ISAV2024
چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران
انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران
دانشگاه خوارزمی

بررسی تأثیر گسیختگی کابل بر رفتار لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا در حوزه فرکانس

مهدی یزدانی[آ*] و داود فراهانی[ب]

[آ]ایران، اراک، بلوار کربلا، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی،۳۸۴۸۱۷۷۵۸۴، دانشیار مهندسی سازه

[ب] ایران، اراک، بلوار کربلا، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی،۳۸۴۸۱۷۷۵۸۴، کارشناس ارشد مهندسی زلزله

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: *m-yazdani@araku.ac.ir*

چکیده

کابل‌ها به عنوان اعضای باربر در پل‌های کابلی خودایستا نقش مهمی را ایفا می‌نمایند. شواهد گذشته نشان می‌دهد که در طول عمر بهره‌برداری این سازه‌ها ایجاد آسیب و گسیختگی در کابل‌ها اجتناب ناپذیر است. با توجه به قرارگیری برخی از این پل‌ها در مناطق لرزه‌خیز، 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 برای تهیهٔ مدل عددی در نرم‌افزار اپنسیس انتخاب شد و پس از اعتبارسنجی مدل عددی و فرض وجود تعداد مختلف کابل دارای نقص، سازه تحت شدت‌های مختلف زلزلهٔ سوپراستیشن‌هیلز تا لحظهٔ خرابی مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفت و پاسخ شتاب وسط عرشه در هر سه جهت و پاسخ شتاب نوک برج در دو جهت طولی و عرضی رصد شد. در ادامه با بهره‌گیری از تبدیل فوریه نتایج در حوزهٔ فرکانس استخراج شد و با استفاده از روش طیف توان پیک‌های مهم فرکانسی انتخاب و سپس نتایج با فرکانس‌های اصلی سازه مقایسه شد و پل مورد ارزیابی قرار گرفت. 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 و چنانچه چهار کابل دارای نقص هنگام زلزله گسیخته شوند، خرابی پیش‌رونده باعث فروریزش پل خواهد شد. همچنین مشخص شد که حساسیت پاسخ عرشه در راستای عرضی نسبت به جهت‌های دیگر بیش‌تر است که این موضوع باید در طراحی عرشه در استانداردها بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: خرابی پیش‌رونده؛ تحلیل دینامیکی فزاینده؛ حوزه فرکانس؛ طیف توان.

۱- مقدمه

پل‌های کابلی خودایستا ابرسازه‌های شاخصی هستند که با قابلیت ساخت و اجرا در دهانه‌های بلند و کمینه نمودن فعالیت اجرایی در دهانهٔ رودخانه و یا دره از سایر پل‌ها متمایز هستند [۱, ۲] و از سازه‌های ضروری و مهم در سیستم حمل و نقل به شمار می‌روند [۳]. 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 [۴]. انفصال 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[۵]. بر این اساس پژوهش‌های بسیاری مانند پژوهش ولف و استارسک [۶] و مزوس و آپاریکو [۷] تأثیر گسیختگی کابل(ها) را بر رفتار این سازه‌ها بررسی نموده‌اند. گسیختگی کابل در زمان بهره‌برداری پل و عدم منظور نمودن حالات بار غیر عادی نظیر زلزله فرض مسلم بیشتر پژوهش‌های صورت پذیرفته بوده است. قرارگیری برخی از پل‌های کابلی خودایستا در مناطقی با لرزه‌خیزی بالا مانند پل رینبو در توکیو و پل آکاشی‌کیکو در کوبه [۵]منجر به پژوهش‌هایی شده که رفتار دینامیکی این سازه‌ها را حین زلزله مورد بررسی قرار داده است. در این میان می‌توان به پژوهش نیاعمران و حسینی کرانی [۴]، فتح‌اله زاده قیصری [۸] و پژوهش‌های فراهانی و یزدانی اشاره نمود [۵, ۹]. بیشتر پژوهش‌های انجام شده در تحلیل پل‌ها در حوزهٔ زمان بوده است و پژوهش‌های کمی در حوزه فرکانس انجام گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به پژوهش یزدانی و معرفت اشاره نمود [۱۰]. با توجه به عدم قطعیت‌های فراوان پدیدهٔ زلزله به عنوان یک تحریک و همچنین پیچیدگی‌هایی که در رفتار پل‌های کابلی خودایستا وجود دارد، هدف از مقالهٔ پیش‌رو تحلیل پل بیل امرسون در حوزهٔ فرکانس تحت اثر زلزله به علت خرابی کابل‌های متوالی پل است تا بتوان تغییر رفتار پل‌های کابلی خودایستا را هنگام وقوع زلزله و با فرض احتمال وقوع خرابی پیش‌رونده به کمک حساسیت فرکانسی پاسخ‌ها پایش نمود.

۲- مدل‌سازی عددی

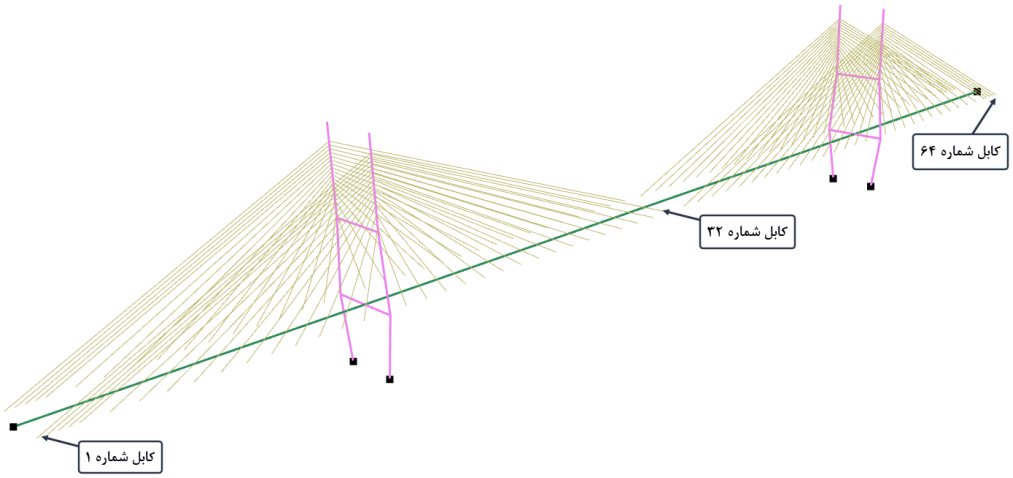
در این پژوهش پل یادبود بیل امرسون جهت بررسی و پژوهش انتخاب شده است. پل یادبود بیل امرسون با طولی بالغ بر ۱۲۰۶ متر بر روی رودخانه می‌سی‌سی‌پی واقع شده است و بزرگراه ۳۴ ایالتی میسوری و ۱۴۶ ایلینویز را به هم متصل می‌نماید. این پل در ۱۳ دسامبر ۲۰۰۳ بر روی ترافیک گشوده شد. به سبب نقش مهم این پل به عنوان گذرگاه اصلی رودخانه می‌سی‌سی‌پی و قرارگیری آن در منطقه‌ی لرزه‌خیز نیومادرید، ملاحظات لرزه‌ای در طراحی آن به صورت ویژه مورد توجه قرار گرفته است. این پل از ۲ 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 [۵]. 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. در پل بیل امرسون کابل‌ها از ۱۹ الی ۵۴ استرند 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 [۵].

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 حوزهٔ سامانه‌های عملکردی خاک و سازه تحت زلزله طراحی شده است. این نرم‌افزار به‌صورت رایگان در دسترس همگان بوده و کد برنامه‌نویسی آن به‌صورت باز است. این نکتهٔ 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 توجه‌ای صورت پذیرد [۱۱]. 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. قابلیت ارتباط متقابل با نرم‌افزار متلب نیز از دیگر ویژگی‌هایی است که می‌تواند کاربر را در روند مدل‌سازی سازه‌های پیچیده یاری نماید [۱۱]. در پژوهش حاضر از ویراست ۲.۴.۶ نرم‌افزار اپنسیس استفاده شده است.

برای ایجاد المان برج‌ها از المان تیرستون با پلاستیسیته گسترده استفاد شده است و برای مدل‌سازی عرشه رویکرد تیر اساسی به‌کار رفته است چراکه باتوجه به ماهیت هندسی و فیزیکی عرشه، مدل‌سازی کامل آن بسیار پیچیده بوده و تلاش‌های محاسباتی را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. 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)، مساحت و ممان اینرسی 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.

برای مدل‌سازی کابل‌ها از المان خرپای همسان‌گرد استفاده شده است. همچنین جهت منظور کردن اثرات شکم‌دادگی کابل‌ها، از مدول الاستیسیته معادل استفاده شده است [۵]. شایان ذکر است که در این پژوهش جهت کاهش حجم محاسبات، با میانگین‌گیری از محاسبات به دست آمده مدول الاستیسیته معادل همهٔ کابل‌ها ۱۹۸/۶ گیگاپاسکال منظور شده است.

در نهایت مطابق با شکل (۱) مدل اجزای محدود پل مورد نظر را در نرم‌افزار اپنسیس تهیه شده است. لازم به ذکر است که مدل عددی در مجموع شامل ۴۹۳ گره، ۲۶۴ لینک صلب، ۱۲۸ المان خرپای صرفاً کششی، ۶۴ المان تیر- ستون الاستیک و ۱۶۲ المان تیر- ستون غیر الاستیک با پلاستیسیتهٔ 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 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 [۱۲] دارای تطابق نسبتاً خوبی است.



شکل ۱. مدل اجزای محدود پل بیل امرسون.

۳- خرابی پیش‌رونده

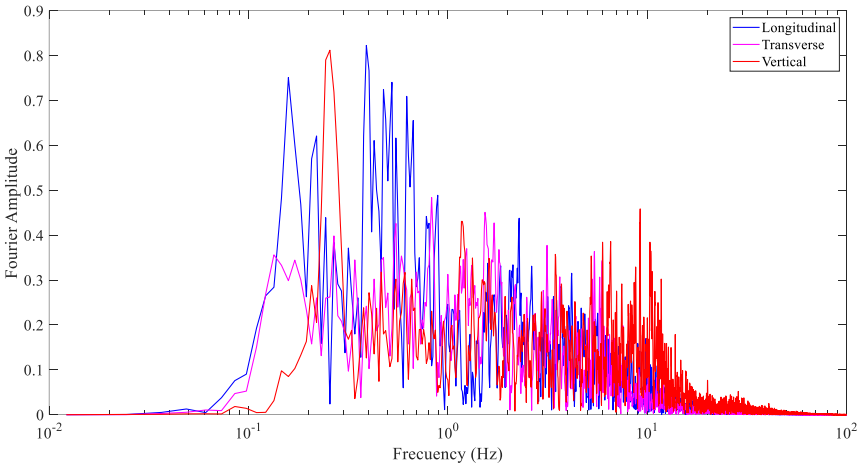
با توجه به اینکه بار مرده پل‌های کابلی حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد کل بار وارد شده به سازه را تشکیل می‌دهند و از طرفی همزمانی وقوع زلزله با حالتی که در آن حداکثر بار زنده بر پل اعمال شده باشد، نامحتمل است؛ در پژوهش حاضر فرض بر این بوده است که در حالت سرویس پل دارای عملکردی طبیعی است و همه کابل‌ها در ظاهر دارای عملکردی صحیح هستند اما در هنگام وقوع زلزله به سبب وجود نقص در برخی از کابل‌ها، آن‌ها قادر به تحمل افزایش تنش احتمالی نیستند و چنانچه میزان تنش از ۵ درصد تنش در حالت سرویس فراتر رود گسیخته می‌شوند [۵]. همچنین چنانچه میزان تنش در کابل‌های باقیمانده از حد تسلیم آن‌ها فراتر رود آن‌ها نیز از مدار باربری خارج خواهند شد. 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 [۱۳] الگوی منظور نمودن کابل‌های دارای نقص مطابق با جدول (۱) به منظور تحلیل خرابی پیش‌رونده لحاظ شده است.

جدول ۱. الگوی منظور نمودن کابل‌های دارای نقص در تحلیل خرابی پیش‌رونده

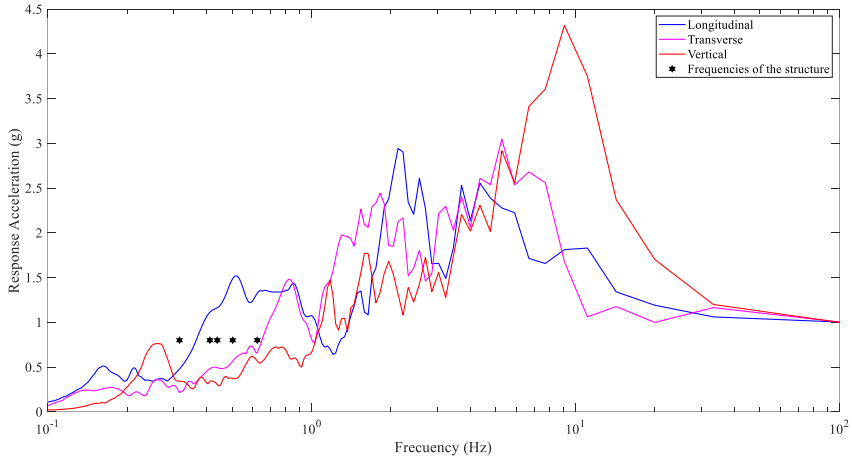
تعداد کابل دارای نقص	شماره کابل‌های دارای نقص
۱	۳۳
۲	۳۳، ۳۴
۳	۳۳، ۳۴، ۳۵
۴	۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶

٤- انتخاب رکورد زلزله

به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، مطابق آیین‌نامه FEMAP695 رکورد زلزلهٔ سوپراستیشن‌هیلز با بزرگای ۶/۵ ریشتر و بیشینه شتاب ۰/۳۶ برحسب g که در فاصلهٔ ۱۸/۲ کیلومتری از گسل رخ داده انتخاب شده است. محتوای فرکانسی زلزله و طیف شتاب رکورد انتخاب شده در مقیاس نیمه لگاریتمی در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، طیف پاسخ شتاب از فرکانس‌های اصلی سازه دور بوده و ملاحظات طراحی لرزه‌ای مطابق با این رکورد زلزله به خوبی رعایت شده است.



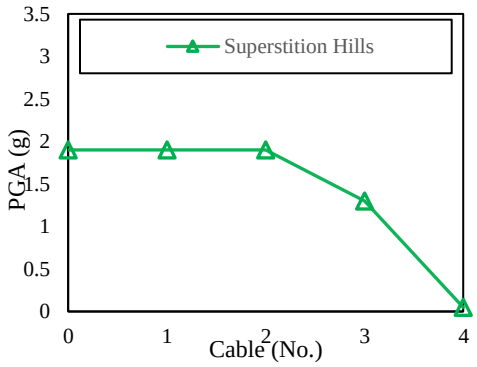
شکل ۲. محتوای فرکانسی رکورد زلزله سوپراستیشن‌هیلز



شکل ۳. طیف پاسخ رکورد زلزله سوپراستیشن‌هیلز و مقایسه آن با فرکانس‌های اصلی سازه

۵- تحلیل دینامیکی فزاینده

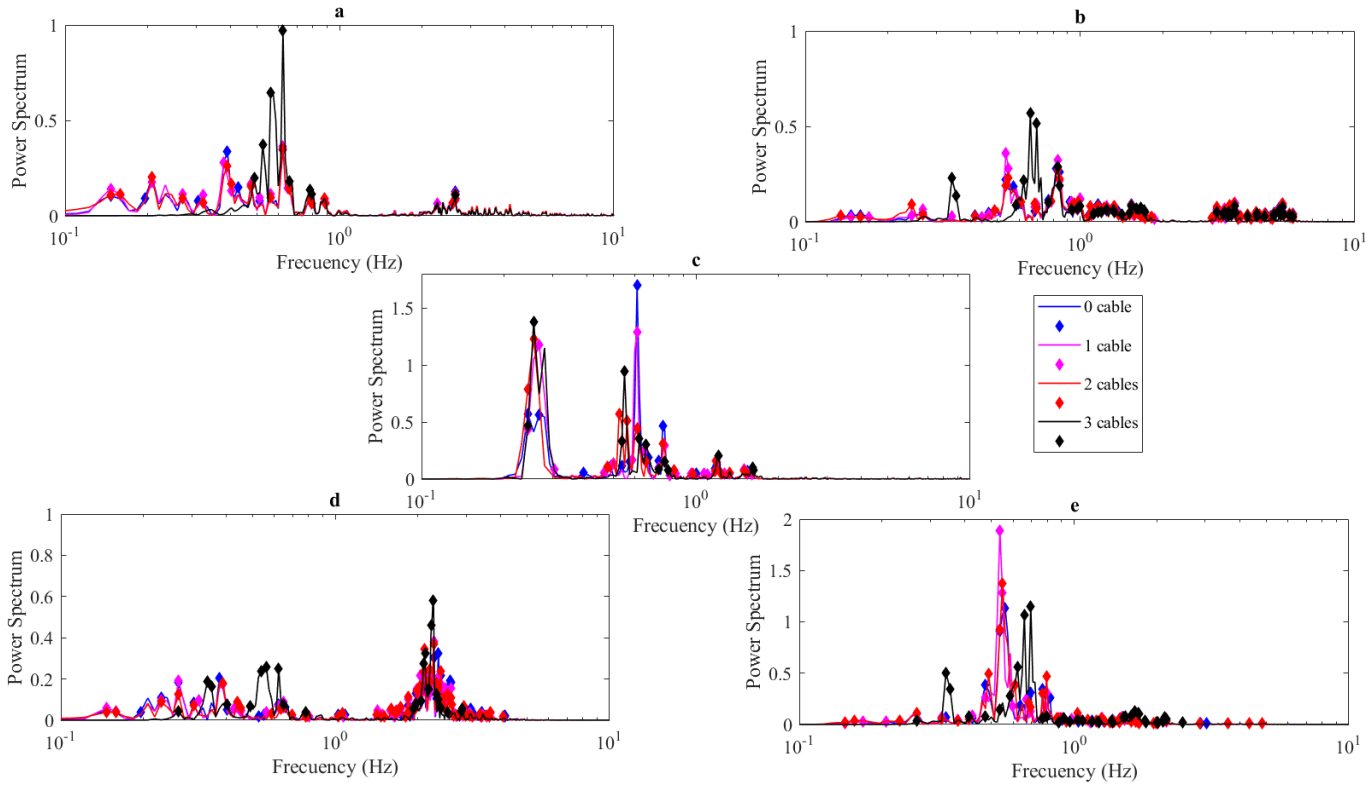
به منظور محاسبه حداکثر ظرفیت پل تحت اثر تحریک زلزله از تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده می‌شود. بدین منظور پس از مقیاس نمودن بیشینه شتاب رکورد زلزله به g، جهت پوشش گسترهٔ مناسبی از شدت‌های زلزله، رکورد زلزله با بیشینه شتاب ۰/۰۵g تا لحظهٔ خرابی با گام افزایشی حداکثر ۰/۱g به سازه اعمال می‌شود و با انجام 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 به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که جهت بازتاب نتایج منطقی پاسخ‌های سازه تحت تحریک زلزله، سازه به صورت همزمان تحت تأثیر هر سه مولفهٔ شتاب زلزله قرار گرفته است [۵]. در نهایت با انجام ۷۱ تحلیل دینامیکی غیرخطی ظرفیت نهایی پل در لحظه خرابی مطابق شکل (۴) 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 گسیختگی تفاوت معناداری در بیشینه شتاب قابل تحمل پل ندارد. این در حالی است که گسیختگی سه کابل دارای نقص باعث کاهش چشمگیر 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 ۰/۰۵g با الگوی خرابی زیپی، سازهٔ پل منهدم شده است.



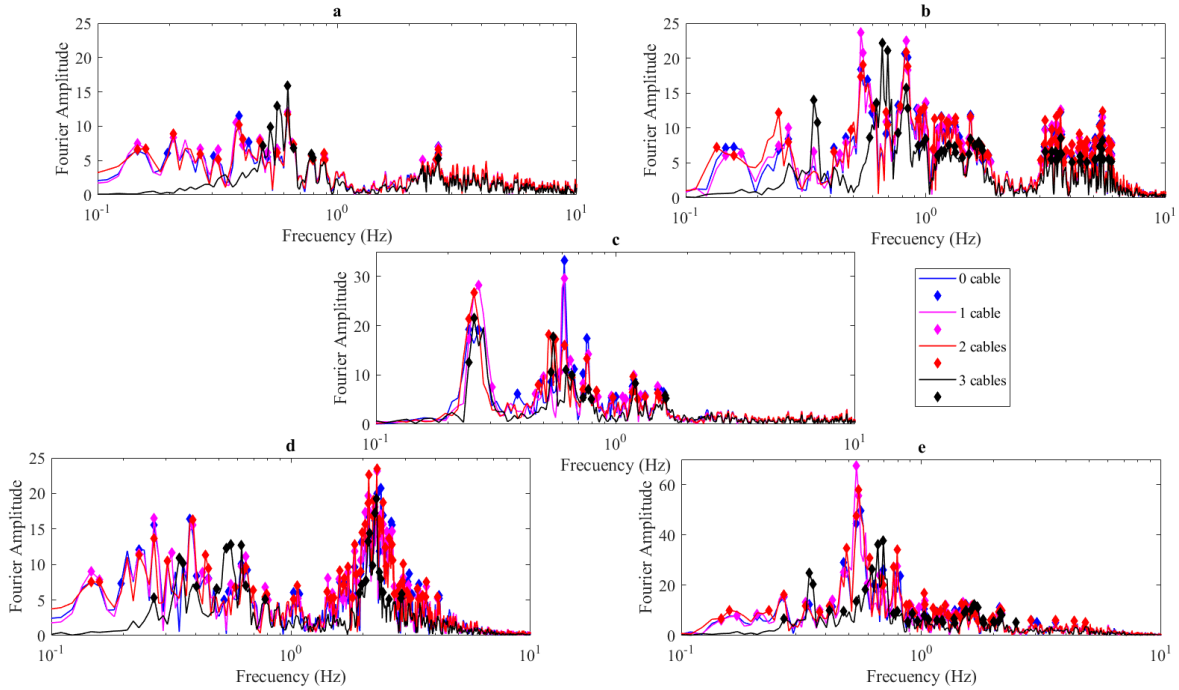
شکل ۴. بیشینه شتاب قابل تحمل در حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص.

۶- تحلیل پاسخ سازه در حوزه فرکانس

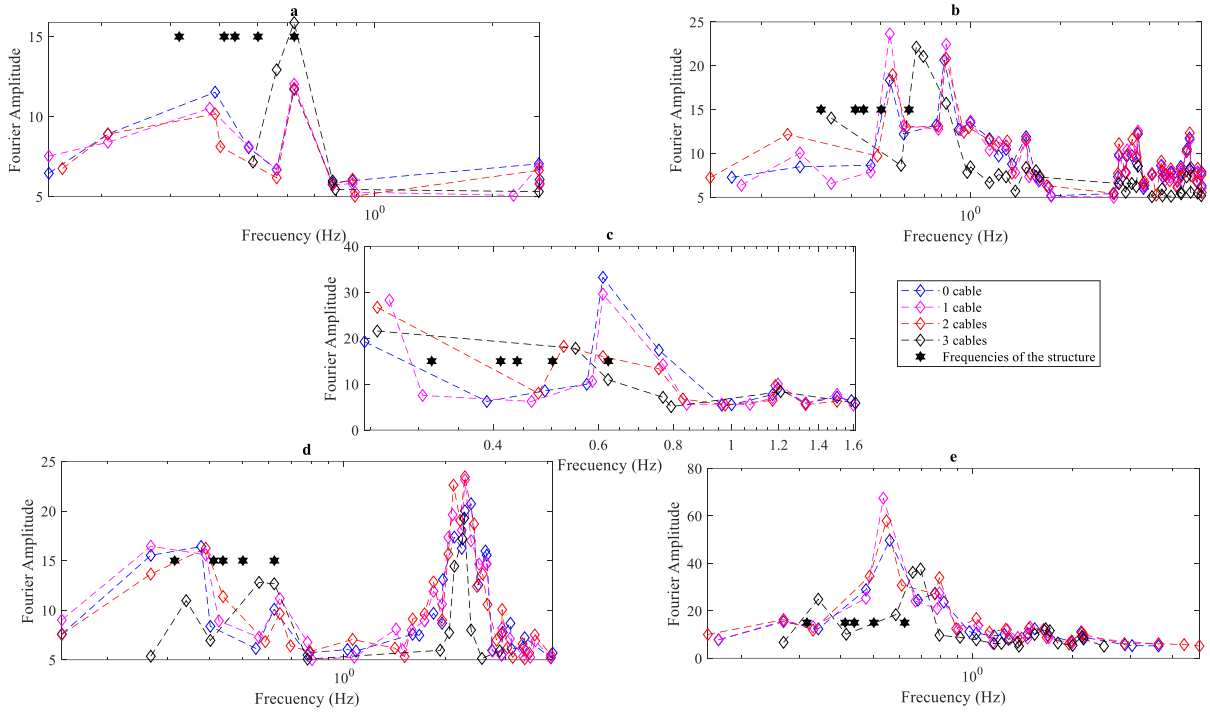
با توجه به محتوای فرکانسی زلزلهٔ اعمالی و نیز تغییر در خصوصیات مکانیکی پل در حین خرابی پیش‌رونده، در این بخش پاسخ سازه در حوزهٔ فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور لازم است که در گام نخست، پاسخ‌های دینامیکی استخراج شده در بیشینه شتاب قابل تحمل سازه با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس در بازه ۰/۱ تا ۱۰ هرتز تبدیل شود. با توجه به اینکه هدف مطالعه حاضر بررسی فرکانس محتوایی پل در لحظه خرابی است، از مجموع ۷۱ پاسخ دینامیکی استخراج شده ۴ پاسخی که منجر به خرابی پل شدند انتخاب شده و محتوای فرکانسی آنها مورد بررسی قرار گرفت. پس از ارائهٔ پاسخ سازه در حوزهٔ 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 مطابق با شکل (۵) استخراج شده است که برای تفسیر بهتر نتایج، پیک‌های انتخابی در طیف پاسخ در شکل (۶) و همچنین به صورت مجزا، خلاصهٔ پیک‌های انتخابی در شکل (۷) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش از پنج پاسخ سازه‌ای به ترتیب شامل شتاب افقی و عرضی نوک برج و شتاب در هر سه جهت وسط عرشه به‌منظور تفسیر نتایج در نظر 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 ۰/۰۵g)، مورد بررسی قرار نگرفته است.



شکل ۵. طیف توان پاسخ 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 برج در راستای طولی، e: نوک برج در راستای عرضی.



شکل ۶. طیف پاسخ 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 برج در راستای طولی، e: نوک برج در راستای عرضی.



شکل ۷. پیک‌های انتخابی پاسخ به ازای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل دارای نقص در 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 برج در راستای طولی، e: نوک برج در راستای عرضی

با توجه به شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) می‌توان دریافت که حساسیت پاسخ نوک برج و وسط عرشه در فرکانس‌های کاملاً متفاوتی رخ داده است، لذا در طراحی این پل‌ها باید به این موضوع توجه نمود. همچنین با توجه به شکل‌های (۴) و (۷) 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 دربارهٔ پاسخ شتاب نوک برج در راستای طولی و عرضی نیز صادق است. از طرفی دیگر مطابق شکل (۷) مشخص 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.

نکتهٔ دیگری که از مشاهدهٔ شکل (۷b) به‌دست می‌آید این است که تعداد پیک‌های فرکانسی در پاسخ شتاب عرشه در راستای عرضی نسبت به دیگر پاسخ‌ها بسیار بیش‌تر است. به عبارت دیگر هنگام زلزله انتظار می‌رود که عرشهٔ پل در راستای عرضی پاسخ‌های نسبتاً شدیدی را تجربه نماید که این امر باید در طراحی عرشه در استانداردهای طراحی به طور ویژه‌ای مدنظر قرار گیرد.

۷- نتیجه‌گیری

کابل‌ها در پل‌های کابلی خودایستا از اعضای مهمی هستند که احتمال بروز نقص در آن‌ها به واسطهٔ 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 شناخت رفتار این پل‌ها را با فرض گسیختگی احتمالی کابل هنگام وقوع زلزله ایجاب می‌نماید. به همین سبب در پژوهش حاضر تأثیر گسیختگی کابل‌های متوالی بر ظرفیت لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا در حوزهٔ فرکانس مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در گام نخست با ایجاد مدل اجزای محدود پل یادبود بیل امرسون و مقایسهٔ سه مود اول مدل با پژوهش چن و همکاران از درستی مدل اطمینان حاصل شد. در گام بعد با فرض این‌که کابل‌های سازه در حین سرویس دارای عملکردی طبیعی هستند لیکن به سبب 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 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 خواهد شد. از طرفی دیگر با خرابی پیش‌رونده محتوای فرکانسی پاسخ پل تغییر کرده و فرکانس سازه به فرکانس‌های تشدید کننده پاسخ نزدیک‌تر می‌شوند که این موضوع باید در طراحی‌ها لحاظ شود. همچنین مشخص شد که پاسخ شتاب عرشه در راستای عرضی نسبت به راستاهای دیگر دارای پیک‌های فرکانسی قابل توجهی است که این موضوع بایستی در ملاحظات طراحی در استانداردها مدنظر قرار گیرد.

مراجع

1. N.J. Gimsing, and C.T. Georgakis, "Cable supported bridges: Concept and design", *John Wiley & Sons*, (2011).

۲. ب. کشته گر، ا. حلبیان و ح. هاشم الحسینی، "بررسی لرزه‌ای رفتار غیر خطی پل‌های کابلی ایستای دهانه بزرگ"، *چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۸۷.*

۳. ح. توکلی و م. مرادی، "ارزیابی حساسیت پاسخ یک پل کابلی دارای جداساز لرزه‌ای تحت زلزلهٔ نزدیک به گسل نسبت به تغییرات مصالح"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، (۱۲) ۵۳، ۳۱۶۰-۳۱۴۵، (۱۳۹۹).

۴. م. اسماعیل‌نیا عمران، ع. حسینی کرانی، "ارزیابی عملکرد جداساز غلطکی درون قفس بر رفتار خرابی پیش‌رونده پل‌های کابلی (مطالعه موردی پل کابلی بیل امرسون)"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، (۲) ۵۳، ۶۵۸-۶۳۹، (۱۴۰۰).

۵. د. فراهانی، م. یزدانی، "بررسی تاثیر گسیختگی کابل‌های متوالی بر ظرفیت لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا"، *سیزدهمین کنگرهٔ بین‌المللی مهندسی عمران*،۱۴۰۲.

6. M. Wolff, U. Starossek, "Cable loss and progressive collapse in cable-stayed bridges", *Bridge structures*, **5**(1), 17-28, (2009)

7. C. Mozos, A. Aparicio, "Parametric study on the dynamic response of cable stayed bridges to the sudden failure of a stay, Part I: Bending moment acting on the deck", *Engineering Structures*, **32**(10), 3288-3300, (2010)

8. FEMA, P., "Quantification of building seismic performance factors", Washington, DC, (2009)

۹. د. فراهانی، م. یزدانی، "بررسی تأثیر گسیختگی یک کابل بحرانی بر ظرفیت لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا"، *ششمین همایش بین‌المللی مهندسی سازه*، (۱۴۰۱).

۱۰. م، یزدانی، م، ص. معرفت، "بررسی اثر رفتار دینامیکی بار قطار بر روی پاسخ پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح در حوزهٔ فرکانس"، *مجلهٔ علمی صوت و ارتعاش*، (۳) ۶، ۵۶-۴۷، (۱۳۹۳).

۱۱. م. حسینی، کنارنگی، ه. "کاربرد نرم افزار OpenSees در مدل‌سازی و تحلیل سازه‌ها"، تهران، آزاده، (۱۳۹۲).

12. G, Chen et al., "Assessment of the Bill Emerson memorial cable-stayed bridge based on seismic instrumentation data". 2007.

13. V. Hoang, O. Kiyomiya, and T. An, "Experimental and numerical study of lateral cable rupture in cable-stayed bridges: Case study", *Journal of Bridge Engineering*, **23**(6), 05018004, (2018).