مقابله با بلایای طبیعی پیشنهاد شده است. در این راستا، سیستم های کنترل غیرفعال و به دنبال آن سیستم های کنترل فعال و نیمه فعال توسعه یافته اند. سیستم های کنترل نیمه فعال در سال های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این سیستم ها قابلیت اطمینان سیستم های کنترل غیرفعال را با مزیت پارامترهای قابل تنظیم سیستم های کنترل فعال به صورت هم زمان دارند. میراگرهای مگنتورئولوژیک از جمله ی این سیستم ها 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.

مطالعات متعددی جهت ارائه ی مدل هایی برای تحلیل سیالات قابل کنترل درون میراگرهای مگنتورئولوژیک صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۲، ایده ی استفاده از مدل بینگهام برای توصیف رفتار میراگرهای مگنتورئولوژیک مطرح شده است.^[۷] در تلاش برای تعیین مدل های دقیق تر برای میراگرهای مگنتورئولوژیک، برخی پژوهشگران

ایده ی اولیه ی سیستم های کنترل نیمه فعال در سال ۱۹۲۰،^[۱] مطرح و در سال ۱۹۵۰^[۲] ایده ی استفاده از سیستم های مذکور به شکل قوی تری عنوان شده است، اما به دلیل ضعف در فناوری های مربوط به علوم رایانه، گامی به جلو برداشته نشده است. به نظر می رسد که اولین کاربرد این سیستم کنترل نیمه فعال در زمینه ی مهندسی سازه در پژوهشی در سال ۱۹۸۳ برای سیستم های تحت بارگذاری محیطی مطرح شده است.^[۳] میراگرهای مگنتورئولوژیک، با توجه به عملکرد بسیار مطلوب، از اوایل سال ۲۰۰۰ میلادی به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفته و بر روی سیستم تعلیق چندین نوع اتومبیل نصب شده اند.^[۴] پژوهش ها و مطالعات اولیه بر روی مایعات مگنتورئولوژیک و تجهیزات مرتبط با آن ها، در پژوهشی در اواخر دهه ی ۱۹۴۰ در اداره ی ملی استاندارد آمریکا انجام شده است.^[۵] که در آن بر روی ولتاژ کاری پایین، ایجاد نیروهای بسیار بزرگ و همچنین پاسخ سریع سیستم های مذکور تأکید بسیاری شده است. پس از آن به مدت حدوداً ۴۰ سال، مطالعات و آزمایش ها بر روی مایعات مگنتورئولوژیک متوقف شده است.^[۶]

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۰/۲۸، پذیرش ۱۳۹۳/۱۱/۱۲

(۱۹۹۷) با مطالعه بر روی یک میراگر مگنتورولوژیک کوچک مقیاس دریافته‌اند که مدل هیستریزیس بوک - ون قادر است ویژگی‌های میراگر مگنتورولوژیک را به خوبی نشان دهد.^[۸] همچنین پژوهشگران دیگری (۱۹۹۷) براساس مدل ساده‌ی بوک - 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 مگنتورولوژیک 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 هیستریزیس بوک - ون در توصیف رفتار واقعی میراگر مگنتورولوژیک، 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 و گرانروی 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 مگنتورولوژیک استفاده شده است، که دقت کمتری نسبت به مدل‌های جدیدتر دارد.

با مشاهده‌ی عملکرد فوق‌العاده مناسب سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال توسط میراگرهای مگنتورولوژیک، مطالعات به سمت بررسی عملکرد این تجهیزات در سازه‌هایی به شکل واقعی تریبش رفته است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۱،^[۱۱] آزمایش‌هایی برای ارزیابی الگوریتم‌های کنترل نیمه‌فعال در سازه‌هایی با شکل واقعی و با چندین میراگر مگنتورولوژیک، 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 قرار گرفته است. از آنجایی که میراگر مگنتورولوژیک 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 ال‌سنسترو قرار گرفته 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 ال‌سنسترو، 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. در کاهش پاسخ شتاب بیشینه‌ی سازه، الگوریتم کنترلی بهینه‌ی حذفی در دو مقیاس کوچک و متوسط از زلزله‌ی قرار گرفته 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 پل کابلی 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 قرار گرفته است، می‌توان به میراگرهای مگنتورولوژیک، میراگر با سختی نیمه‌فعال بازنشانی،^۴ میراگر با سختی نیمه‌فعال سوپرجینگ،^۵ و میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال،^۶ اشاره کرد.^[۱۳] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۳،^[۱۴] عملکرد میراگر مگنتورولوژیک با الگوریتم کنترل مود لغزشی،^۷ بر روی پل مذکور مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش مذکور حاکی از مناسب بودن عملکرد میراگر مگنتورولوژیک با الگوریتم کنترل مود لغزشی بوده است. در همان سال در پژوهش دیگری،^[۱۵] عملکرد میراگرهای مگنتورولوژیک با استفاده از الگوریتم کنترلی بهینه‌ی حذفی بر روی پل مرجع مذکور بررسی شده و مطالعه‌ی جامعی بر روی انواع مدل‌های دینامیکی میراگر مگنتورولوژیک از جمله: مدل بینگهام، مدل بوک - ون و مدل اصلاح‌شده‌ی بوک‌ون صورت گرفته و نتایج حاکی از آن بوده است که عملکرد میراگر مگنتورولوژیک با الگوریتم کنترلی بهینه‌ی حذفی به‌طور کلی همانند سیستم کنترل فعال است و همچنین عملکرد مدل‌های دینامیکی بوک - ون و اصلاح‌شده‌ی بوک - ون بهتر از مدل بینگهام بوده است. پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۰۷،^[۱۶] عملکرد میراگرهای مگنتورولوژیک 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 در کاهش 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 رل - ان - کیچ^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 ترکیبی که به‌عنوان پنج‌مارک^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 پنج‌مارک اولیه مورد مطالعه قرار گرفته 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 مگنتورولوژیک 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 تعداد میراگرها افزایش می‌یابد و بیشترین درصد کاهش پاسخ در شدت جریان ۰/۷۵ امپرا 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 امپرا بوده است. برخی پژوهشگران نیز در پژوهشی در سال ۲۰۱۱،^[۲۰] مدل جدیدی از میراگر مگنتورولوژیک جهت

پل های معلق، از جمله در این پژوهش، این فرضیات ساده کننده در نظر گرفته شده است:

۱. همه ی تنش ها در محدوده ی قانون هوک هستند، یعنی هیچ گونه رفتار غیرخطی مصالح در نظر گرفته نشده است.
۲. کل بار مرده ی اولیه ی پل فقط توسط کابل اصلی حمل می شود و تحت بار مرده، هیچ گونه تنشی در عرشه ی پل ایجاد نمی گردد.
۳. کابل اصلی پل سطح مقطع یکنواخت دارد و شکل آن تحت اثر بار مرده به شکل سهمی است، به طوری که وزن کابل را می توان در امتداد طول دهانه ی پل (به جای طول کابل) به صورت یکنواخت فرض کرد.
۴. فرض شده است کابل های قائمی که عرشه ی پل را به کابل اصلی آویزان می کنند و آویز (یا هنگر) نامیده می شوند، قائم و بدون تغییر شکل هستند و بارهای آن ها به صورت یکنواخت فرض شده است، یعنی فاصله ی آن ها بسیار کم در نظر گرفته شده است.
۵. اتصال کابل های اصلی به بالای برج ها به صورت غلتکی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، برای به دست آوردن معادله ی 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 (رابطه ی ۲) استفاده شده است:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta (T_E - V_E) dt = 0 \quad (2)$$

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 می توان ماتریس های سختی و جرم پل را به دست آورد و سپس معادله ی حرکت پل را مطابق معادله ی عمومی حرکت در دینامیک (رابطه ی ۱) نوشت. برای این منظور، ابتدا باید کل عرشه ی پل، شامل تیرها یا خرپاهای اصلی و کابل اصلی آن (شکل ۱)، که مربوط به پل معلق توماس است و در این پژوهش برای مطالعه ی عددی انتخاب شده است، به المان های مختلف تقسیم بندی شود. شکل ۱ ب، المان محدود پل را نشان می دهد که شامل المان تیر، المان کابل اصلی، و دست کم دو آویز قائم (یا هنگر) است که در تحلیل دینامیکی پل در نظر گرفته شده است. تعداد المان های مورد استفاده در هر کدام از دهانه های کناری این پل ۱۱ عدد و در دهانه ی میانی آن ۲۸ عدد و در کل پل ۵۰ عدد که توسط عبدالغفار بهیسه یابی و تعیین شده است [۲۲] (شکل ۱ الف). در این روش، کل عرشه ی پل به صورت تیرهای دو سر مفصل ساده در نظر گرفته می شود که توسط تعدادی آویز معلق به کابل اصلی آویزان و در محل برج ها به صورت غلتکی تکیه داده شده اند. با تعیین مقدار انرژی پتانسیل و جنبشی در هر المان و به کارگیری اصل هامیلتون مطابق رابطه ی ۱، ماتریس های سختی و جرم هر المان به دست می آید، که پس از سرهم بندی آن ها برای کل المان ها، ماتریس های سختی و جرم کل پل تعیین می شود. [۲۳، ۲۴] لازم به یادآوری است که این بخش از محاسبات به کمک برنامه یی انجام شده است که در تحقیقات قبلی [۲۳] ارائه شده است. در محاسبات مربوطه، خود پایه ها مدل نشده اند. [۲۴] همچنین، جهت کاهش حجم محاسبات، درجات آزادی که جرم آنها صفر است، با استفاده از اصول فشرده سازی از سیستم حذف شده اند. [۲۵] این تذکر لازم است که فشرده کردن درجات آزادی به معنای حذف آن ها از محاسبات دینامیکی نیست. [۲۸]

کاهش پاسخ لرزه یی پل های معلق را پیشنهاد داده اند و به صورت تجربی به مطالعه ی آن پرداخته اند. تا قبل از آن زمان، اساس مطالعات تجربی نحوه ی عملکرد آن ها در ساختمان ها بود، نه پل ها. آنها چندین حالت را مورد بررسی قرار داده اند، که ۶ حالت از حالت های مذکور مربوط به جریان های مختلف و دوتا از آن ها مربوط به دو الگوریتم کنترلی بنگ - بنگ^۱ بوده است. در مطالعه ی مذکور، پل بینگ - شینگ^{۱۱} به عنوان مثال عددی انتخاب و به منظور کنترل پاسخ ها در جهت طولی پل، میراگرهای مذکور به صورت افقی بین عرشه و برج پل 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 می شود؛ اما توانایی میراگر مورد مطالعه در کاهش پاسخ تغییرمکان در حالت کنترل غیرفعال بیشتر است.

از بحث عنوان شده در مقدمه ی این پژوهش مشاهده می شود که تاکنون پژوهشی در مورد کاهش پاسخ های قائم پل های کابلی توسط سیستم های کنترلی در برابر نیروهای قائم زلزله صورت نگرفته و در مراجع مختلف گزارشی در این مورد یافت نشده است. لذا، در این پژوهش، کنترل تغییرمکان های قائم پل های معلق تحت اثر زلزله های مختلف و با استفاده از سیستم کنترلی نیمه فعال 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 - ون بیان شده است. یکی از مشکلات اساسی پیش آمده در این پژوهش این است که چگونه می توان یک میراگر مگنتورئولوژیک را در یک نقطه ی دور از پایه های پل، در زیر عرشه ی پل نصب کرد، به طوری 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 لوس آنجلس آمریکا به عنوان مثال عددی انتخاب شده و پاسخ های آن تحت تأثیر ۱۵ شتاب نگاشت از زلزله های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. تعداد و موقعیت نصب میراگرهای مگنتورئولوژیک در طول پل نیز بهیسه یابی شده است. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد مناسب سیستم کنترلی نیمه فعال پیشنهادی در کاهش پاسخ های 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 می توان تاریخچه ی زمانی پاسخ سازه ی مورد نظر را به دست آورد. اساسی ترین پاسخ سازه در یک تحلیل دینامیکی، تغییرمکان آن است. معادلات دینامیکی حرکت یک سیستم چند درجه آزادی تحت اثر نیروی زلزله یی که در جهت قائم به آن اعمال می شود، به صورت رابطه ی ۱ نوشته می شود: [۲۸]

$$[M] \{ \ddot{u}(t) \} + [C] \{ \dot{u}(t) \} + [K] \{ u(t) \} = - [M] \{ r \} \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

که در آن، $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی، و سختی سازه؛ بردارهای $\{ u(t) \}$ ، $\{ \dot{u}(t) \}$ و $\{ \ddot{u}(t) \}$ به ترتیب 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 اعضا نظیر درجات آزادی در جهت حرکت زلزله ۱ و مابقی صفر هستند. تعیین معادله ی حرکت دینامیکی پل های معلق، فرایندی بسیار پیچیده بوده و در اینجا سعی شده است فقط مختصری از آن ارائه شود و ارائه ی جزئیات آن از حوصله ی این نوشتار خارج است. [۲۳، ۲۴] در تحلیل دینامیکی



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 - ایران	گلباف	۱۳۸۲/۱۰/۵	۵٫۸	۲۰	۰٫۱۳۹	NEIC
۲	منجیل - ایران	رودبار	۱۳۶۹/۰۳/۳۱	۷٫۴	۱۳	۰٫۲۱۷	NEIC
۳	اردکول - ایران	ترت حیدریه	۱۳۸۹/۰۵/۸	۵٫۸	-	۰٫۱۸۶	NEIC
۴	فیروز آباد - ایران	آبیر	۱۳۸۳/۰۳/۸	۶٫۳	-	۰٫۲۳۷	EMSC
۵	سرین - ایران	آستارا	۱۳۷۵/۱۲/۰۵	۶٫۱	۵۵	۰٫۱۹۱	NEIC
۶	قشم - ایران	بندرعباس	۱۳۸۴/۰۹/۰۶	۶٫۲	۵۶	۰٫۲۹۵	IIEES
۷	چی چی - 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 - ترکیه	Fatih	۱۹۹۹/۰۸/۱۷	۷٫۸	۶۴٫۵	۰٫۱۲۸	KOERI
۱۱	ارزینکن - ترکیه	Erzincan	۱۹۹۲/۰۳/۱۳	۶٫۹	۲	۰٫۲۴۸	-
۱۲	سنفرانندو	Hollywood Stor Lot	۱۹۷۱/۰۲/۰۹	۶٫۶	۲۱٫۲	۰٫۱۳۶	USGS
۱۳	طیس - ایران	Tabas	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	۷٫۷	-	۰٫۶۸۸	-
۱۴	نورتریج - رینالدی	Pacoima Dam	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	۶٫۷	۸	۱٫۲۲۹	CDMG
۱۵	کوبه	Takarazuka	۱۹۹۵/۰۱/۱۶	۶٫۹	۱٫۲	۰٫۴۳۳	CUE

حل شده‌اند. شکل کلی معادله‌ی فضای حالت به صورت رابطه‌ی ۴ است: [۲۶، ۲۵]

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + [B]\{z\}$$

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

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. [۲۶، ۲۵]

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 گونه‌ی 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 گسل نیز در نظر گرفته شده‌اند. از آنجایی

برای نوشتن معادله‌ی حرکت دینامیکی سازه در حالت کنترل‌شده، اثر نیروی کنترلی به صورت یک نیروی خارجی در سمت راست معادله اعمال می‌شود. لذا معادله‌ی حرکت در حالت کنترل‌شده را می‌توان به صورت 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 مگنتورولوژیک است. معادلات ارائه‌شده پس از انتقال به فضای حالت حل می‌شوند و پاسخ‌های کنترل‌شده و کنترل‌نشده‌ی سازه به دست می‌آیند. لازم به یادآوری است که در پژوهش حاضر، کلیه معادلات دینامیکی پل، چه بدون ابزار کنترل (پاسخ‌های کنترل‌نشده) و چه با ابزار کنترل (پاسخ‌های کنترل‌شده) با استفاده از نرم‌افزار متلب و جعبه ابزار سیمولینک

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:

$$K_x(v) = K_x \quad (۷ الف)$$

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

$$\eta(v) = \eta_a + \eta_b \exp(-\lambda v) \quad (۷ پ)$$

$$\rho(v) = \rho_a + \rho_b \exp(-\lambda v) \quad (۷ ت)$$

$$\sigma(v) = \sigma_a + \sigma_b \exp(-\lambda v) \quad (۷ ث)$$

$$K_w(v) = \begin{cases} k_{w_1} + k_{w_2}v^{1.5}, & v \leq 0.3 \\ k_{w_2} + k_{w_3} \sin\left(\frac{\pi(v-0.3)}{0.8}\right) + k_{w_4} \sin\left(\frac{\pi(v-0.3)}{0.8}\right), & 0.3 \leq v \leq 0.7 \\ k_{w_5} + k_{w_6}v + k_{w_7}v^2 + k_{w_8}v^3 + k_{w_9}v^5, & 0.7 \leq v \end{cases} \quad (۷ ج)$$

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 کنترل‌گراست. 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 - 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.

که هدف مطالعه در این پژوهش، پاسخ سازه فقط در جهت قائم است، فقط از مؤلفه‌ی قائم شتاب‌نگاشت‌های ذکر شده 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 نیمه‌فعال پل با استفاده از میراگر MR

یک ماده‌ی مگنتورئولوژیک، مایعی است که خصوصیات رئولوژیکی آن مانند تنش تسلیم و گرانبوی 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 پر قدرت مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین بی‌نیازی به منابع بزرگ انرژی در میراگرهای مذکور سبب افزایش قابلیت اعتماد در آن‌ها شده است.

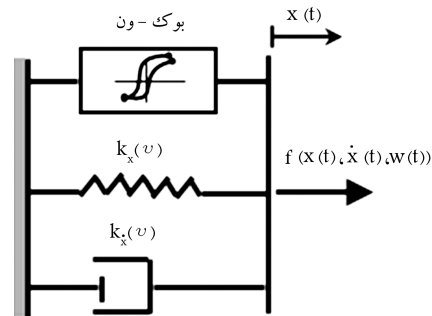
میراگرهای مگنتورئولوژیک در صورت نبود منبع انرژی به میراگر ویسکوز تبدیل می‌شوند. مدل‌های مکانیکی بسیاری جهت توصیف میراگر مگنتورئولوژیک پیشنهاد شده‌اند. از جمله‌ی آنها، مدل بوک - ون است که در این پژوهش برای مدل‌کردن رفتار هیستریزیس میراگر مگنتورئولوژیک مورد استفاده قرار گرفته است. نمای شماتیک این مدل در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

در این پژوهش از مدل نرم‌الیزه‌شده‌ی میراگر مگنتورئولوژیک بزرگ مقیاس ۲۲۰۰ کیلو نیوتنی استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شده است، در این پژوهش برای حل معادلات حرکت پل از نرم‌افزار متلب و جعبه ابزار سیمپولینک استفاده شده است. هنگام شبیه‌سازی مسئله در محیط سیمپولینک 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:

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

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

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



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

۵. مطالعه‌ی عددی

در پژوهش حاضر، پل معلق وینسنت توماس واقع در لوس آنجلس آمریکا به‌عنوان مثال عددی انتخاب شده است. این پل، بیشتر 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 [۲۳، ۲۲] 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. [۲۴]

نمای طولی پل معلق وینسنت توماس در شکل ۳ الف و بسامدها و اشکال مودی شش مود اول پل مذکور نیز در شکل ۳ ب ارائه شده است. [۲۴] 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 78 cm^2 و مقدار کشش اولیه ناشی از بارهای مرده در هر کابل $30 \times 10^3 \text{ N}$ است. شکل ۱، نمایش‌گر مدل اجزاء محدود پل معلق وینسنت توماس است. همان‌طور که قبلاً نیز بحث شده است (مطابق شکل ۱ الف)، دهانه‌های کناری پل به ۱۱ المان دهانه‌ی میانی آن به ۲۸ المان تقسیم شده‌اند. [۲۳، ۲۲] مدل مذکور ۴۹ درجه آزادی انتقالی در جهت قائم و ۵۳ درجه آزادی دورانی دارد. هر المان شامل: عرشه، کابل اصلی، دست‌کم دو آویز معلق طبق شکل ۱ ب 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 و داشته است، مسئله‌ی موقعیت نصب میراگرها در پل است. به‌عبارت دیگر، به دلیل طول بودن 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 به دنبال چاره‌ی 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:

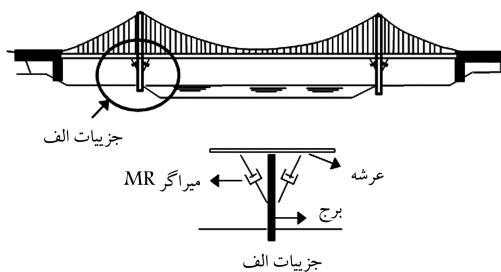
الف) روش اول: در این روش میراگر از یک طرف به پایه و از طرف دیگر به عرشه‌ی پل متصل می‌شود. لذا در این حالت میراگر فقط در کنار پایه‌ها قابل نصب است.

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

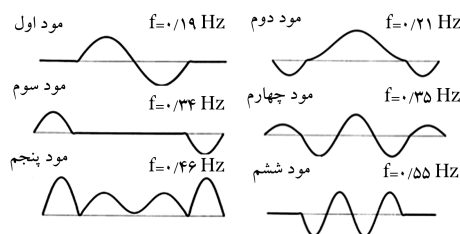
در این پژوهش مدل‌های بسیاری جهت دست‌یابی به یک مدل بهینه‌ی نصب میراگرها (چه از نظر تعداد و چه از نظر موقعیت نصب)، برای کاهش پاسخ تغییرمکان پل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. این نکته قابل ذکر است که تعداد پارامترهای مجهول در حالت کنترل نیمه‌فعال توسط منطق فازی بسیار بیشتر از حالت غیرفعال (حالتی که 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 زیاد بودن نیروی میراگر بر کاهش پاسخ سازه نتیجه‌ی عکس می‌دهد. به‌عبارت دیگر، همیشه نیروی زیاد میراگر سبب افزایش درصد کاهش پاسخ نمی‌شود. به همین دلیل، در این مدل و سایر مدل‌ها، از میراگر 110° کیلونیوتنی نیز به همراه میراگر 220° کیلونیوتنی استفاده شده است. به‌طور کلی در مرحله‌ی مطالعات شبیه‌سازی می‌توان نیروی میراگر را مقیاس کرد، ولی در کاربردهای عملی باید میراگری ساخت که قادر باشد آن نیرو را تولید کند. [۳۰] میراگرها در مدل ۱، بین پایه‌های پل و درجات آزادی شماره‌های ۱، 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؛ [۲۴]



ب) شش مود اول پل. [۳۱]

شکل ۳. برخی مشخصات پل معلق وینسنت توماس.

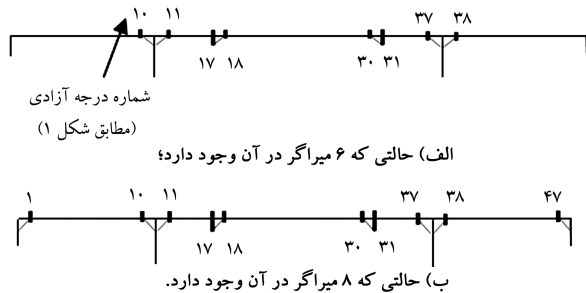
آن وارد می‌شود، طوری طراحی می‌شود که در پل‌های نوساز طراحی و اجرای آن به راحتی صورت گیرد. ولی در امر بهسازی پل‌های موجود، باید برای نصب و اتصال خرپای صلب به زیر عرشه‌ی پل تمهیدات لازم اندیشیده شود، که از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به اتصال خرپای طراحی شده با استفاده از کاشت انکر بولت به زیر عرشه اشاره 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. در نهایت، 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 در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی آن، می‌توان از بین این دو حالت، یکی را انتخاب کرد. جزئیات بیشتر در مورد موقعیت قرارگیری میراگرها در دو حالت عنوان شده 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 مقیاس شده یعنی میراگر ۱۱۰° کیلونیوتنی و میراگرهایی که در دهانه‌های کناری قرار دارند، میراگر ۲۲۰° کیلونیوتنی هستند. در مدلی هم که ۸ میراگر دارد، میراگرهایی که به درجات آزادی ۱۰° و ۳۸° متصل هستند، از نوع میراگر ۲۲۰° کیلونیوتنی، و میراگرهایی که به سایر درجات آزادی متصل هستند، از نوع میراگر ۱۱۰° کیلونیوتنی هستند.

از این به بعد دو مدل عنوان شده به ترتیب به عنوان مدل‌های ۱-۲ 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 به عنوان 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 به دست آمده از حالت‌های مختلف آن با حالت کنترل نشده، 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 قرار گرفته‌اند، از جهت نوع ورودی به ۳ دسته تقسیم شده‌اند:

۱. کنترل‌گر نوع یک: کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی (حاصل ضرب 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).

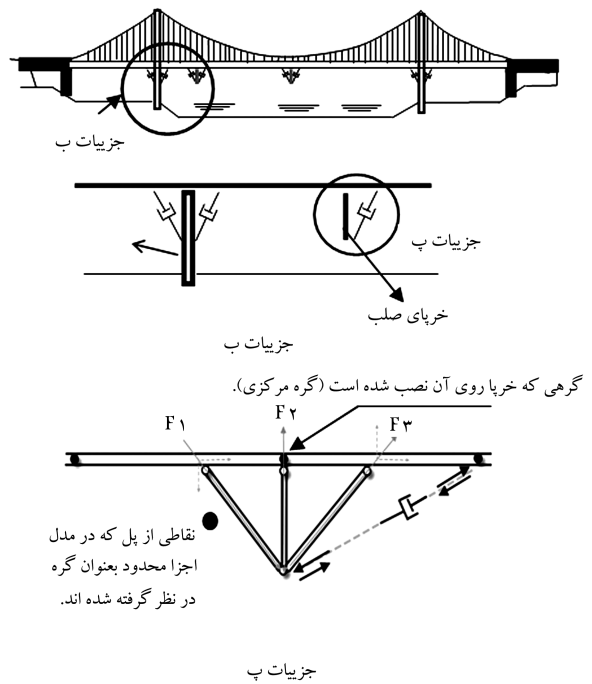


شکل ۵. موقعیت قرارگیری میراگرها در مدل ۲.

است. در درجات آزادی ۱۰° و ۳۸° از میراگر ۲۲۰° کیلونیوتنی و در درجات آزادی ۱۱ و ۳۷ از میراگر مقیاس شده‌ی ۱۱۰° 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

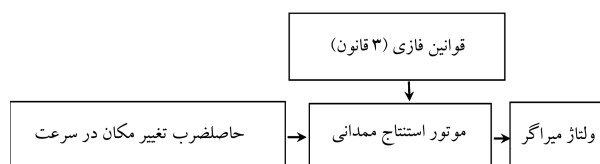
همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شده است، از جمله مسائل چالش برانگیز در این پژوهش، ارائه‌ی راهکاری جهت نصب میراگر در درجات آزادی پل دور از پایه‌های آن است. در این پژوهش، جهت رفع مشکل عنوان شده، استفاده از خرپای صلب (روش الف در بخش ۱.۱.۵) پیشنهاد شده است. روش مذکور به این صورت است که خرپایی صلب در زیر عرشه‌ی پل اجرا می‌شود، سپس میراگر مگنتورولوزیک 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 تولید شده توسط میراگر بین اعضاء مختلف خرپا توزیع شده و به المان عرشه انتقال یافته است. نیروها در داخل اعضاء خرپا به صورت 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 تولید شده توسط میراگر بوده است، که با کمی تقریب فرض شده است در درجه آزادی مرکزی خرپا وارد می‌شود. به عبارت دیگر، مؤلفه‌های قائم F_1 و F_2 در طول یک المان از مدل اجزاء محدود اثر می‌کنند، اما از آنجایی که محل اثر این نیروها در مدل اجزاء محدود به عنوان یک گره در نظر گرفته نشده است، لذا به طور 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 به صورت صلب اجرا شوند تا بتوان از تغییر شکل محوری آن صرف نظر کرد. بدیهی است که این خرپای صلب برای نیروهایی که از طرف میراگر به



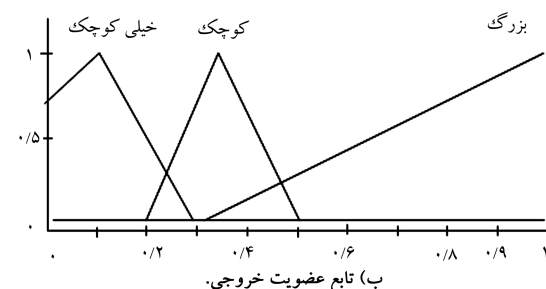
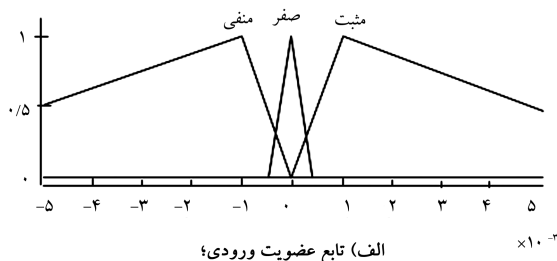
شکل ۴. نحوه‌ی قرارگیری میراگرها در مدل ۲ (با استفاده از خرپای صلب).

برای تعیین جداول قوانین فازی در هر یک از ۳ کنترل‌گر مذکور از منطق خاصی استفاده شده است، که جزئیات بیشتر در این باره 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). به عبارت 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 مثلثی شکل 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، بدین صورت است: هنگامی که درجه آزادی موردنظر در حالت تعادل (مرکز) و یا در دورترین نقطه نسبت به حالت تعادل (انتهای) قرار دارد، ولتاژ به میراگر اعمال می‌شود.



شکل ۶. معماری کلی کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی.



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

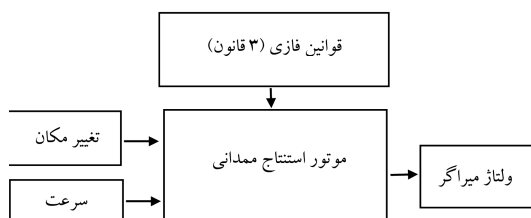
زیرا پیش‌بینی می‌شود که اعمال نیرو هنگامی که جسم در مرکز قرار دارد (یعنی تغییرمکان صفر است)، می‌تواند سبب خارج‌شدن جسم از حالت تعادل شود و هنگامی که جسم در یکی از دو انتها قرار دارد (سرعت صفر است)، جسم بالقوه تمایل به بازگشت به حالت تعادل دارد، که نیازی به اعمال نیرو به سازه نیست.^[۳۱] ولتاژ اعمال‌شده 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 گونه‌ی 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، «(NL)» و «(NM)» 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 - سرعت در حالت کنترل غیرفعال طراحی شده است. نمای کلی نمودار نیرو - سرعت



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

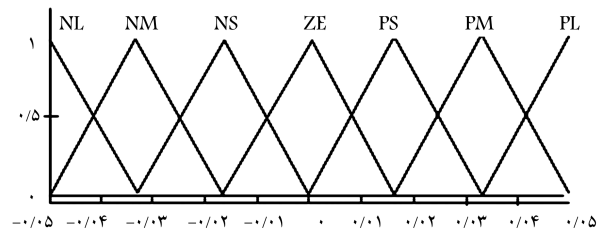
جدول ۳. پایگاه قواعد فازی در کنترل‌گر فازی نوع دو با ۲ ورودی.

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

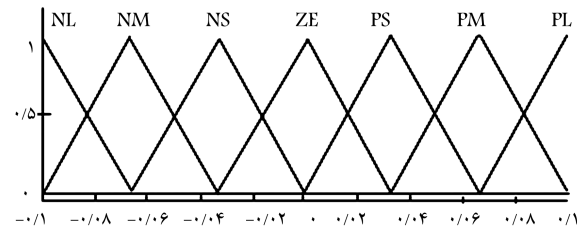
هنگامی که درجه آزادی به نقطه‌ی C نزدیک می‌شود، در واقع در حال بازگشت به حالت تعادل است. کل این روند در طول مدت زمان وقوع زلزله تکرار می‌شود. در هنگام طراحی جدول ۳ پیش‌بینی شده است که بعضی از حالت‌های تغییر مکان و سرعت، هرگز به‌طور هم‌زمان اتفاق نخواهند افتاد. هر چند قوانینی که طراحی شده‌اند، براساس منطقی 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 (تغییر مکان، سرعت و شتاب)

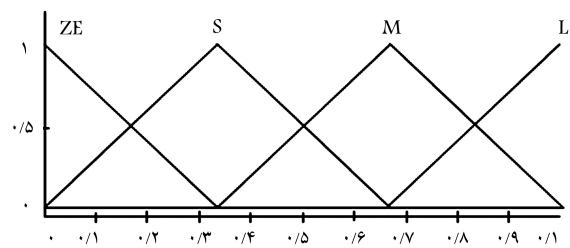
در این حالت کنترل‌گر فازی نوع سه، ۳ ورودی (تغییر مکان، سرعت، و شتاب) و ۱ خروجی (ولتاژ) دارد و همانند حالت‌های قبل، توابع عضویت مثلثی شکل هستند؛ که به‌منظور جلوگیری از طولانی‌شدن نوشتار، از آوردن شکل این توابع در اینجا صرف‌نظر شده است. کنترل‌گر فازی نوع سه ذکر شده، ۲۱ قانون دارد که تصویر سه‌بعدی آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. منطقی که برای به‌دست‌آوردن قوانین فازی در این حالت استفاده شده است، همانند منطقی 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 تغییر مکان مربوط به یکی از شتاب‌نگاشت‌ها انتخاب شده است، که با توجه به بازه 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 تغییر مکان و پیدا کردن 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.



الف) تابع عضویت تغییر مکان؛



ب) تابع عضویت سرعت؛



ج) تابع عضویت ولتاژ.

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

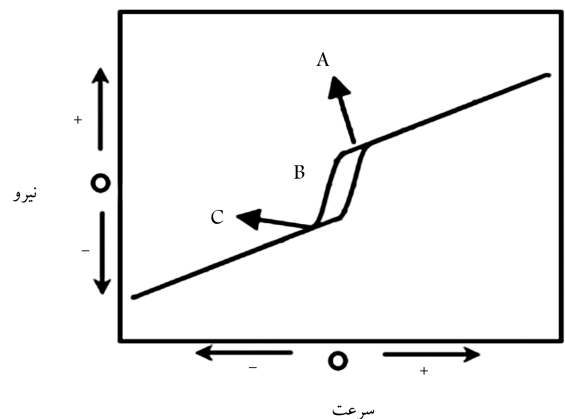
۳.۵. مقایسه‌ی عملکرد سیستم‌های کنترل پیشنهادی در کاهش

پاسخ‌های پیل

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.

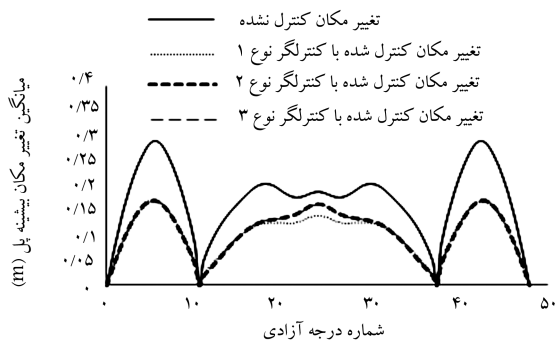
به‌طور کلی عملکرد مدل ۲-۱ در دهانه‌ی وسطی بهتر از عملکرد مدل ۱ است، اما در دهانه‌های کناری میزان کاهش پاسخ در دو مدل ۱ و ۲-۱ تقریباً یکسان است. کنترل‌گرهای فازی در مدل ۲-۱ تقریباً عملکرد یکسان دارند، اما عملکرد کنترل‌گر نوع اول در درجات آزادی میانی در دهانه‌ی وسطی کمی بهتر از دو کنترل‌گر فازی نوع دوم 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

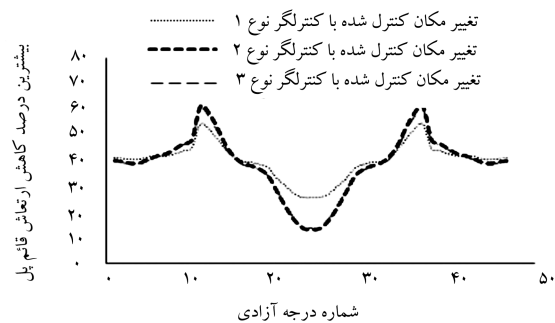


شکل ۱۰. نمای کلی نمودار نیرو-سرعت در حالت کنترل غیرفعال.

در حالت کنترل غیرفعال (با ولتاژ ۰ و ۱) در شکل ۱۰ ارائه شده است. در نمودار ذکر شده، هنگامی که جسم (درجه آزادی) در نقطه‌ی A است و بیشترین سرعت را دارد (به عبارت 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 (به عبارت دیگر از مرکز دور می‌شود)، از مقدار ولتاژ اعمال‌شده کاسته می‌شود. زمانی که درجه آزادی در نقطه‌ی B قرار دارد، سرعت تقریباً صفر است (به عبارت 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).

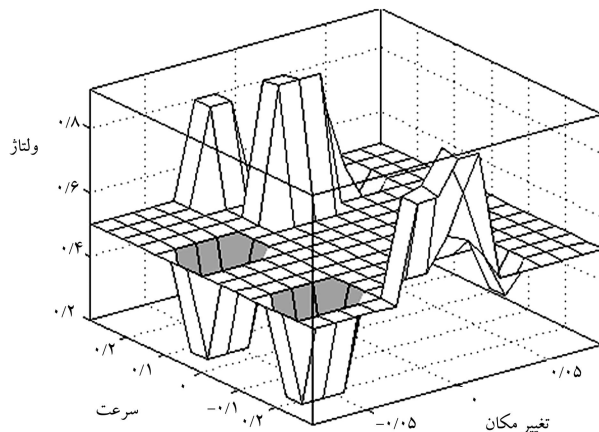


الف) مقایسه تغییر مکان ها در حالت های مختلف؛

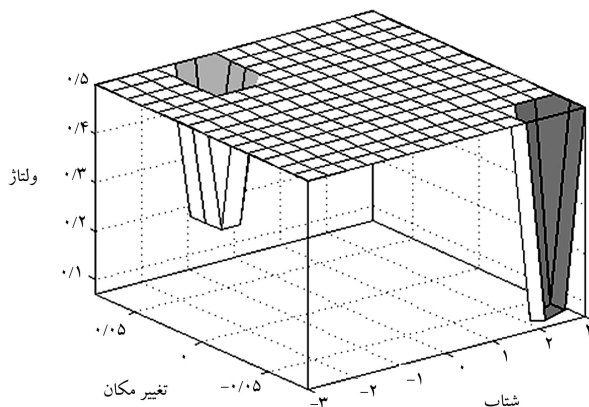


ب) درصد کاهش در حالت های مختلف.

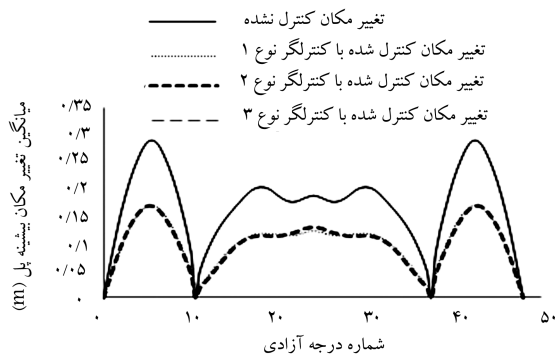
شکل ۱۲. میزان کاهش میانگین بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان پل تحت اثر ۱۵ شتاب‌نگاشت توسط میراگر مگنتورولوژیک و منطق فازی با ورودی‌های مختلف در مدل ۱.



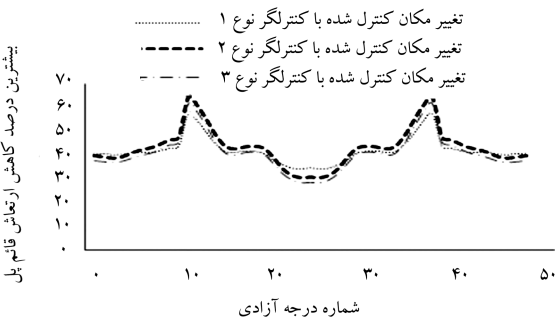
الف) تغییر مکان؛



ب) سرعت؛

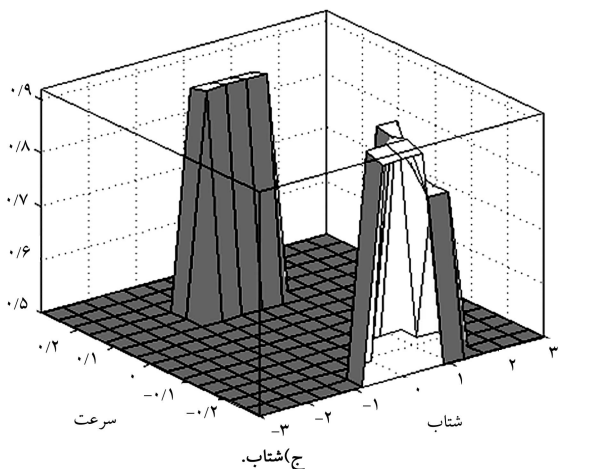


الف) مقایسه تغییر مکان ها در حالت های مختلف؛



ب) درصد کاهش در حالت های مختلف.

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



ج) شتاب.

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

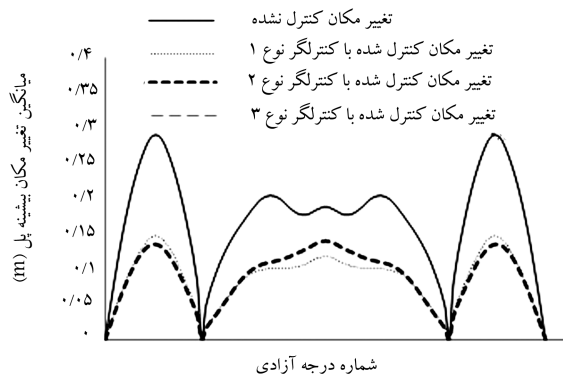
فازی در این مدل تقریباً عملکرد یکسانی در دهانه‌های کناری دارند و پاسخ سازه را تقریباً بین ۵۰ تا ۶۵ درصد کاهش می‌دهند. لازم به ذکر است که عملکرد کنترل‌گر فازی با ۲ ورودی در دهانه‌های کناری، اندکی بهتر از سایر کنترل‌گرهاست. در دهانه‌ی وسطی، کنترل‌گر فازی با ۱ ورودی بهترین عملکرد را دارد و پاسخ سازه را 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 بررسی شده در پژوهش حاضر دارد.

و از میراگر بزرگ مقیاس ۲۲۰۰ کیلو نیوتنی 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 ۱-۲ و ۲-۲). در مدل ۱، چهار میراگر؛ در مدل ۲-۲، 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 خرابای صلب پیشنهاد شده است. برای هر کدام از مدل‌های ذکر شده، 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 اعمال شده به میراگر است. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

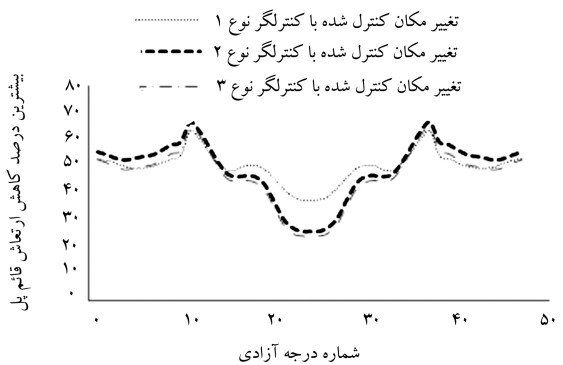
۱. کنترل‌گر فازی نوع یک با ۱ ورودی و ۳ قانون بین ۳ کنترل‌گر فازی پیشنهادی به عنوان کنترل‌گر بهینه انتخاب شده است، زیرا با تعداد ورودی و قوانین کمتر، کاهش پاسخ بهتری دارد.

۲. جهت بهینه‌سازی تعداد و موقعیت نصب میراگرها، و استفاده‌ی بهتر از نیروی میراگرها، مدل‌های ۱ و ۲-۲ و ۲-۲ پیشنهاد شده‌اند، که در دو مدل ۱-۲ و ۲-۲، ایده‌ی استفاده از خرابای صلب مطرح شده است، که بسیار هم مناسب عمل کرده است و نتایج مطلوبی دارد. درصد کاهش پاسخ در دو مدل ۱-۲ و ۲-۲ نسبت به مدل ۱ بیشتر است. در مدل ۱ از ۴ میراگر؛ در مدل ۱-۲ از ۶ میراگر؛ و در مدل ۲-۲ از ۸ میراگر استفاده شده است. مؤثرترین مدل جهت کاهش پاسخ‌های تغییر مکان پل، مدل ۲-۲ با کنترل‌گر فازی نوع یک با ۱ ورودی است. البته این مسئله به معنای ناکارآمد بودن 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 خرابا 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.



الف) مقایسه تغییر مکان‌ها در حالت‌های مختلف؛



ب) درصد کاهش در حالت‌های مختلف.

شکل ۱۴. میزان کاهش میانگین بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان 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 قرار گرفته است. برای مطالعات عددی، پل معلق وینسنت توماس واقع در لوس‌آنجلس آمریکا به عنوان مثال عددی انتخاب

پانویس‌ها

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).

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., Ikhoulane, 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)