

تحلیل لرزه‌های پل‌های کابلی خودایستا به کمک تحلیل دینامیکی

غیرخطی در حوزه فرکانس: تأثیر گسیختگی کابل‌های متوالی

مهدی یزدانی*

داود فراهانی

دانشیار مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران،

کارشناسی ارشد مهندسی زلزله،

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه اراک، اراک

m-yazdani@araku.ac.ir

farahani.davood.99@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۰

چکیده

تجربیات ناشی از ساخت پل حاکی از آن است که بروز خرابی جزئی نظیر گسیختگی کابل در پل‌های کابلی خودایستا که سازه‌هایی مهم و گران‌قیمت هستند، در زمان ساخت و حتی بهره‌برداری، ناگزیر است. با توجه به قرارگیری برخی از این پل‌ها در مناطقی با خطر لرزه‌خیزی زیاد و لزوم سرویس‌دهی این سازه‌ها پس از زلزله، در پژوهش حاضر تأثیر گسیختگی کابل‌های متوالی بر ظرفیت لرزه‌ای نهایی پل‌های کابلی خودایستا در حوزه فرکانس بررسی شده است. برای این منظور در گام نخست پل یادبود بیل امرسون در نرم‌افزار اپنسیس^۱ مدل‌سازی و پس از اعتبارسنجی، سازه تحت شدت‌های مختلف زلزله سوپراستیشن‌هیلز^۲ تا لحظه خرابی مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفت و پاسخ شتاب، سرعت و جابه‌جایی وسط عرشه در هر سه جهت و نوک پایه در دو جهت طولی و عرضی رصد شد. در ادامه با بهره‌گیری از تبدیل فوریه نتایج در حوزه فرکانس استخراج و با استفاده از روش طیف توان پیک‌های مهم فرکانسی انتخاب و با فرکانس‌های اصلی پل مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم گسیختگی دو کابل دارای نقص، ظرفیت پل کاهش چشمگیری ندارد؛ اما با گسیختگی سه کابل دارای نقص ظرفیت لرزه‌ای پل کاهش یافته و با تغییر محتوای فرکانسی پل باعث وقوع پیک‌های فرکانسی در فرکانس‌های ارتعاشی سازه می‌شود. همچنین در تابع انتقال مشخص شد که حساسیت پاسخ عرشه در راستای عرضی نسبت به جهت‌های دیگر به علت پهنای باند وسیع‌تر، بیشتر است که این موضوع نشان می‌دهد ضوابط مربوط به کنترل و طراحی سختی پیچشی عرشه در استانداردها باید دقیق‌تر مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: خرابی پیش‌رونده؛ پل‌های کابلی خودایستا؛ حوزه فرکانس؛ طیف توان؛ تابع انتقال

۱. مقدمه

اخیراً موضوع بررسی تاب‌آوری و پایداری زیرساخت‌های مهم در جوامع پایدار به منظور مدیریت زیرساخت‌ها اهمیت پیدا کرده است [۱]. پل‌های کابلی

* نویسنده مسئول

خودایستا ابرسازه‌های شاخصی هستند که با قابلیت ساخت و اجرا در دهانه‌های بلند و کمینه نمودن فعالیت اجرایی در دهانه رودخانه و یا دره از سایر پل‌ها متمایز هستند و از زیرساخت‌های ضروری و مهم در سیستم حمل و نقل به شمار می‌روند [۲، ۳]. ایده استفاده از طناب یا زنجیر جهت بهبود ظرفیت باربری المان‌های افقی یا عمودی چندان جدید نیست و از گذشته‌های دور در مهار دکل‌های بادبان کشتی‌ها و چادرها استفاده می‌شده است. در سال ۱۶۱۷ میلادی وراتیوس ایتالیایی برای اولین بار اقدام به ساخت پلی نمود که در آن از المان‌های مایل جهت مهار عرشه استفاده شده بود. در سال ۱۸۲۳ مارک سگوین برای اولین بار از سیم‌های آهنی برای ساخت پل استفاده نمود [۴، ۵]. در پل‌های کابلی اولیه دستیابی به توزیع یکنواخت بار بین کابل‌ها بسیار مشکل بود. همچنین نواقص و عیوب ایجاد شده حین ساخت و نصب به راحتی می‌توانست منجر به توزیع نامتعادل نیرو بین کابل‌ها شود. به همین دلیل برای دهه‌ها، ترجیح مهندسين استفاده از پل معلق بود [۵]. در طی جنگ جهانی دوم بالغ بر ۱۵۰۰۰ پل در آلمان غربی تخریب شده بود. این واقعیت ضرورت توسعه راه‌حل‌های نوآورانه برای بازسازی این سازه‌ها در زمان کوتاه را ایجاد می‌کرد. برای این منظور ایده استفاده از سیستم کابلی خودایستا به عنوان روش کارآمد برای ترکیب مزایایی چون زمان ساخت و نصب کوتاه، زیبایی و هزینه نسبتاً کم مجدداً در کانون توجه قرار گرفت. اولین پل کابلی مدرن در سال ۱۹۵۶ در سوئد توسط یک طراح آلمانی به نام دیچینجر ساخته و به بهره‌برداری رسید. دهانه اصلی این پل ۱۸۳ متر بود [۵].

در این پل‌ها، کابل‌ها اعضای بسیار مهمی هستند که احتمال بروز آسیب و گسیختگی ناشی از عواملی چون خوردگی، سایش، خستگی، برخورد وسایل نقلیه و غیره

در آن‌ها وجود دارد. گسیختگی کابل و ایجاد بارهای تکانشی می‌تواند باعث گسترش خرابی به دیگر بخش‌های پل و وقوع خرابی پیش‌رونده شود. بارزترین ویژگی خرابی پیش‌رونده مربوط به آسیب نهایی است که می‌تواند بسیار گسترده‌تر از آسیب اولیه‌ای باشد که باعث خرابی شده است [۶]. انفعال تعدادی از کابل‌های پل ریو-آنتریوی یونان در اثر برخورد صاعقه و آتش‌سوزی، گسیختگی کابل در پل مزکالای مکزیک در اثر برخورد وسایل نقلیه و تجربیات ناشی از ساخت پل در سراسر جهان حاکی از این واقعیت است که بروز خرابی جزئی نظیر گسیختگی کابل در این سازه‌های مهم و البته گران‌قیمت، در زمان ساخت و حتی بهره‌برداری، ناگزیر است [۷]. برای این منظور پژوهش‌های بسیاری تأثیر گسیختگی کابل(ها) را بر رفتار این سازه‌ها بررسی نموده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

ولف و استارسک طی پژوهشی در سال ۲۰۰۹ به بررسی گسیختگی کابل و خرابی پیش‌رونده در پل‌های کابلی خودایستا تحت بار ثقلی پرداختند. در این پژوهش مشخص شد که گسیختگی یک کابل اگرچه باعث وقوع خرابی پیش‌رونده نمی‌شود اما افزایش چشمگیر لنگر خمشی در عرشه را به دنبال دارد [۸]. شنگ‌کائو و هوآن‌کو در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر گسیختگی کابل بر رفتار پل‌های کابلی دهانه بلند خودایستا پرداختند. پل مورد بررسی در این پژوهش دارای دهانه‌ای به طول ۶۰۰ متر بود. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که گسیختگی یک کابل منجر به افزایش قابل توجه نیرو در کابل‌های مجاور خواهد شد، لذا در هنگام جایگزینی کابل گسیخته شده، ارزیابی کابل‌های موجود جهت جلوگیری از خرابی ضروری است. همچنین گسیختگی دورترین کابل قرار گرفته نسبت به پایه‌ها، بیشترین تأثیر را بر تغییرات

نیرویی و مقاومت پل داشته و می‌تواند باعث ایجاد جابه‌جایی افقی چشمگیر در پایه‌ها شود؛ بدین منظور ارزیابی جابه‌جایی المان‌های پل هنگام تعویض کابل آسیب‌دیده به‌منظور اطمینان از عملکرد ایمن پل ضروری است [۹].

مروس و آپاریکو در سال ۲۰۱۰ طی پژوهشی پاسخ پل‌های کابلی خودایستا را به سبب گسیختگی ناگهانی یک کابل بررسی نمودند. در این پژوهش ۱۰ پل کابلی خودایستا با آرایش متفاوت کابل‌ها، مقاطع عرشه مختلف و چیدمان متفاوت کابل‌ها شامل قرارگیری در یک و دو صفحه بررسی شد. نتایج نشان داد که گسیختگی کابل باعث ایجاد لنگر خمشی قابل توجهی بر روی پایه‌ها و به تبع آن بحرانی شدن حالت حدی نهایی مربوطه جهت طراحی پایه‌ها خواهد شد [۱۰].

سامالی و همکاران در سال ۲۰۱۵ تأثیر الگوی بارگذاری و شکل مقطع عرشه را بر خرابی پیش‌رونده در پل‌های کابلی خودایستا بررسی نمودند. در این پژوهش سناریوهای مختلفی شامل گسیختگی یک و چند کابل در نظر گرفته شد. نتایج حاصله نشان داد که استفاده از مقاطع مختلف برای عرشه و تفاوت در سختی پیچشی آن تأثیر اندکی بر احتمال فروریزش سازه پس از انهدام یک یا دو کابل دارد. همچنین سناریوهایی بحرانی هستند که در آن‌ها کابل‌های دورتر نسبت به پایه دچار گسیختگی شوند [۱۱].

داس و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی خرابی پیش‌رونده در پل‌های کابلی خودایستا پرداختند. در این پژوهش مشخص شد که میانه عرشه و انتهای پایه‌های پل بحرانی‌ترین نقاط به لحاظ تجربه جابه‌جایی ناشی از گسیختگی کابل هستند و هرچه فاصله کابل گسیخته شده از پایه‌ها کمتر باشد، احتمال خرابی کلی سازه کمتر خواهد بود [۱۲].

گسیختگی کابل در زمان بهره‌برداری پل و عدم منظور نمودن حالات بار غیرعادی نظیر زلزله فرض مسلم پژوهش‌های مورد اشاره بوده است. قرارگیری برخی از پل‌های کابلی خودایستا در مناطقی با لرزه‌خیزی بالا مانند پل رینبو در توکیو و پل آکاشی‌کیکو در کوبه [۱۳] منجر به پژوهش‌هایی شده است که در آن‌ها رفتار دینامیکی این سازه‌ها هنگام زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. برای نمونه در پژوهش نیاعمران و حسینی کرانی در سال ۱۴۰۰ ارزیابی عملکرد جداساز غلتکی درون قفس بر رفتار خرابی پیش‌رونده پل‌های کابلی حین زلزله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که احتمال گسیختگی در کابل‌هایی که فاصله بیشتری از پایه‌ها دارند به مراتب بیشتر از کابل‌هایی است که در نزدیکی پایه‌های پل قرار گرفته‌اند. همچنین استفاده از جداساز غلتکی درون قفس با استفاده از مکانیسم خودنگه‌دار سبب می‌شود جابه‌جایی‌های ماندگار و جابه‌جایی حداکثر عرشه تحت رکوردهای لرزه‌ای به مراتب کمتر شده و کابل‌های مجاور کابل گسیخته شده تحت نیرویی با شدت کمتری قرار گیرند. این امر موجب جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده در پل خواهد شد [۱۴].

فراهانی و یزدانی در سال ۱۴۰۲ به بررسی تأثیر گسیختگی کابل‌های متوالی بر ظرفیت لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا پرداختند. نتایج حاکی از آن است که پل‌های کابلی خودایستا دارای ظرفیت لرزه‌ای نهفته‌ای هستند و گسیختگی سه کابل متوالی در آن‌ها اگرچه باعث افزایش چشمگیر جابه‌جایی عمودی عرشه خواهد شد ولی تغییر چشمگیری در ظرفیت لرزه‌ای این پل‌ها ایجاد نمی‌کند. همچنین نتایج بیان‌گر آن بود که با افزایش تعداد کابل‌های دارای نقص و گسیخته شده حین زلزله از سه به چهار و پنج کابل، ظرفیت لرزه‌ای پل به شدت کاهش یافته و گسیختگی به دیگر

کابل‌های سازه سرایت نموده و باعث خرابی کلی سازه خواهد شد [۱۳].

همان‌طور که مشخص است در اکثر پژوهش‌ها پاسخ لرزه‌ای پل‌ها در حوزه زمان مورد بررسی قرار گرفته است. در حوزه فرکانس اکثر مطالعات بر روی بارهای غیرلرزه‌ای مانند عبور قطار [۱۴] یا تحت اثر نیروهای آیرودینامیکی باد [۱۵] بوده است. در مورد تحلیل لرزه‌ای پل‌ها در حوزه فرکانس می‌توان به مطالعات اتونی و همکاران اشاره نمود [۱۶]. آن‌ها با استفاده از تحلیل‌های حوزه فرکانس نشان دادند که ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های انعطاف‌پذیر مانند پل‌های معلق، تنها با تکیه بر پاسخ‌های زمانی امکان‌پذیر نیست و بررسی محتوای فرکانسی و حساسیت مودهای سازه نسبت به تحریک زمین می‌تواند درک دقیق‌تری از مسیر انتقال انرژی فراهم کند. این مطالعه با معرفی رویکردی فرکانس‌محور برای تحلیل سازه‌های پیچیده، نشان داد که تغییرات سختی و نامنظمی‌های موضعی می‌توانند موجب جابه‌جایی انرژی بین مودهای مختلف شوند؛ موضوعی که در تحلیل‌های صرفاً زمانی پنهان می‌ماند. نتایج آن‌ها اهمیت ویژه تحلیل فرکانسی را در تشخیص رفتارهای پنهان و مودهای مشارکت پایین برجسته کرد. همچنین در مطالعه دیگری فروکاوا و کاواماتسو به ارزیابی لرزه‌ای پایه پل‌های بتن مسلح با استفاده از تحلیل زمان-فرکانس پرداختند [۱۷]. در این روش با استفاده از ۱۲ تحلیل دینامیکی غیرخطی آسیب‌پذیری پایه پل را براساس توابع انتقال محاسبه نمودند. ویی و همکاران به بررسی رفتار پل‌های رودخانه‌ای تحت اثر زلزله در حوزه فرکانس پرداختند [۱۸]. نتایج آن‌ها نشان داد که با تغییر عمق آب، مشخصات دینامیکی پل در بر اثر زلزله تغییر می‌کند.

با توجه به عدم قطعیت‌های فراوان پدیده زلزله به عنوان یک تحریک و همچنین پیچیدگی‌هایی که در رفتار

پل‌های کابلی خودایستا وجود دارد، هدف از مقاله پیش‌رو تحلیل پل بیل امرسون در حوزه فرکانس به علت تحریکات لرزه‌ای با در نظر گرفتن خرابی کابل‌های متوالی در پل است تا بتوان تغییر رفتار پل‌های کابلی خودایستا را در هنگام وقوع زلزله و با فرض احتمال وقوع خرابی پیش‌رونده به کمک حساسیت فرکانسی پاسخ‌ها پایش نمود.

۲. مدل‌سازی عددی

در این پژوهش پل یادبود بیل امرسون جهت بررسی و تحلیل انتخاب شده است. پل یادبود بیل امرسون با طولی بالغ بر ۱۲۰۶ متر بر روی رودخانه می‌سی‌سی‌پی واقع شده است و بزرگراه ۳۴ ایالتی میسوری و ۱۴۶ ایلینویز را به هم متصل می‌نماید [۱۹]. این پل در ۱۳ دسامبر ۲۰۰۳ بر روی ترافیک گشوده شد. به سبب نقش مهم این پل به عنوان گذرگاه اصلی رودخانه می‌سی‌سی‌پی و قرارگیری آن در منطقه‌ی لرزه‌خیز نیومادرید، ملاحظات لرزه‌ای در طراحی آن به صورت ویژه مورد توجه قرار گرفته است [۲۰]. این پل از دو پایه و ۱۲۸ عدد کابل تشکیل شده است. دهانه‌های میانی و کناری (بخش اصلی پل به صورت کابلی) به ترتیب دارای طول ۳۵۰/۶ متر و ۱۴۲/۷ متر هستند [۲۰]. شکل ۱ نمایی از این پل را نشان می‌دهد.

عرشه این پل برای عبور چهار خط ترافیکی و دو مسیر باریک دوچرخه طراحی شده است و از یک دال بتنی پیش‌تنیده به ضخامت ۰/۲۷۹ متر، تیرهای عرضی و شاه‌تیرهای طولی تشکیل شده است.



شکل ۱. نمایی از پل بیل امرسون [۱۹]

در پل بیل امرسون کابل‌ها از ۱۹ الی ۵۴ استرندها^۳ که دارای قطری برابر با ۱۵/۷ میلی‌متر هستند تشکیل شده است. کابل‌ها دارای تنش گسیختگی ۱۸۶۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۱۹۹/۹ گیگاپاسکال هستند [۱۳].

در این پژوهش برای ساخت مدل اجزای محدود پل از نرم‌افزار اپنسیس استفاده شده است. نرم‌افزار اپنسیس یک نرم‌افزار اجزای محدود است که به طور تخصصی در حوزه سامانه‌های عملکردی خاک و سازه تحت زلزله طراحی شده است. این نرم‌افزار به صورت رایگان در دسترس همگان بوده و کد برنامه‌نویسی آن به صورت باز است. این نکته مهم که از جمله مزایای این نرم‌افزار به شمار می‌رود سبب شده که اصلاح کمبودها و تکمیل تدریجی این نرم‌افزار توسط افرادی که در سراسر دنیا از آن استفاده می‌کنند با سرعت قابل توجهی صورت پذیرد. این نرم‌افزار توسط زبان برنامه‌نویسی TCL کدنویسی شده است که قابلیت گسترش و تولید انواع مقاطع سازه‌ای و غیرسازه‌ای در ارتباط با تحلیل را شامل می‌شود [۲۱]. قابلیت ارتباط متقابل با نرم‌افزار متلب نیز از دیگر ویژگی‌هایی است که می‌تواند کاربر را در روند مدل‌سازی سازه‌های پیچیده یاری نماید. در پژوهش حاضر از ویراست ۲.۴.۶ نرم‌افزار اپنسیس استفاده شده است.

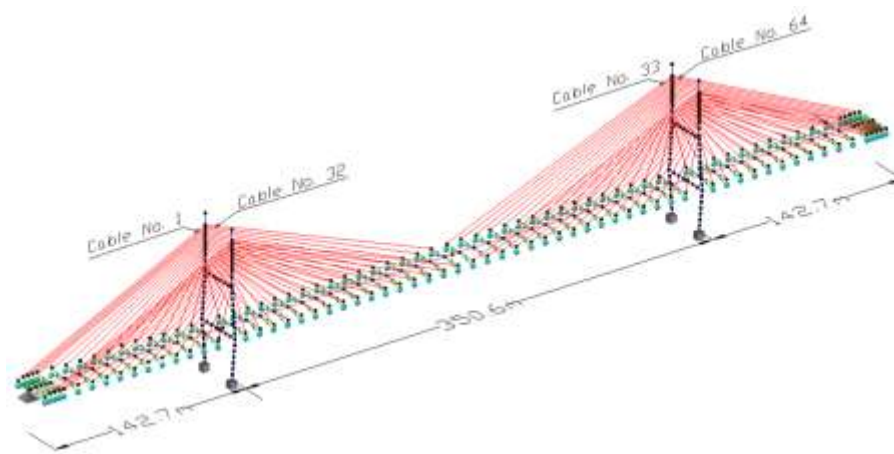
برای مدل‌سازی پل‌های کابلی خودایستا بر مبنای روش اجزای محدود، شیوه‌های مختلفی وجود دارد. تفاوت این روش‌ها بیشتر در مدل‌سازی عرشه نمایان است. به همین منظور، جهت مدل‌سازی عرشه، شیوه‌هایی نظیر استفاده از یک المان تیر، استفاده از دو و سه المان تیر، استفاده از المان تیر با اصلاح جرم (تیر اساسی) و مدل‌سازی کامل با المان پوسته و تیر توسعه یافته است [۲۰، ۲۲]. استفاده از روش تیر اساسی و مدل‌سازی کامل عرشه از جمله شیوه‌های مرسوم و مورد اقبال پژوهشگران در مدل‌سازی عرشه پل‌های کابلی خودایستا هستند. در رویکرد عرشه کامل، مدل‌سازی دال بتنی عرشه و شاه‌تیرهای کناری توسط المان پوسته و المان تیر صورت می‌پذیرد. اگرچه رفتار عرشه با اتخاذ این رویکرد هرچه بیشتر به واقعیت نزدیک خواهد بود؛ پیچیدگی ساخت مدل ریاضی سازه و هزینه محاسباتی بسیار بالا در این رویکرد از معایب آن به شمار می‌آید. در رویکرد تیر اساسی از المان‌های تیر با مشخصات مکانیکی معادل با عرشه جهت مدل‌سازی استفاده می‌شود که توسط المان صلب عرضی به محل کابل‌ها می‌رسد. به عبارتی دیگر، در این روش با تبدیل بتن به مقطع معادل فولاد (یا بالعکس)، مشخصات مکانیکی مقطع عرشه حول محور قوی و ضعیف محاسبه شده و به المان تیر اختصاص می‌یابد. جرم عرشه نیز به صورت متمرکز در طرفین المان تیر قرار می‌گیرد. این جرم‌ها توسط المان صلب به تیر متصل می‌شوند [۲۰]. در این پژوهش با لحاظ هزینه محاسباتی و دقت مورد نیاز، از رویکرد تیر اساسی برای مدل‌سازی عرشه استفاده شده است.

به سبب پیچیدگی سازه و مشخص نبودن محل ایجاد مفاصل پلاستیک، برای مدل‌سازی پایه‌ها از المان تیرستون با پلاستیسیته گسترده استفاده شده است که از مزایای این المان، تطابق رفتاری نزدیک به واقعیت

الاستیسیته معادل همه کابل‌ها ۱۹۸/۶ گیگاپاسکال منظور شده است [۱۳].

در نهایت مطابق با شکل ۲ مدل اجزای محدود پل مورد نظر در نرم‌افزار اپنسیس تهیه شده است. لازم به ذکر است که مدل عددی در مجموع از ۴۹۳ گره، ۲۶۴ لینک صلب، ۱۲۸ المان خرابی صرفاً کششی، ۶۴ المان تیر-ستون الاستیک و ۱۶۲ المان تیر-ستون غیر الاستیک با پلاستیسیته گسترده تشکیل شده است. پس از تهیه مدل عددی، جهت اعتبارسنجی آن از تحلیل مودال استفاده شده است. با انجام تحلیل مودال بر روی مدل اجزای محدود پل، فرکانس سه مود

است. برای مدل‌سازی کابل‌ها از المان خرابی همسان‌گرد و مصالح uniaxialMaterial ElasticPP استفاده شده است. این مصالح دارای رفتار الاستوپلاستیک کامل است که جهت منظور نمودن رفتار صرفاً کششی کابل‌ها، مقدار کرنش فشاری حد تسلیم در آن صفر منظور شده است. همچنین؛ برای در نظر گرفتن اثرات شکم‌دادگی کابل‌ها، از مدول الاستیسیته معادل استفاده شده است. شایان ذکر است که در این پژوهش جهت کاهش حجم محاسبات، با میانگین‌گیری از محاسبات به دست آمده مدول



شکل ۲. مدل عددی ساخته شده از پل بیل امرسون به همراه شماره گذاری کابل‌های آن

است؛ در پژوهش حاضر فرض بر این بوده است که در حالت سرویس، پل دارای رفتاری طبیعی است و همه کابل‌ها در ظاهر دارای عملکردی صحیح هستند اما در هنگام وقوع زلزله به سبب وجود نقص در برخی از کابل‌ها، آن‌ها قادر به تحمل افزایش تنش احتمالی ناشی از زلزله نیستند و چنانچه میزان اضافه تنش از پنج درصد تنش در حالت سرویس فراتر رود گسیخته شده و از مدار باربری خارج می‌شوند. همچنین چنانچه میزان تنش در کابل‌های باقیمانده از حد تسلیم آن‌ها فراتر رود، آن‌ها نیز از مدار باربری خارج خواهند شد که برای این منظور از دستور حذف کابل در نرم‌افزار

اول به ترتیب برابر با ۰/۳۱۶، ۰/۴۱۲ و ۰/۴۳۹ هرتز محاسبه شد که با مقادیر ۰/۳۳۹، ۰/۴۰ و ۰/۴۸۴ هرتز ارائه شده در پژوهش چن و همکاران دارای تطابق نسبتاً خوبی است و میانگین خطاهای سه مود اول برابر شش درصد است [۱۹].

۳. خرابی پیش‌رونده

با توجه به اینکه بار مرده پل‌های کابلی حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد کل بار وارد شده به سازه را تشکیل می‌دهند [۲۳] و از طرفی همزمانی وقوع زلزله با حالتی که در آن حداکثر بار زنده بر پل اعمال شده باشد، نامحتمل

پنسیس استفاده شده است. با توجه به اینکه احتمال گسیختگی در کابل‌هایی که در فاصله بیشتری از پایه‌ها قرار دارند به مراتب بیشتر از کابل‌هایی است که در نزدیکی پایه‌های پل قرار گرفته‌اند [۶]، الگوی کابل‌های دارای نقص براساس شماره‌گذاری انجام شده در شکل ۲ در هر یک از حالت‌های مختلف گسیختگی مطابق با جدول ۱ لحاظ شده است.

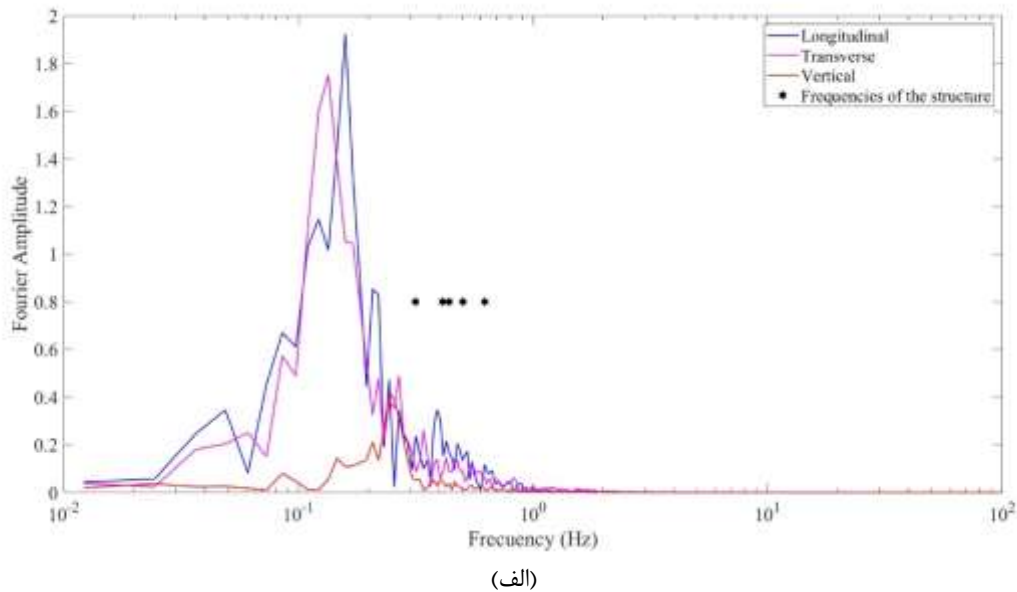
جدول ۱. الگوی منظور نمودن کابل‌های دارای نقص در تحلیل

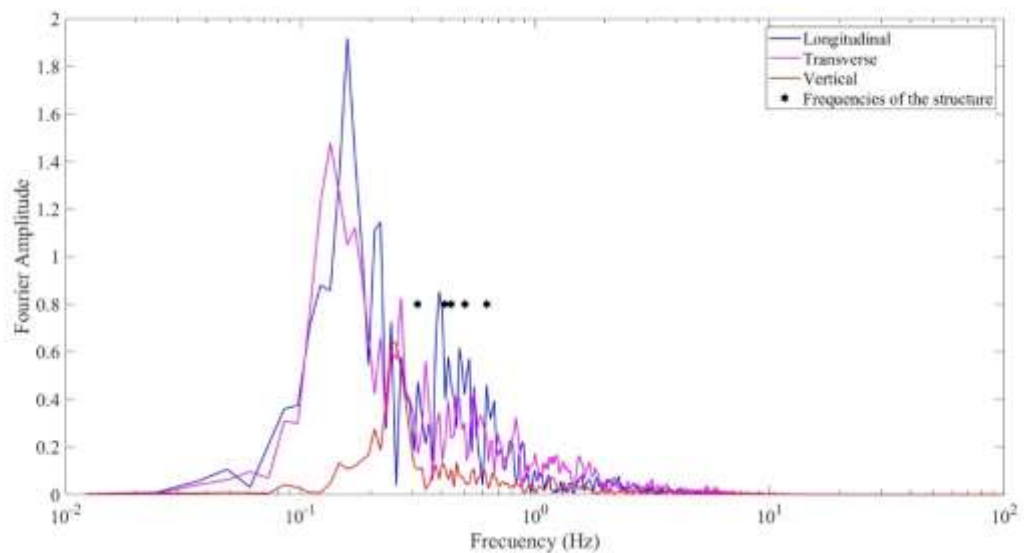
خرابی پیش‌رونده	
حالت گسیختگی شماره کابل‌های دارای نقص	
۱	۳۳
۲	۳۴، ۳۳
۳	۳۵، ۳۴، ۳۳
۴	۳۶، ۳۵، ۳۴، ۳۳

همان‌طور که مشخص است در پژوهش حاضر براساس تحلیل‌های اولیه انجام شده چهار حالت خرابی متوالی در نظر گرفته شده است؛ زیرا که در حالت بعدی پایداری کلی پل از بین رفته است و سازه توانایی تحمل نیرو را ندارد.

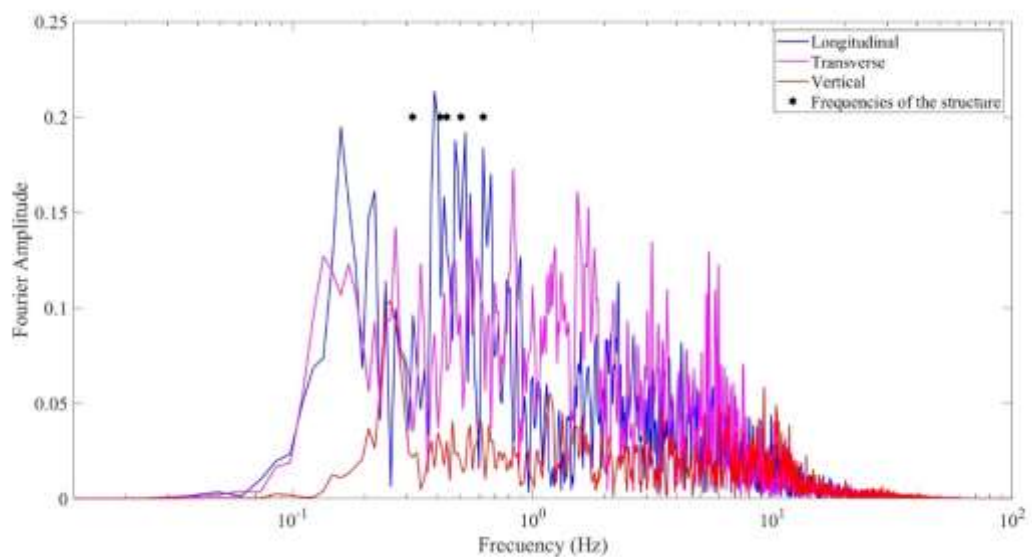
۴. انتخاب رکورد زلزله

به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، رکورد زلزله سوپراستیشن‌هیلز با بزرگای ۶/۵ ریشتر و بیشینه شتاب ۰/۳۶ g برحسب g که در فاصله ۱۸/۲ کیلومتری از گسل رخ داده است انتخاب شد. این رکورد یکی از رکوردهای مندرج در آیین‌نامه FEMAP695 است [۲۴]. محتوای فرکانسی زلزله و طیف پاسخ رکورد انتخاب شده در مقیاس نیمه‌لگاریتمی در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همچنین به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای سازه در مقابل این زلزله، فرکانس‌های اصلی سازه نیز نشان داده شده است.



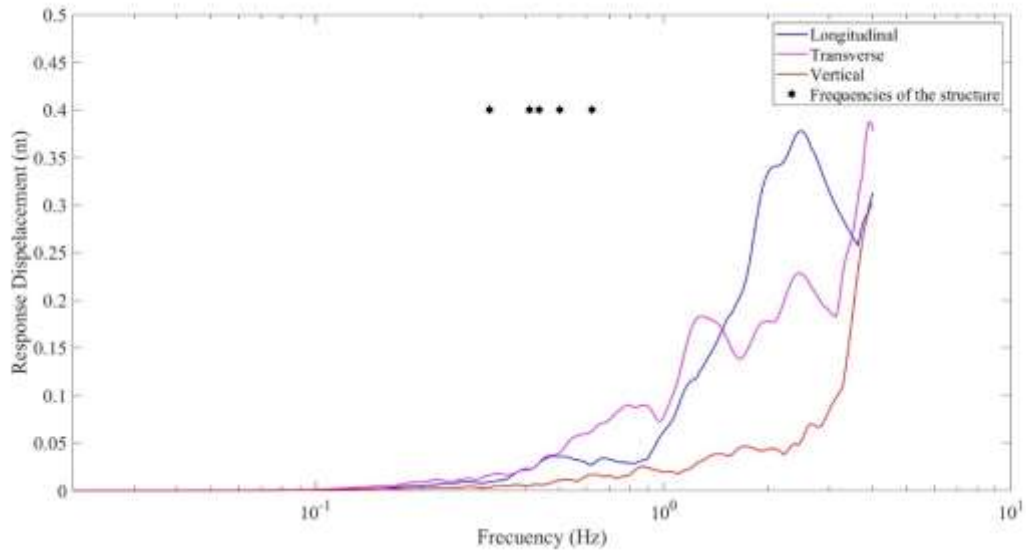


(ب)

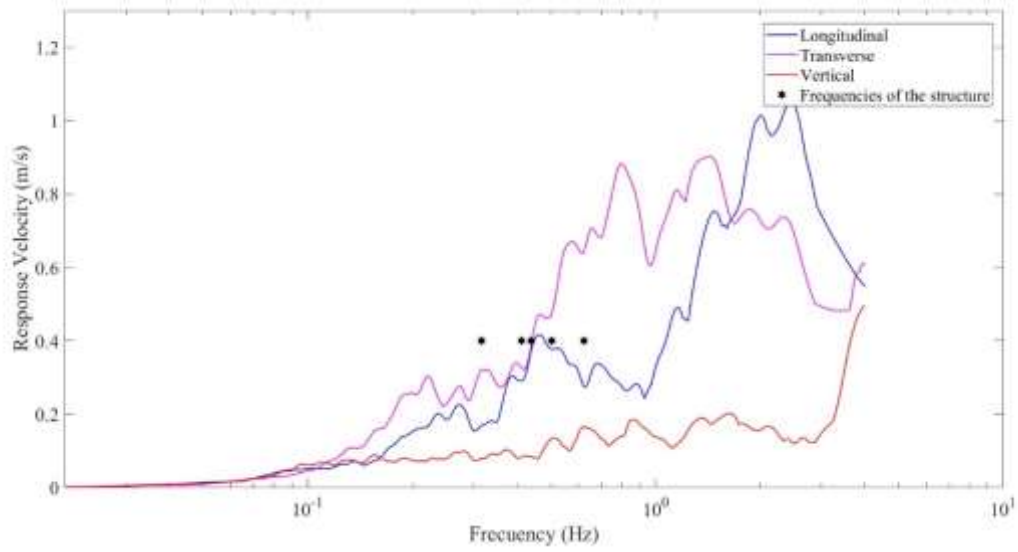


(ج)

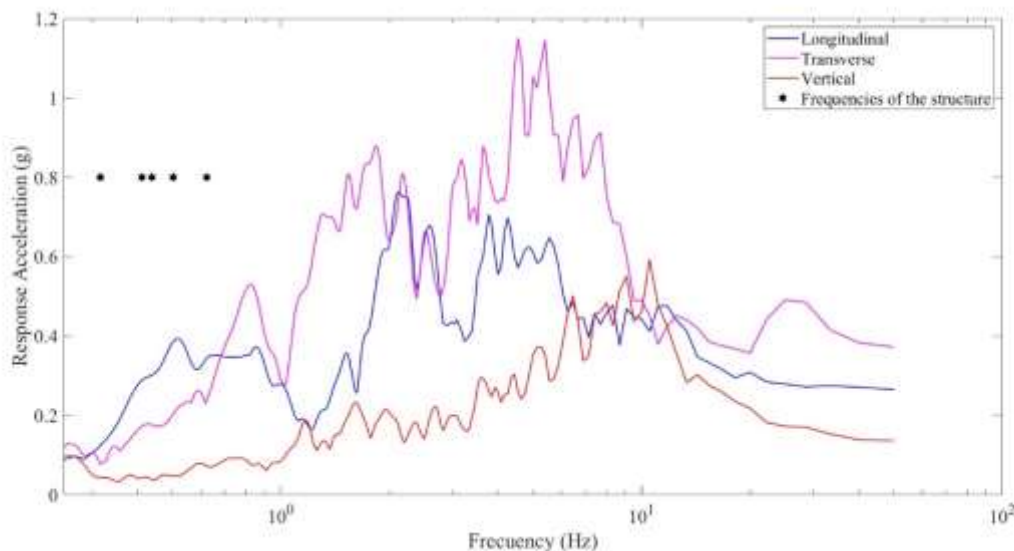
شکل ۳. محتوای فرکانسی رکورد زلزله سوپر استیشن هیلز: الف) جابجایی، ب) سرعت و ج) شتاب



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. طیف پاسخ رکورد زلزله سوپراستیشن هیلز: الف) جابجایی، ب) سرعت و ج) شتاب

۵. تحلیل دینامیکی فزاینده

در این پژوهش به منظور محاسبه حداکثر ظرفیت پل تحت اثر تحریک زلزله از تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شده است. بدین منظور پس از مقیاس نمودن بیشینه شتاب رکورد زلزله به g ، جهت پوشش گستره مناسبی از شدت‌های زلزله، رکورد زلزله با بیشینه شتاب $0.05g$ تا لحظه خرابی با گام افزایشی حداکثر $0.1g$ به سازه اعمال می‌شود و با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی پاسخ سازه استخراج می‌شود. این فرایند برای هر یک از حالت‌های گسیختگی کابل دارای نقص تکرار شده و در نهایت ظرفیت سازه به دست می‌آید. لازم به ذکر است که جهت بازتاب نتایج منطقی پاسخ‌های سازه تحت تحریک زلزله، سازه به صورت چندمؤلفه‌ای بوده است، به عبارت دیگر سازه همزمان تحت تأثیر هر سه مؤلفه شتاب زلزله قرار گرفته است [۲۵]. جدول ۲ مؤلفه‌های به کار برده شده به منظور تحلیل دینامیکی فزاینده را نشان می‌دهد.

۶. نتایج

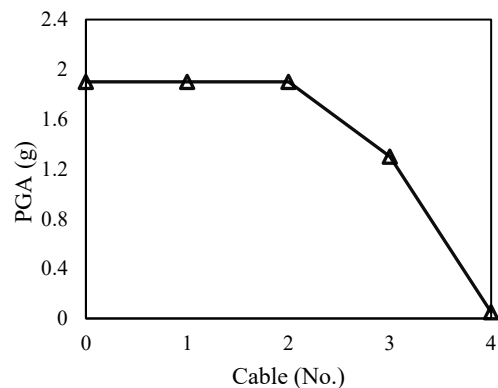
۶-۱. ظرفیت پل

با انجام ۷۱ تحلیل دینامیکی غیرخطی ظرفیت نهایی پل در لحظه خرابی مطابق شکل ۵ استخراج شده است. در این نمودار محور افقی نشان‌دهنده تعداد کابل‌های دارای نقص و محور عمودی بیان‌گر بیشینه شتاب قابل تحمل پل برحسب شتاب گرانش است. همان‌طور که مشخص است، گسیختگی یک و دو کابل دارای نقص نسبت به حالت بدون

جدول ۲. پارامترهای به کار برده شده برای تحلیل تاریخچه‌زمانی

ردیف	مؤلفه	شرح
۱	نسبت میرایی [۲۰]	سه درصد
۲	ضرایب میرایی رایلی [۲۶]	$\alpha = 0.075$ $\beta = 0.013$
۳	گام زمانی تحلیل	نصف گام زمانی رکورد اعمالی
۴	الگوریتم حل [۲۷]	نیوتون و کیریلوف-نیوتون
۵	انتگرال‌گیر تحلیل دینامیکی	نیومارک
۶	مؤلفه‌های روش نیومارک [۲۷]	$\gamma = 0.5$ $\beta = 0.25$
۷	نوع آزمون همگرایی [۲۸]	NormDispIncr
۸	دقت همگرایی	0.00001

گسیختگی تفاوت معناداری در بیشینه شتاب قابل تحمل پل ندارد. این در حالی است که گسیختگی سه کابل دارای نقص باعث کاهش ۳۱ درصدی بیشینه شتاب قابل تحمل توسط پل شده است. در حالت وجود چهار کابل دارای نقص بیشینه شتاب قابل تحمل پل با کاهش ۹۷ درصدی همراه بوده است و در بیشینه شتاب‌هایی با بزرگی بیشتر از $0.05g$ با الگوی خرابی زیبایی، سازه پل منهدم شده است. لازم به ذکر است در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، حتی برای زلزله‌های شدید، مقدار حداکثر شتاب طرح معمولاً بسیار کمتر از حدود $2g$ در نظر گرفته می‌شود؛ از این رو می‌توان به ظرفیت لرزه‌ای نهفته و قابل توجه پل‌های کابلی خودایستا اشاره کرد؛ موضوعی که در پژوهش‌های پیشین نیز مورد تأیید قرار گرفته است [۲۹].



شکل ۵. بیشینه شتاب قابل تحمل در حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص

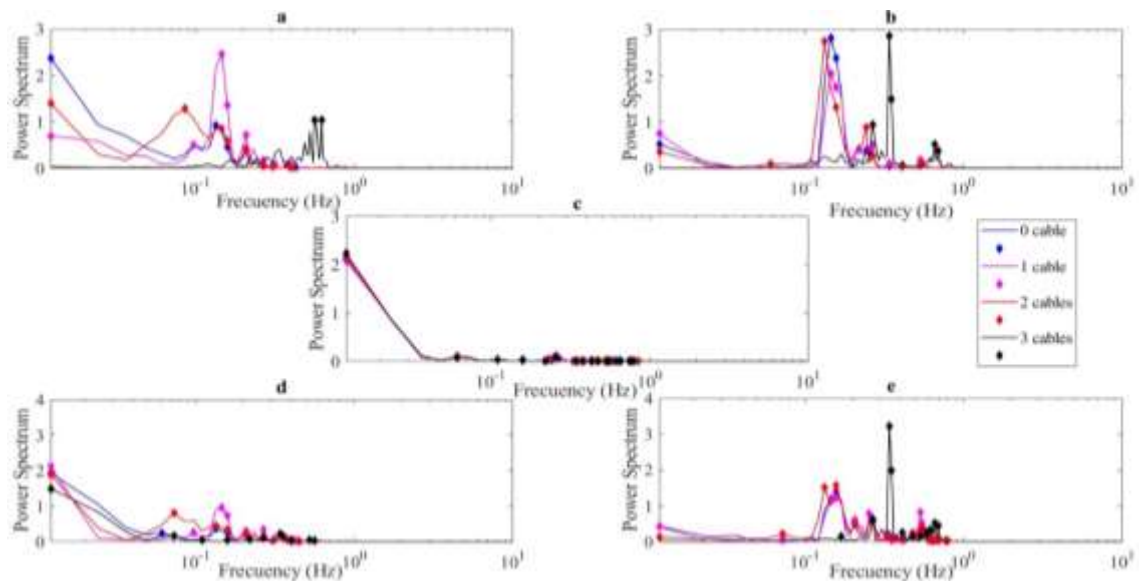
۶-۲. استخراج پاسخ سازه در حوزه فرکانس

با توجه به محتوای فرکانسی زلزله اعمالی و نیز تغییر احتمالی در خصوصیات مکانیکی پل در حین خرابی پیش‌رونده، در این بخش پاسخ سازه در حوزه فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور لازم است که در گام نخست، پاسخ‌های دینامیکی استخراج شده در بیشینه شتاب قابل تحمل سازه با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس در بازه 0.1 تا 10 هرتز تبدیل شود. با توجه به اینکه هدف پژوهش حاضر

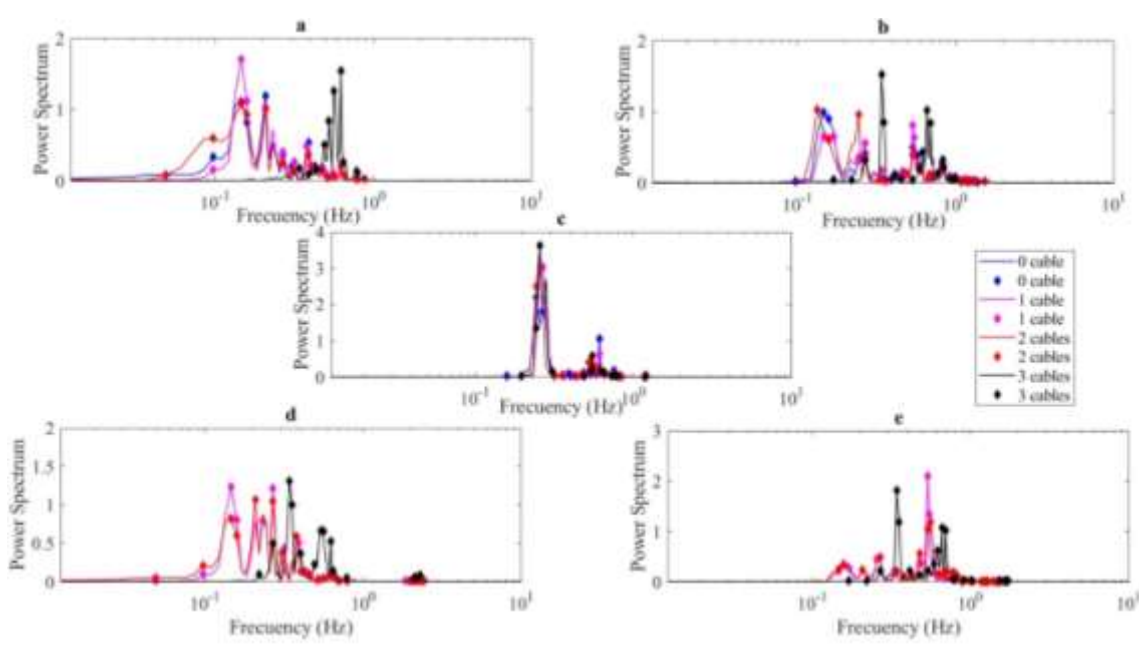
بررسی محتوای فرکانسی پل در لحظه خرابی است، از مجموع ۷۱ پاسخ دینامیکی استخراج شده، چهار پاسخی که منجر به خرابی پل شدند انتخاب شده (مربوط به حالت‌های مختلف نقص کابل) و محتوای فرکانسی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پس از ارائه پاسخ سازه در حوزه فرکانس، در گام بعدی باید پیک‌های مهم و حساس سازه شناسایی شود و با فرکانس‌های اصلی سازه مقایسه شود. برای این منظور با استفاده از طیف توان سری فوریه پیک‌های مهم پاسخ پل شامل جابجایی، سرعت و شتاب مطابق با شکل‌های ۶ تا ۸ استخراج شده است. برای تفسیر بهتر نتایج، پیک‌های انتخابی در طیف پاسخ در شکل‌های ۹ تا ۱۱ و همچنین به صورت مجزا، خلاصه پیک‌های انتخابی در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در این پژوهش از سه پاسخ سازه‌ای شتاب، سرعت و جابه‌جایی در دو نقطه به ترتیب شامل پاسخ افقی و عرضی نوک پایه و پاسخ در هر سه جهت وسط عرشه به‌منظور تفسیر نتایج بهره گرفته شده است. همچنین، پاسخ‌های مربوط به وجود چهار کابل دارای نقص به سبب بیشینه شتاب قابل تحمل بسیار اندک در این حالت (کمتر از $0.05g$)، مورد بررسی قرار نگرفته است.

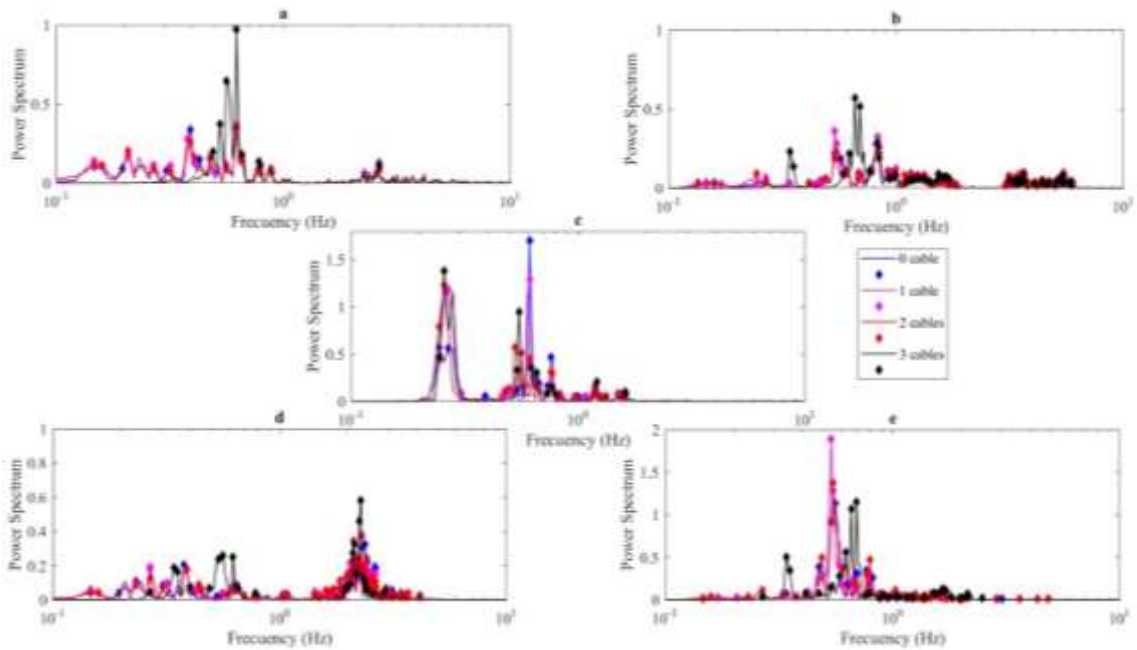
توجه به نتایج بدست آمده (شکل‌های (۶) الی (۱۴)) مشخص است که علی‌رغم گسیختگی دو کابل دارای نقص، ظرفیت پل کاهش چشمگیری ندارد؛ اما با گسیختگی سه کابل دارای نقص پاسخ پل و محتوای فرکانسی آن دچار تغییر می‌شود به‌طوری‌که؛ برخی از پیک‌های فرکانسی پاسخ شتاب عرشه در راستای طولی و عرضی نزدیک به فرکانس مود اول و پنجم ارتعاش سازه اتفاق می‌افتد که این موضوع درباره پاسخ شتاب نوک پایه در راستای طولی و عرضی نیز صادق است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که



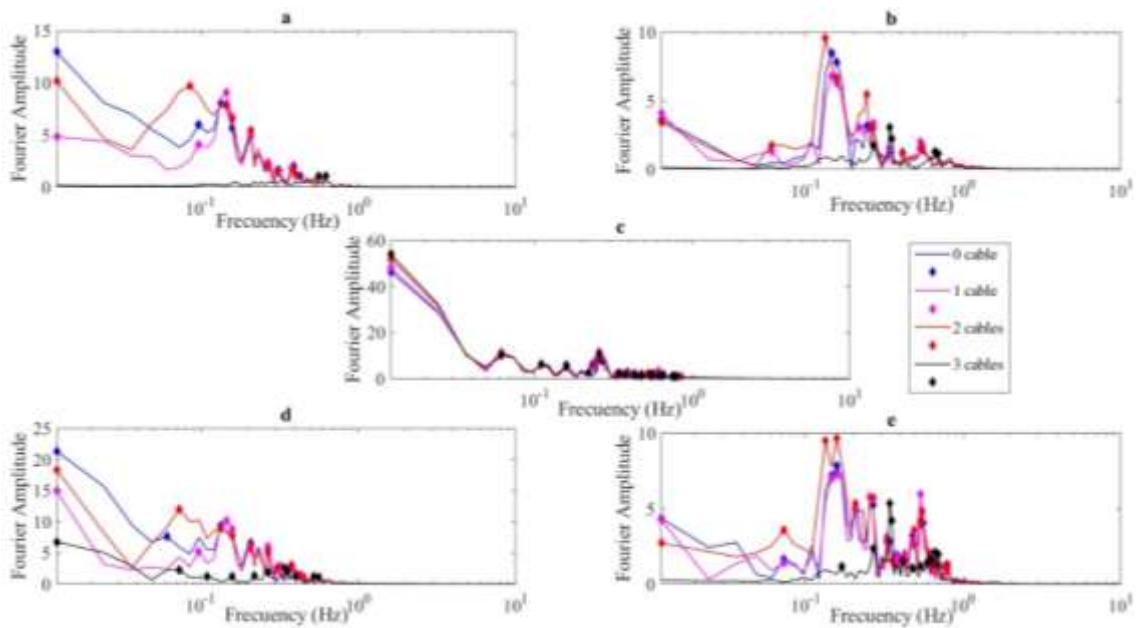
شکل ۶. طیف توان پاسخ جابجایی به همراه نقاط پیک به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی



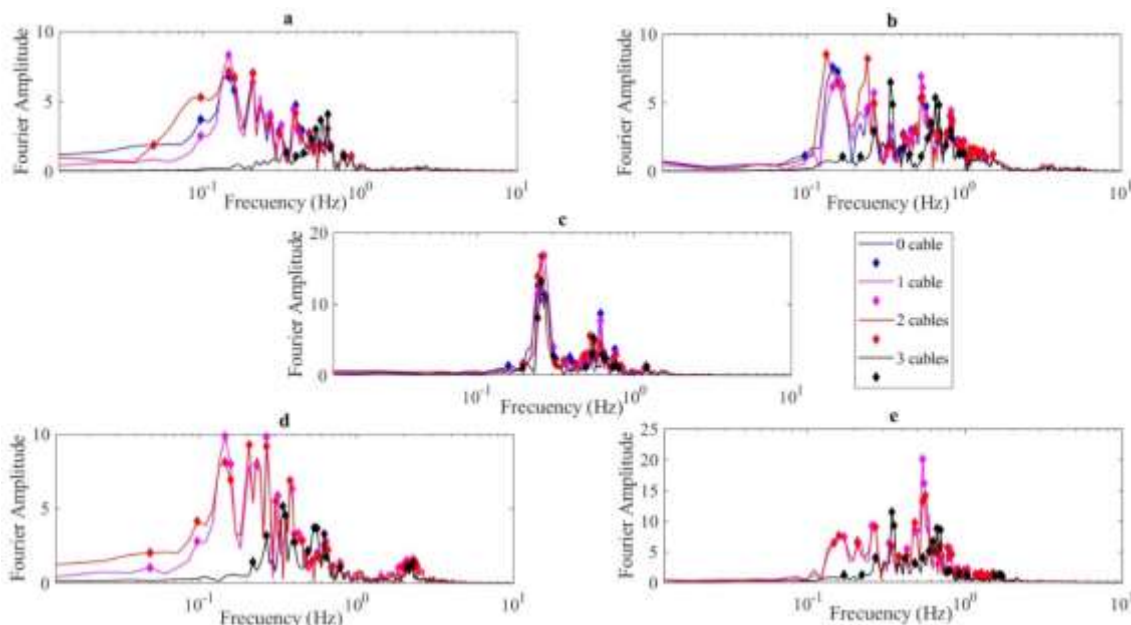
شکل ۷. طیف توان پاسخ سرعت به همراه نقاط پیک به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی



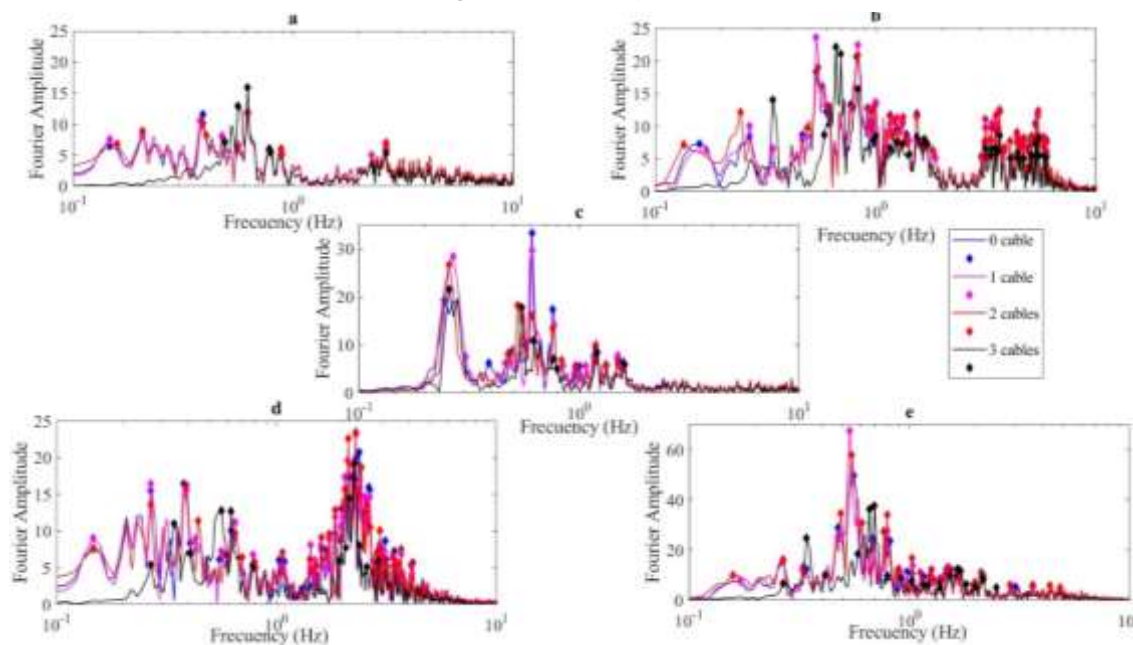
شکل ۸. طیف توان پاسخ شتاب به همراه نقاط پیک به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی



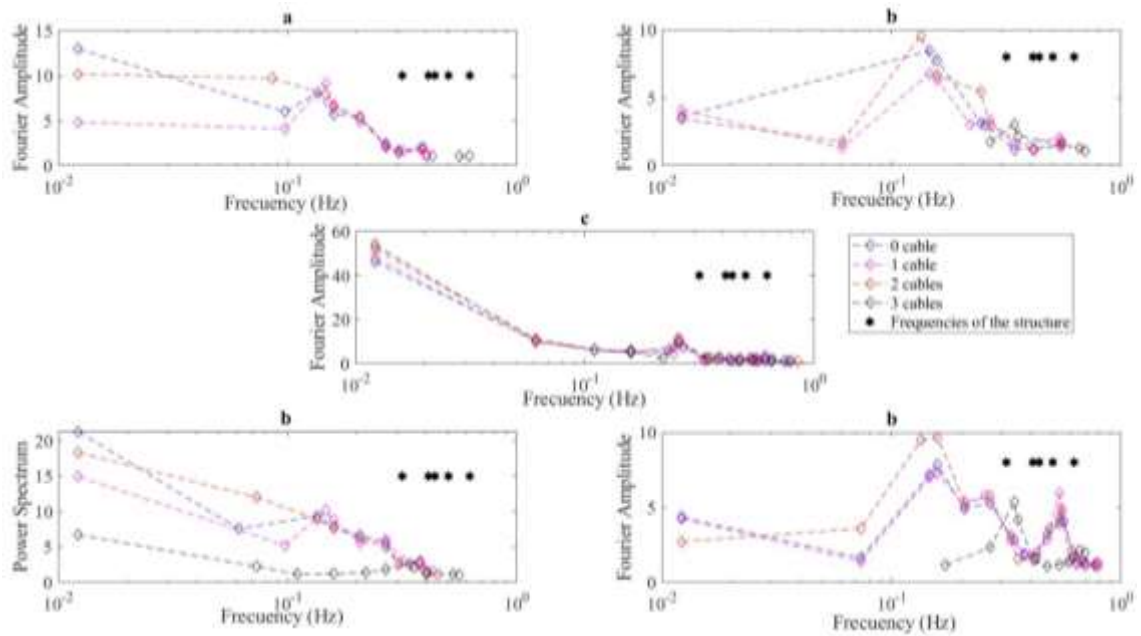
شکل ۹. طیف پاسخ جابجایی فوریه به همراه نقاط پیک به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی



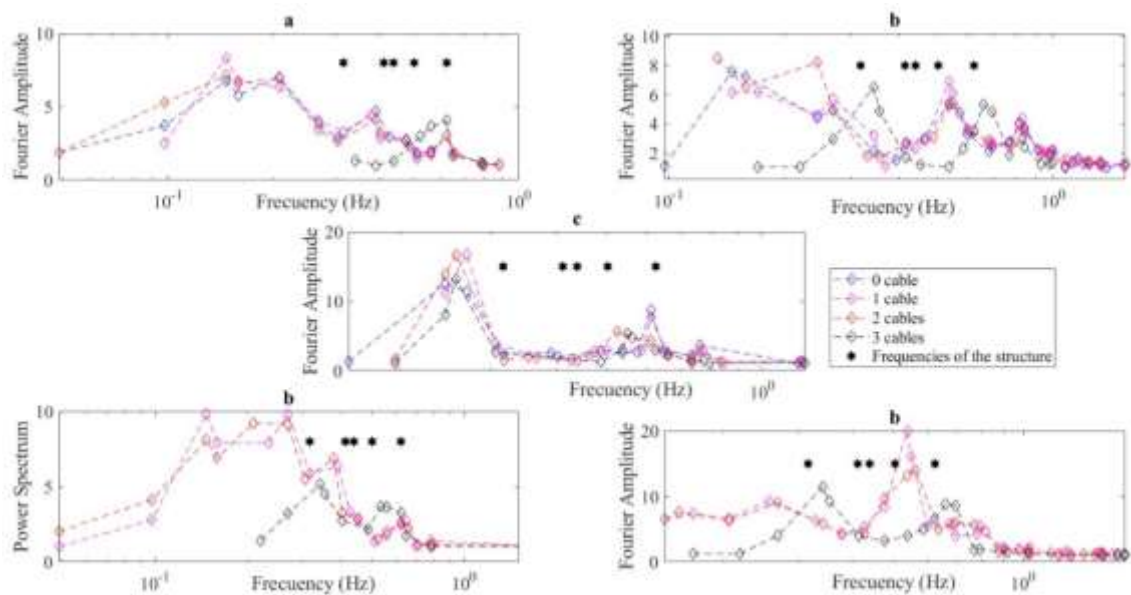
شکل ۱۰. طیف پاسخ سرعت فوریه به همراه نقاط پیک به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی



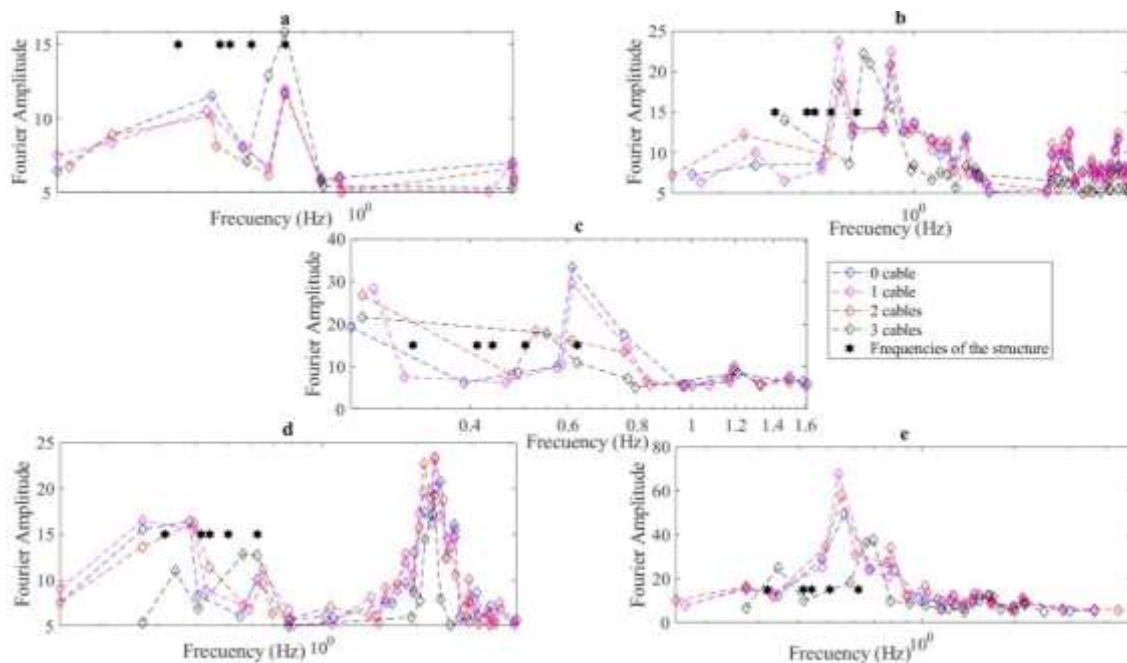
شکل ۱۱. طیف پاسخ شتاب فوریه به همراه نقاط پیک به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی



شکل ۱۲. پیک‌های انتخابی پاسخ جابجایی به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی



شکل ۱۳. پیک‌های انتخابی پاسخ سرعت به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی



شکل ۱۴. پیک‌های انتخابی پاسخ شتاب به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص در بیشینه شتاب قابل تحمل، a: وسط عرشه در راستای طولی، b: وسط عرشه در راستای عرضی، c: وسط عرشه در راستای عمودی و d: نوک پایه در راستای طولی، e: نوک پایه در راستای عرضی

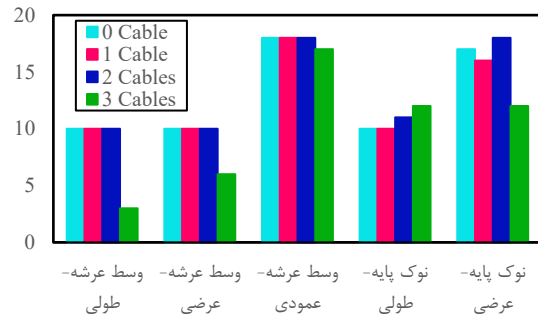
کابل دارای نقص به ترتیب برابر با ۳۰۰ و ۳۵۰ درصد هستند. به منظور درک بهتر این موضوع نمودار تعداد پیک‌های فرکانسی شناسایی شده در نقاط کنترل در حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص در شکل ۱۵ ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، عرشه پیل در راستای عرضی طی زلزله پاسخ‌های نسبتاً شدیدی را تجربه می‌نماید؛ موضوعی که نیازمند بررسی و توجه گسترده‌تری در پژوهش‌های آتی است.

به بیان دیگر، هرچند خرابی پیش‌رونده تا سطح گسیختگی سه کابل موجب کاهش قابل توجه در ظرفیت باربری کلی پل‌های کابلی خودایستا نمی‌شود، اما افزایش محسوس شتاب عرضی عرشه، بیانگر ضرورت بازطراحی و تقویت سختی پیچشی عرشه است. با توجه به احتمال وجود نقص در کابل‌های پل‌های کابلی خودایستا، استانداردهای طراحی موجود

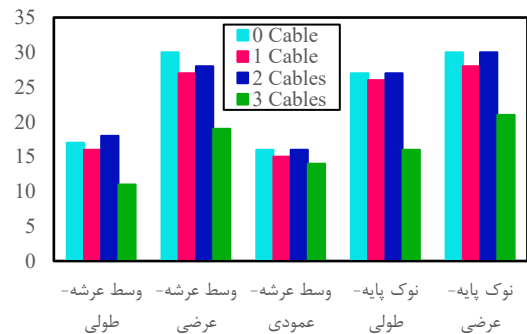
حساسیت پاسخ نوک پایه و وسط عرشه در فرکانس‌های کاملاً متفاوتی رخ داده است، لذا در طراحی این پل‌ها باید به این موضوع توجه نمود. از طرفی دیگر پرواضح است که با خرابی دو کابل محتوای فرکانسی تغییر چندانی ندارد اما با خرابی کابل سوم محتوای فرکانسی پل با تغییرات مهمی مواجه می‌شود که دال بر بروز خرابی پیش‌رونده احتمالی است. نکته دیگری که قابل مشاهده است؛ تعداد پیک‌های فرکانسی در پاسخ شتاب عرشه در راستای عرضی نسبت به دیگر پاسخ‌ها بسیار بیش‌تر است. برای نمونه تعداد پیک‌های فرکانسی پاسخ شتاب عرشه در راستای عرضی حدود ۲۰۰ درصد بیشتر از تعداد پیک‌های فرکانسی پاسخ شتاب عرشه در راستای عمودی و ۲۵۰ درصد بیشتر از تعداد پیک‌های فرکانسی پاسخ شتاب عرشه در راستای طولی در حالت گسیختگی دو کابل دارای نقص است که این اعداد در حالت گسیختگی سه

می‌دهد که اگرچه ظرفیت کلی سازه در حالت گسیختگی سه کابل به صورت قابل توجه کاهش نمی‌یابد، اما سختی پیچشی عرشه به صورت قابل توجه‌ای به محتوای فرکانسی وابسته است. این یافته ضرورت پژوهش‌های گسترده‌تر و در صورت لزوم بازنگری و افزودن بندهای جدید در آیین‌نامه‌های طراحی به‌منظور لحاظ کردن این پدیده را آشکار می‌سازد. به عبارت دیگر نتایج نشان می‌دهد که ضوابط مربوط به طراحی عرشه در راستای طولی و عمودی به خوبی لحاظ شده است اما رفتار عرضی عرشه نیاز به شکل‌پذیر پایه‌ها و متعاقباً داشتن سطح عملکرد بالاتر نسبت به عرشه در هنگام وقوع زلزله؛ آسیب‌پذیری بیشتر پایه‌ها به درستی در ضوابط آیین‌نامه‌ها لحاظ شده است (حساسیت بیشتر پایه‌ها به محتوای فرکانسی).

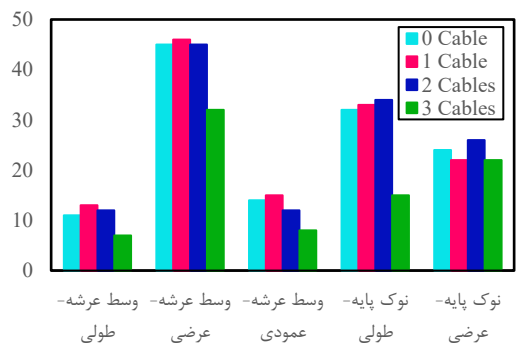
به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر رفتار دینامیکی سازه و تحلیل چگونگی انتقال انرژی لرزه‌ای در دامنه فرکانسی، تابع انتقال مربوط به شتاب عرضی عرشه برای حالت‌های بی‌بعد جابجایی-جابجایی، سرعت-سرعت و شتاب-شتاب محاسبه و در شکل ۱۶ ارائه شده است. این سه حالت امکان مقایسه‌ی هم‌زمان پاسخ سازه در سطوح مختلف مشتقات زمانی را فراهم می‌سازند و به‌ویژه درک عمیق‌تری از سهم باندهای فرکانسی پایین، میانی و بالاتر در تحریک عرضی عرشه تحت سناریوهای مختلف گسیختگی کابل فراهم می‌کنند.



(الف)



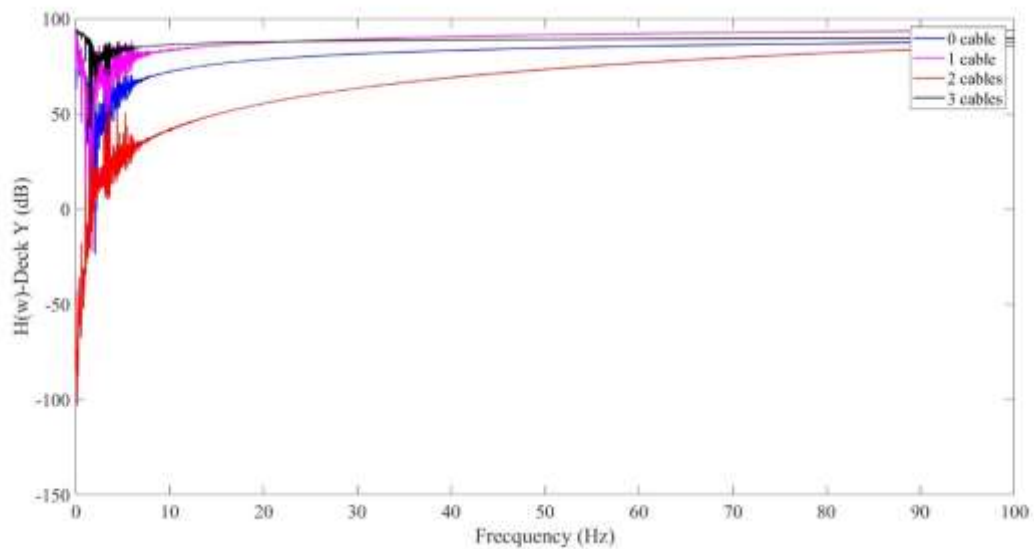
(ب)



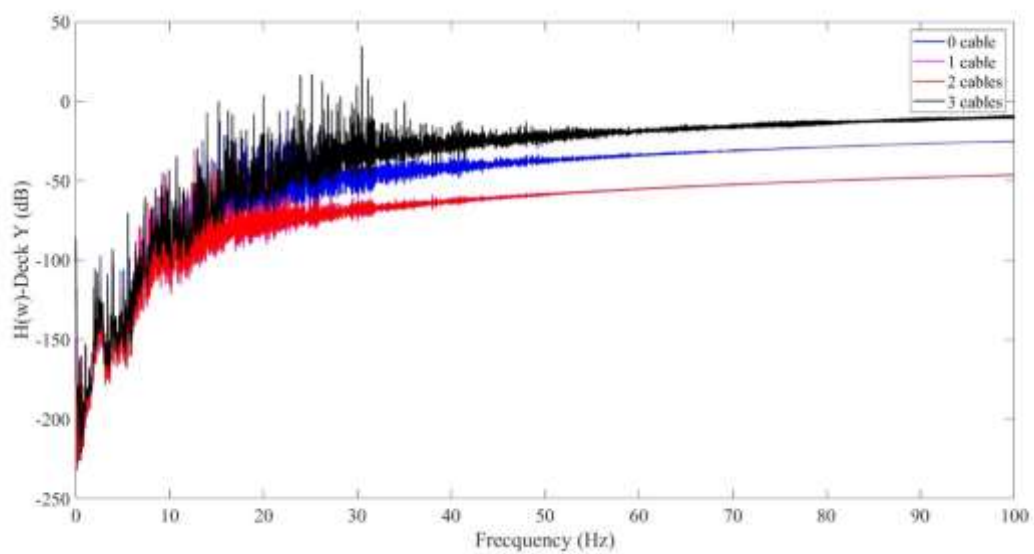
(ج)

شکل ۱۵. تعداد پیک‌های فرکانسی نقاط کنترل در حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص: (الف) جابجایی، (ب) سرعت و (ج) شتاب

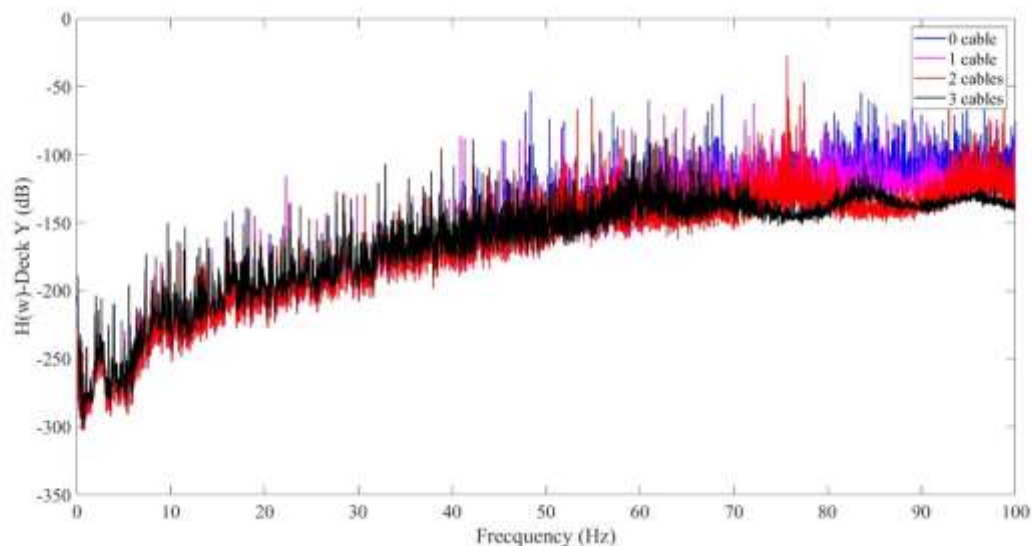
به‌گونه‌ای تدوین شده‌اند که فرض خرابی سه کابل منجر به تغییر قابل توجهی در رفتار و خرابی پیش‌رونده در سازه نشود. با این حال، نتایج این پژوهش نشان



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۶. تابع انتقال برای شتاب جانبی عرشه در حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص: الف) جابجایی - جابجایی، ب) سرعت -

سرعت و ج) شتاب-شتاب

که می‌تواند بر سرویس‌پذیری، خستگی و تمرکز تنش‌های موضعی نیز تأثیرگذار باشد.

۷. نتیجه‌گیری

کابل‌ها در پل‌های کابلی خودایستا از اعضای مهمی هستند که احتمال بروز نقص در آن‌ها به واسطه عواملی چون خوردگی، سایش و خستگی وجود دارد. قرارگیری برخی از این پل‌ها در مناطقی با لرزه‌خیزی زیاد و لزوم سرویس‌رسانی این پل‌ها بعد از زلزله به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی، لزوم درک رفتار این پل‌ها را با فرض گسیختگی احتمالی کابل هنگام وقوع زلزله ایجاب می‌نماید. برای این منظور در پژوهش حاضر تأثیر گسیختگی کابل‌های متوالی بر ظرفیت لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در گام نخست با ایجاد مدل اجزای محدود پل یادبود بیل امرسون و مقایسه سه مود اول مدل با پژوهش چن و همکاران از درستی مدل عددی اطمینان حاصل شد. در گام بعد با فرض این‌که

تابع انتقال شتاب عرضی عرشه نشان می‌دهد که پاسخ پل در چند باند محدود متمرکز نیست، بلکه در دامنه‌ای نسبتاً وسیع از فرکانس‌ها فعال است؛ موضوعی که با تعداد زیاد پیک‌های شتاب در حوزه فرکانس کاملاً هم‌خوانی دارد. قله‌های متعدد و نسبتاً هم‌ارزش در تابع انتقال بیان‌گر آن است که انرژی ورودی زلزله در مودهای مختلف، به‌ویژه مودهای پیچشی و عرضی، توزیع می‌شود. پس از گسیختگی سه کابل متوالی نیز تابع انتقال رفتار گسسته و غیرعادی از خود نشان نمی‌دهد، اما پراکندگی و چندشاخه‌شدن پاسخ افزایش یافته است؛ وضعیتی که بیان‌گر حساسیت بیشتر سیستم به مودهای پیچشی و کاهش سختی پیچشی مؤثر عرشه نسبت به قبل است. بنابراین، اگرچه ظرفیت کلی سازه با خرابی سه کابل افت محسوسی پیدا نمی‌کند، اما تغییرات محتوای فرکانسی و افزایش تعداد پیک‌های عرضی نشان می‌دهد که رفتار لرزه‌ای عرشه در راستای عرضی حساس‌تر بوده و بخش عمده‌ای از انرژی ورودی در این راستا مصرف می‌شود؛ موضوعی

کابل‌های سازه در حین سرویس دارای عملکردی طبیعی هستند لیکن به دلیل وجود نقص، برخی از کابل‌ها توانایی مقاومت در برابر اضافه تنش ناشی از زلزله را ندارند، سازه با استفاده از روش تاریخچه زمانی غیرخطی به ازای شدت‌های مختلف رکورد زلزله مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که پل‌های کابلی خودایستا دارای ظرفیت لرزه‌ای نهفته‌ای هستند (تحمل شتاب 2g) و به گونه‌ای طراحی شده‌اند که گسیختگی سه کابل متوالی در آن‌ها باعث وقوع خرابی پیش‌رونده نمی‌شود، اما چنانچه چهار کابل دارای نقص هنگام زلزله گسیخته شوند، خرابی پیش‌رونده باعث انهدام پل و خرابی پیش‌رونده خواهد شد. از طرفی دیگر با وقوع خرابی پیش‌رونده، محتوای فرکانسی پاسخ پل تغییر نموده و فرکانس سازه به فرکانس‌های تشدید کننده پاسخ نزدیک‌تر می‌شوند.

تحلیل فرکانسی پاسخ‌ها نشان می‌دهد که توزیع انرژی ارتعاشی سازه پس از گسیختگی تغییر کرده است؛ به‌خصوص پاسخ شتاب عرشه در راستای عرضی

به‌مراتب پُرپیک‌تر از سایر جهات و حتی از پاسخ‌های نوک پایه است. این افزایش شمار پیک‌ها و پراکندگی طیفی به‌وضوح نشان می‌دهد که با ایجاد عدم‌تقارن در توزیع سختی (ناشی از گسیختگی کابل‌ها)، تعدادی مود محلی و نیمه‌محلی فعال می‌شوند که پیش از آن در تحلیل صرفاً حوزه زمان آشکار نبودند. در واقع، در سناریوی گسیختگی سه کابل، اگرچه یک قله منفرد و با مشارکت جرم بالا مشاهده نشد، ولی پراکندگی طیفی و چندشاخه‌شدن پاسخ افزایش یافت، وضعیتی که دلالت بر حساسیت افزایش یافته سیستم نسبت به مودهای پیچشی و کاهش مؤثر سختی پیچشی عرشه دارد. بنابراین، با توجه به هزینه‌های سنگین بازسازی و تعمیر زیرساخت‌ها و اهمیت ویژه ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای پل‌ها به نظر می‌رسد که بایستی پژوهش‌های بیشتری (افزایش تعداد رکورد زلزله به همراه مدل‌سازی پل‌های بیشتر) با تکیه بر نتایج این پژوهش صورت پذیرد تا در صورت لزوم منجر به بازنگری و اصلاح ضوابط آیین‌نامه‌ای با تأکید بر تأمین سختی پیچشی عرشه شود.

۸. منابع

- [1] Homaei, F., and Yazdani M. "Seismic Fragility, Loss, and Resiliency of Old Railway Masonry Arch Bridges under near-Field Ground Motion." *Sustainable and Resilient Infrastructure* (2025): 1-28.
- [۲] کشته‌گر، ب.، حلبیان، ا. و هاشم‌الحسینی، ح. "بررسی لرزه‌ای رفتار غیر خطی پل‌های کابلی ایستای دهانه بزرگ"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۸۷.
- [۳] توکلی، ح. و مرادی، م. "ارزیابی حساسیت پاسخ یک پل کابلی دارای جداساز لرزه‌ای تحت زلزله نزدیک به گسل نسبت به تغییرات مصالح"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۱۳۹۹، شماره ۱۲، دوره ۵۲، صفحه ۳۱۴۵-۳۱۶۰.
- [4] Efthymiou, Eleftheria-Anthi. "The Effect of Multi-Angle Spatially Variable Ground Motions on the Seismic Behaviour of Cable-Stayed Bridges." City, University of London, 2019.
- [5] Hyppolito, Henrique Franzener. "Effect of Cable Damage on the Structural Behaviour of a Cable-Stayed Bridge", 2020, Master's Thesis, Universidade do Porto.

- [۶] اسماعیل نیا عمران، م. و حسینی کرانی، ع. "ارزیابی عملکرد جداساز غلطکی درون قفس بر رفتار خرابی پیش‌رونده پل‌های کابلی (مطالعه موردی پل کابلی بیل امرسون)"، نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر، ۱۴۰۰، شماره ۲، دوره ۵۳، صفحه ۶۳۹-۶۵۸.
- [۷] فتح‌الله‌زاده قیصری، ا. "بررسی خرابی پیش‌رونده در پل‌های کابلی ناشی از خرابی کابل نگهدارنده"، ۱۳۹۴، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
- [8] Wolff, Maren, and Uwe Starossek. "Cable Loss and Progressive Collapse in Cable-Stayed Bridges." *Bridge structures* 5, no. 1 (2009): 17-28.
- [9] Kao, Chin-Sheng, and Chang-Huan Kou. "The Influence of Broken Cables on the Structural Behavior of Long-Span Cable-Stayed Bridges." *Journal of Marine Science and Technology* 18, no. 9 (2010): 3.
- [10] Mozos, CM, and AC Aparicio. "Parametric Study on the Dynamic Response of Cable Stayed Bridges to the Sudden Failure of a Stay, Part II: Bending Moment Acting on the Pylons and Stress on the Stays." *Engineering Structures* 32, no. 10 (2010): 3301- 12.
- [11] Samali, Bijan, Yukari Aoki, Ali Saleh, and Hamid Valipour. "Effect of Loading Pattern and Deck Configuration on the Progressive Collapse Response of Cable-Stayed Bridges." *Australian Journal of Structural Engineering* 16, no. 1 (2015): 17-34.
- [12] Das, R, AD Pandey, MJ Mahesh, P Saini, and S Anvesh. "Progressive Collapse of a Cable Stayed Bridge." *Procedia Engineering* 144 (2016): 132-39.
- [۱۳] فراهانی، د. و یزدانی، م. "بررسی تاثیر گسیختگی کابل‌های متوالی بر ظرفیت لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا"، سیزدهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۴۰۲.
- [۱۴] یزدانی، م. و معرفت، م. ص. "بررسی اثر رفتار دینامیکی بار قطار بر پاسخ پل‌های قوسی بتنی غیر مسلح در حوزه فرکانس"، نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش، ۱۳۹۳، شماره ۶، سال ۳، صفحه ۴۷-۵۶.
- [15] Caracoglia, L. & Jones, N. P. "Time domain vs. frequency domain characterization of aeroelastic forces for bridge deck sections." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, no. 3 (2003): 371-402.
- [16] Ettouney, M., Hapij, A., & Gajer, R. "Frequency-domain analysis of long-span bridges subjected to nonuniform seismic motions." *Journal of Bridge Engineering*, 6, no. 6 (2001): 577-586.
- [17] Furukawa, A. & Kawamatsu, Y. "Earthquake Damage Assessment for RC Piers By Time-Frequency Analysis Considering Entire Bridge." *GEOMATE Journal*, 25 no. 111 (2023): 1-8.
- [18] Wei, K., Zhang, J. & Qin, S. "Experimental and numerical assessment into frequency domain dynamic response of deep water rigid-frame bridge." *Journal of Earthquake Engineering*, 26 no. 1 (2022): 307-330.
- [19] Chen, Genda, Dongming Yan, Wenjian Wang, Man Zheng, Louis Ge, and Frank Liu. "Assessment of the Bill Emerson Memorial Cable-Stayed Bridge Based on Seismic Instrumentation Data." (2007).
- [20] Dyke, Shirley J, Juan Martin Caicedo, Gursoy Turan, Lawrence A Bergman, and Steven Hague. "Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges." *Journal of Structural Engineering* 129, no. 7 (2003): 857-72.
- [۲۱] حسینی، م. و کنارنگی، ه. "کاربرد نرم افزار OpenSees در مدل‌سازی و تحلیل سازه‌ها"، تهران: نشر آزاده، ۱۳۹۲.

- [22] Zhu, LD, HF Xiang, and You Lin Xu. "Triple-Girder Model for Modal Analysis of Cable-Stayed Bridges with Warping Effect." *Engineering structures* 22, no. 10 (2000): 1313-23.
- [23] Ren, Wei-Xin, and Makoto Obata. "Elastic-Plastic Seismic Behavior of Long Span Cable-Stayed Bridges." *Journal of Bridge Engineering* 4, no. 3 (1999): 194-203.
- [24] FEMA, P. "Quantification of building seismic performance factors", Washington, DC, (2009).
- [25] Farahmand-Tabar, Salar, and Majid Barghian. "Seismic Assessment of a Cable-Stayed Arch Bridge under Three-Component Orthotropic Earthquake Excitation." *Advances in Structural Engineering* 24, no. 2 (2021): 42-227.
- [26] Domaneschi, Marco, and Luca Martinelli. "Performance Comparison of Passive Control Schemes for the Numerically Improved Asce Cable-Stayed Bridge Model." *Earthquakes and Structures* 3, no. 2 (2012): 181-201.
- [27] Chopra, Anil K. *Dynamics of Structures*. Pearson Education India, 2007.
- [28] McKenna, Frank, G. L. Fenves, and M. H. Scott. "OpenSees: open system for earthquake engineering simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center." University of California, Berkeley, CA, USA. <http://opensees.berkeley.edu> 11 (2004).

[۲۹] پهلوان، ح، میرزا گلنبار روشن، ع. و ناصری، ع. "تحلیل منحنی‌های شکنندگی پل‌ها در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک و دور از گسل (مطالعه موردی پل بیل امرسون)"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۴۰۰، شماره ۵، دوره ۸، صفحه ۱۴۸-۱۶۲.

پی‌نوشت

¹ OpenSees

² Superstition Hills

³ Strand