ISAV2025
پانزدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۳ و ۴ دی ماه ۱۴۰۴ تهران - ایران
انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

تأثیر خرابی کابل‌های متوالی بر ویژگی‌های دینامیکی پل‌های کابلی خودایستا

مصطفی رضوانی[آ]، مهدی یزدانی[ب]، داود فراهانی[پ*]

[آ] ایران، اراک، میدان بسیج، بلوار کربلا، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۸۴۸۱۷۷۵۸۴، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله.

[ب] ایران، اراک، میدان بسیج، بلوار کربلا، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۸۴۸۱۷۷۵۸۴، دانشیارمهندسی سازه.

[پ] ایران، اراک، میدان بسیج، بلوار کربلا، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۸۴۸۱۷۷۵۸۴، کارشناس ارشد مهندسی زلزله.

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

چکیده

کابل‌ها نقش بسیار مهمی در ظرفیت باربری و رفتار پل‌های کابلی خودایستا ایفا می‌کنند. این کابل‌ها ممکن است به دلایل مختلفی از جمله نگهداری نامناسب در بلندمدت، خوردگی در اتصالات و یا بروز حوادث طبیعی و غیرطبیعی دچار آسیب شوند. ازاین‌رو پل‌های کابلی خودایستا به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که حتی با حذف حداقل سه کابل، یکپارچگی سازه به خطر نیفتد و خرابی پیش‌رونده در پل رخ ندهد. در این مقاله، اثر خرابی متوالی کابل‌ها و تأثیر آن بر ویژگی‌های دینامیکی پل‌های کابلی خودایستا موردبررسی قرار گرفته است. از جمله ویژگی‌های مهم دینامیکی سازه، دوره تناوب طبیعی و شکل‌های مودی آن است که به‌عنوان شاخص‌های کلیدی در تحلیل دینامیکی و شناخت رفتار لرزه‌ای سازه در برابر زلزله و باد عمل می‌کنند. تغییر در این ویژگی‌ها می‌تواند بیانگر تغییر در سختی مؤثر سیستم و در نتیجه تغییر در پاسخ سازه در برابر تحریکات دینامیکی باشد. در پژوهش حاضر، پس از مدل‌سازی عددی پل یادبود بیل امرسون با رویکرد عرشه کامل در محیط نرم‌افزاری اپن‌سیس و اعتبارسنجی آن بر اساس دوره تناوبی سازه در پنج مود اول، تحلیل مودال در حالت‌های مختلف خرابی متوالی کابل انجام شد و مقادیر دوره تناوب و شکل‌های مودی متناظر برای پنج مود اول پل استخراج گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که خرابی متوالی کابل‌ها در اغلب مودها تغییرات محدودی در دوره تناوب ایجاد می‌کند و این تغییرات به‌ویژه در مودهای بالاتر چندان محسوس نیست. بااین‌حال، مود سوم نسبت به سایر مودها حساسیت بیشتری به خرابی کابل‌ها نشان داده و تغییرات قابل‌توجه‌تری را تجربه کرده است که نشان‌دهنده تأثیر خرابی کابل‌ها بر سختی پیچشی عرشه و پایداری جانبی عرشه است. همچنین بررسی شکل‌های مودی بیانگر آن است که راستای اصلی تغییر شکل پل در پنج مود نخست به‌طور عمده در راستای طولی پایلون‌ها به‌عنوان عضو اصلی باربر در این پل‌ها رخ می‌دهد و سهم اصلی تغییر شکل‌های دینامیکی بر ظرفیت طولی پایلون‌ها متمرکز است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که با حذف حداقل چهار کابل متوالی در پل‌های کابلی خودایستا، ویژگی‌های دینامیکی سازه نیز با کمترین تغییرات همراه است.

کلمات کلیدی: پل‌های کابلی خودایستا؛ تحلیل مودال؛ خرابی کابل‌ها؛ ویژگی‌های دینامیکی.

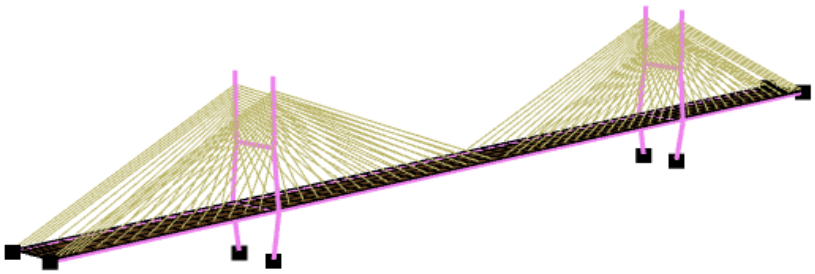
۱- مقدمه

با توجه به اینکه پل‌های کابلی خودایستا از جمله زیرساخت‌های حیاتی و پرهزینه محسوب می‌شوند، طراحی ایمن و در عین حال اقتصادی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحقق این هدف مستلزم درک دقیق رفتار سازه در محدوده ارتجاعی و نیز بررسی عملکرد آن تحت بارهای دینامیکی، به‌ویژه باد و زلزله، است. در این راستا، محاسبه ویژگی‌های دینامیکی نظیر دوره تناوب طبیعی و شکل‌های مودی از طریق تحلیل مودال ضرورت می‌یابد؛ چراکه این پارامترها علاوه بر شناسایی مودهای غالب ارتعاشی، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر پاسخ لرزه‌ای و تعیین سختی مؤثر سازه را فراهم می‌کنند. با توجه به اینکه پل‌های کابلی خودایستا از اجزای متعددی همچون عرشه، پایلون‌ها و کابل‌ها تشکیل شده‌اند که به‌وسیله اتصالات پیچیده به یکدیگر متصل‌اند، تحلیل مودال این نوع سازه‌ها صرفاً با فرضیات خاص و از طریق بهره‌گیری از روش‌های عددی پیشرفته، به‌ویژه روش اجزای محدود، امکان‌پذیر خواهد بود. [۱]. در این‌باره پژوهش‌های گوناگونی درخصوص مدل‌سازی پل‌های کابلی خودایستا صورت گرفته که در برخی از مطالعه‌ها عرشه پل به‌صورت کامل و در برخی دیگر با رویکرد تیر اساسی [۲, ۳] مدل‌سازی شده است. در پژوهش صورت گرفته توسط فراهانی و یزدانی [۴]، عرشه پل کابلی خودایستا با استفاده از هر دو رویکرد بررسی شده و به منظور صحت‌سنجی مدل، بسامدهای پنج مود اول در هردو نوع مدل‌سازی عرشه با مطالعه‌های قبلی مقایسه شده که دارای تطابق مناسبی است. در بیش‌تر پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون ویژگی‌های دینامیکی این نوع پل‌ها، اثر گسیختگی متوالی کابل‌ها لحاظ نشده است. با وجود اینکه کابل‌ها نقشی بسیار مهم در باربری پل‌های کابلی خودایستا دارند، ممکن است به دلیل نگهداری نامناسب در دراز مدت و یا خوردگی‌ها در اتصالات دچار آسیب شوند. شایان ذکر است که پژوهش‌هایی مانند ولف و استارک [۵] و داس و همکاران [۶] به تاثیر گسیختگی کابل بر این سازه‌ها پرداخته است. همچنین به دلیل قرارگیری این دسته از زیرساخت‌ها در مناطقی با لرزه‌خیزی زیاد سبب شده که پژوهش‌هایی مانند نیاعمران و کرانی [۷] و یا مطالعه‌های انجام شده توسط فراهانی و یزدانی [۸-۱۰]، به بررسی رفتارهای دینامیکی پل‌های کابلی خودایستا به هنگام زلزله بپردازند. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر بررسی تغییرات دوره تناوب طبیعی و شکل‌های مودی پل‌های کابلی خودایستا در اثر خرابی متوالی کابل‌ها است. بدین منظور، پل یادبود بیل امرسون با رویکرد عرشه کامل در محیط نرم‌افزار اپن‌سیس مدل‌سازی شده و سپس تحت تحلیل مودال در حالت‌های مختلف نقص کابل قرار گرفته است. در ادامه، مشخصات دینامیکی سازه شامل دوره تناوب طبیعی برای پنج مود اول و شکل‌های مودی پنج مود نخست استخراج و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲- تحلیل مودال

در پژوهش حاضر، پل یادبود بیل امرسون جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود اپن‌سیس انتخاب شده است. بخش اصلی این پل دارای سه دهانه است که دهانه میانی آن ۳۵۰/۶ متر و دهانه‌های کناری به طور مشترک ۱۴۲/۷ متر طول دارند. این پل دارای ۲ پایلون اصلی است که در مجموع ۱۲۸ عدد کابل به آن متصل شده است. به‌منظور ارائه بهتر و دقیق‌تر پاسخ‌های سازه، از رویکرد عرشه کامل مطابق پژوهش فراهانی و یزدانی [۴] در ساخت مدل پل کابلی خودایستا استفاده شده است. در شکل (۱) مدل اجزای محدود پل یاد بود بیل امرسون با رویکرد عرشه کامل در نرم افزار اپن‌سیس نشان داده است. جهت اعتبارسنجی آن از تحلیل مودال استفاده شده است. با انجام تحلیل مودال بر روی مدل اجزای محدود پل، دوره تناوب پنج مود اول به ترتیب برابر با ۳/۳۳، ۲/۴۷، ۱/۹۵، ۱/۹۲ و ۱/۸۱

ثانیه محاسبه شد که با مقادیر ۲/۹۵، ۲/۵۰، ۲/۰۶، ۱/۷۵ و ۱/۶۶ ثانیه در پژوهش چن و همکاران به طور متوسط دارای ۷ درصد خطا است که نشان‌دهنده تطابق نسبتاً خوب مدل عددی است.



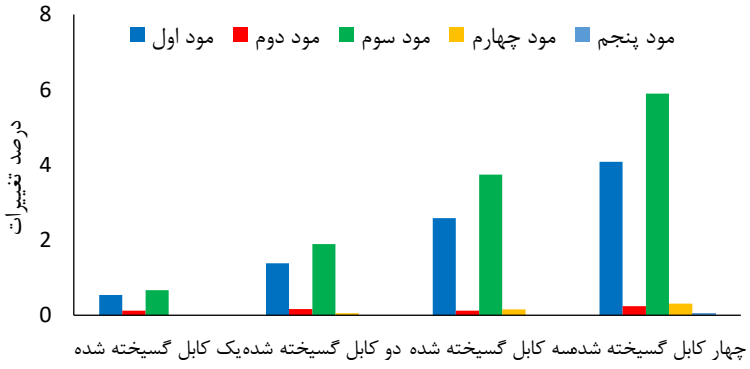
شکل ۱. مدل اجزای محدود پل یادبود بیل امرسون با رویکرد عرشه کامل [۱۱]

۳- تأثیر حذف کابل بر مشخصات دینامیکی پل

در مطالعه حاضر از الگوهای پیشنهادی در پژوهش نیاعمران و کرانی [۷] و همچنین پژوهش فراهانی و یزدانی [۸] بهره گرفته شده است. فرض بر آن است که کابل‌هایی که در اثر تحریکات لرزه‌ای دچار آسیب می‌شوند، از منظر رفتار سازه‌ای در وضعیت بحرانی‌تری قرار دارند. از طرفی کابل‌هایی که در دورتر از پایلون واقع شده‌اند، نسبت به کابل‌های نزدیک‌تر آسیب‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند و به همین سبب در الگوی حذف، این کابل‌ها در اولویت قرار دارند؛ بنابراین در این مطالعه با حذف یک تا چهار کابل متوالی مشخصات دینامیکی پل مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه پنج دوره تناوبی طبیعی پل کابلی خودایستا مطابق جدول (۱) برای حالت‌های مختلف گسیختگی در جهت X کابل ارائه شده است. در شکل (۲) درصد تغییرات دوره تناوب پس از گسیختگی هر کابل نسبت به حالت بدون نقص در پل کابلی خودایستا برای حالت‌های مختلف نقص کابل شامل بدون نقص و یک، دو، سه و چهار کابل پرداخته شده است.

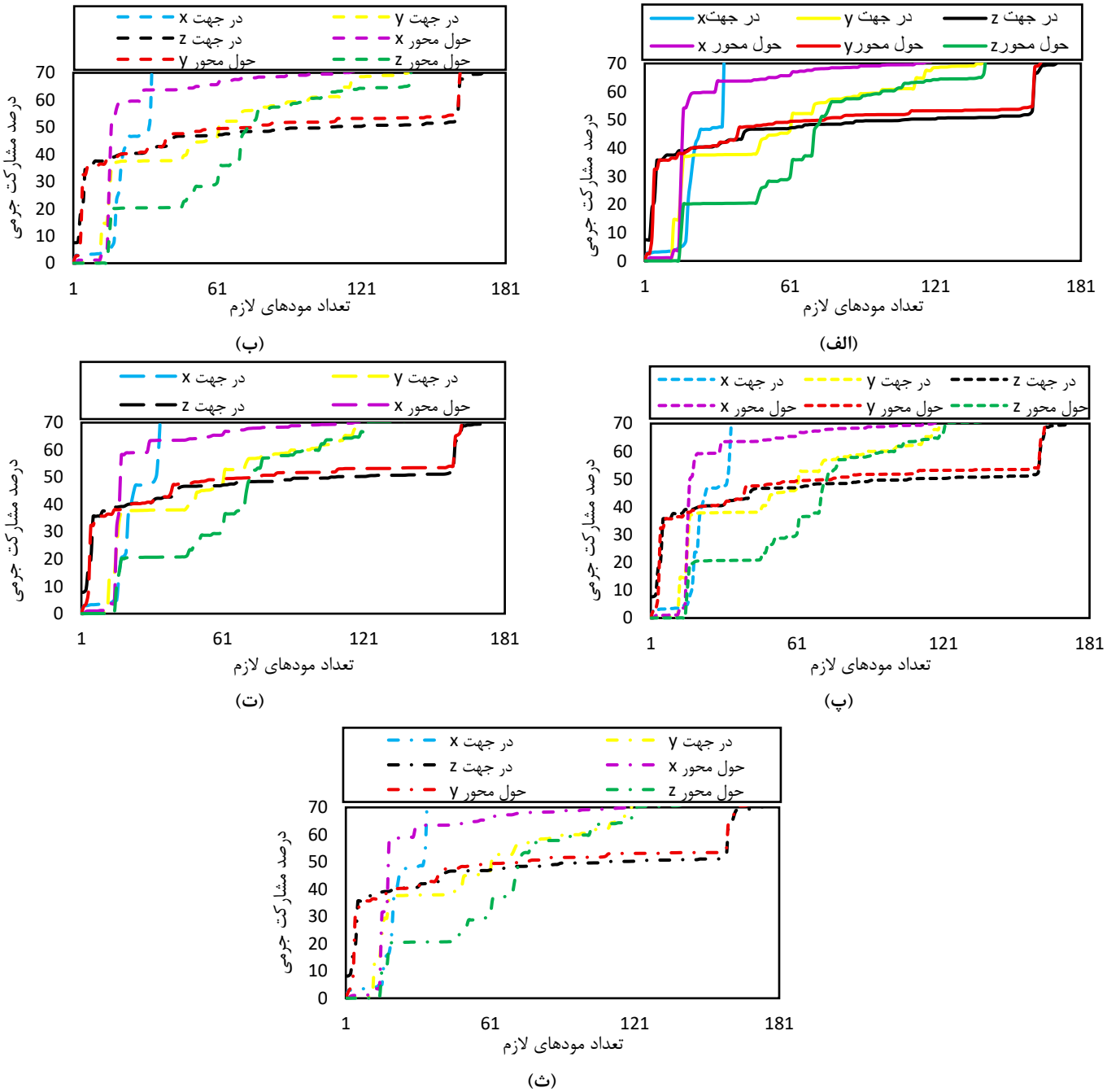
جدول ۱. مقادیر دوره تناوب پل کابلی خودایستا برای حالت‌های مختلف گسیختگی در جهت X (بر حسب ثانیه)

شماره مود	بدون نقص کابل	یک کابل دارای نقص	دو کابل دارای نقص	سه کابل دارای نقص	چهار کابل دارای نقص
مود اول	۳/۳۳۲	۳/۳۵۰	۳/۳۷۸	۳/۴۱۸	۳/۴۶۸
مود دوم	۲/۴۶۷	۲/۴۷۰	۲/۴۷۱	۲/۴۷۰	۲/۴۷۳
مود سوم	۱/۹۵۰	۱/۹۶۳	۱/۹۸۷	۲/۰۲۳	۲/۰۶۵
مود چهارم	۱/۹۲۲	۱/۹۲۵	۱/۹۲۷	۱/۹۲۸	۱/۹۲۸
مود پنجم	۱/۸۰۷	۱/۸۰۸	۱/۸۰۸	۱/۸۰۸	۱/۸۰۸



شکل ۲. درصد تغییرات دوره تناوب پس از گسیختگی هر کابل نسبت به حالت بدون نقص در پنج مود اول سازه

یافته‌ها نشان می‌دهد با افزایش تعداد کابل‌های معیوب، درصد تغییرات دوره تناوب پنج مود اول به‌صورت نامحسوسی دچار افزایش شده است. در مود سوم درصد تغییرات دوره تناوب پل کابلی خودایستا در اثر خرابی کابل‌ها به‌صورت متوالی، به نسبت سایر مودها بیش‌تر بوده است. در مود چهارم بدون تغییر و در مود پنجم دوره تناوبی افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که وجود کابل‌ها برای پایداری جانبی عرشه و افزایش سختی پیچشی عرشه بسیار حائز اهمیت است؛ بنابراین فارغ از خرابی متوالی کابل، وجود کابل‌ها برای سختی پیچشی عرشه لازم است و حذف بیشتر کابل‌ها از این جنبه مهم‌تر است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های دینامیکی پل آسیب‌دیده به تاثیر تعداد مودها در مشارکت جرمی مودها مطابق شکل (۳) پرداخته شده است. همان‌طور که مشخص است تعداد مودهای لازم برای مشارکت جرمی حداقل ۷۰ درصد بسیار بالا است.

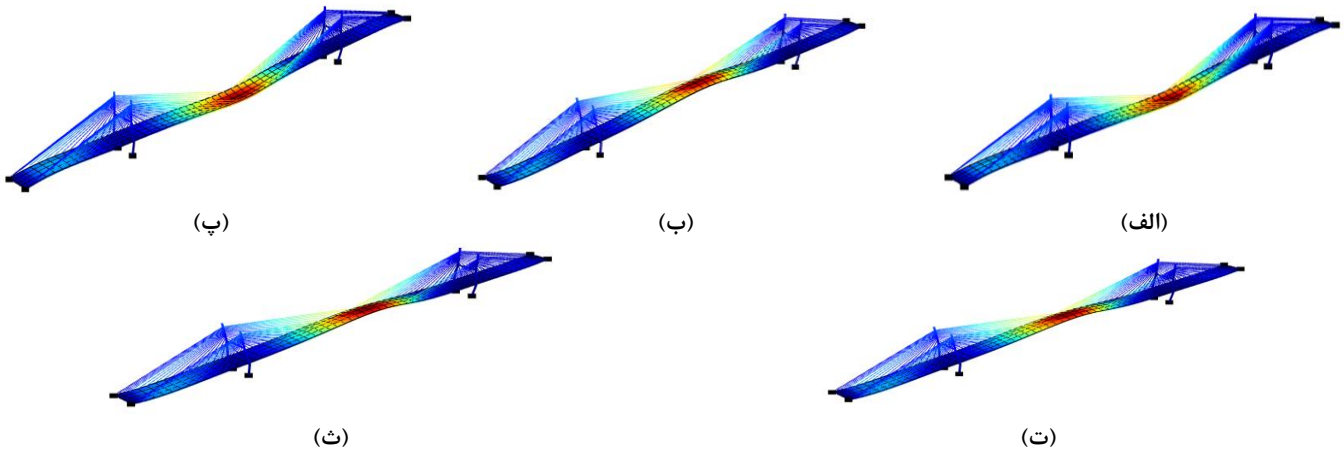


شکل ۳. مشارکت جرمی کل سازه تا ۷۰ درصد براساس شش درجه آزادی با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف نقص کابل، الف: بدون نقص کابل، ب: یک کابل دارای نقص، پ: دو کابل دارای نقص، ت: سه کابل دارای نقص، ث: چهار کابل دارای نقص

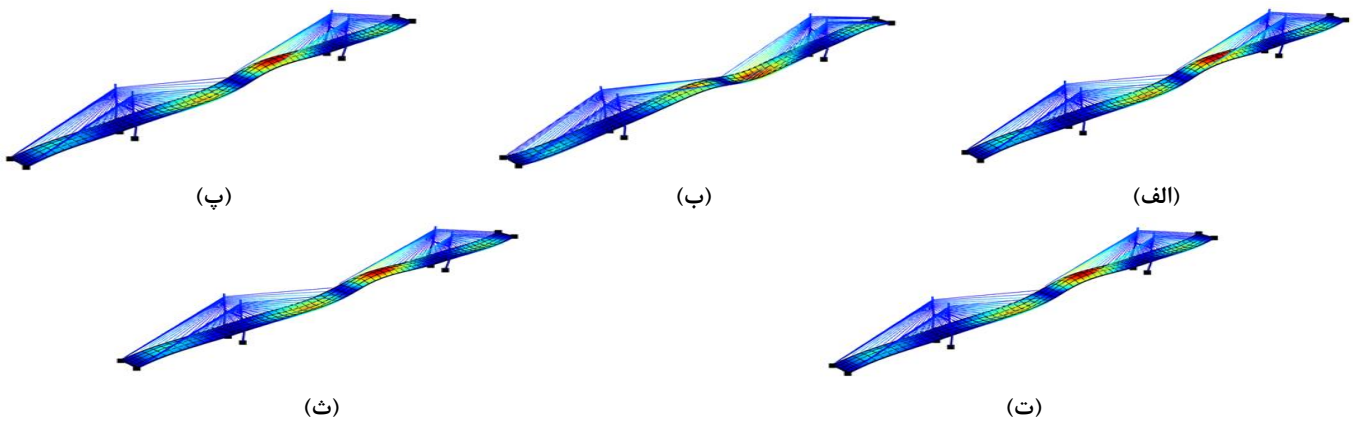
به منظور بررسی اثر تعداد خرابی کابل بر تعداد مودهای لازم برای مشارکت ۷۰ درصدی جرمی، جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد کابل‌های خرابی، تعداد مودها (به جز در جهت y و حول محور z) تغییرات چندانی ندارند که این موضوع نیز بر طراحی صحیح آنها تاکید دارد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه حداکثر وزن هر کابل ـ بسته به طول آن ـ حدود ۷ تن است، در مقایسه با وزن کل سازه که برابر با ۳۶,۰۰۰ تن می‌باشد، سهم ناچیزی دارد. بنابراین، فارغ از جنبه‌های مربوط به پایداری عرشه، این موضوع نیز می‌تواند بر رفتار کلی سازه تأثیرگذار باشد. در ادامه مطابق شکل‌های (۴) تا (۸) به ترتیب شکل‌های مودی اول تا پنجم برای حالت‌های مختلف گسیختگی کابل ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است. با افزایش تعداد خرابی کابل‌ها، شکل مودی پل تغییر نمی‌کند و این نتیجه تاییدی بر سایر نتایج بدست آمده است.

جدول ۲. تعداد مودهای لازم برای رسیدن به ۷۰ درصد مشارکت جرمی

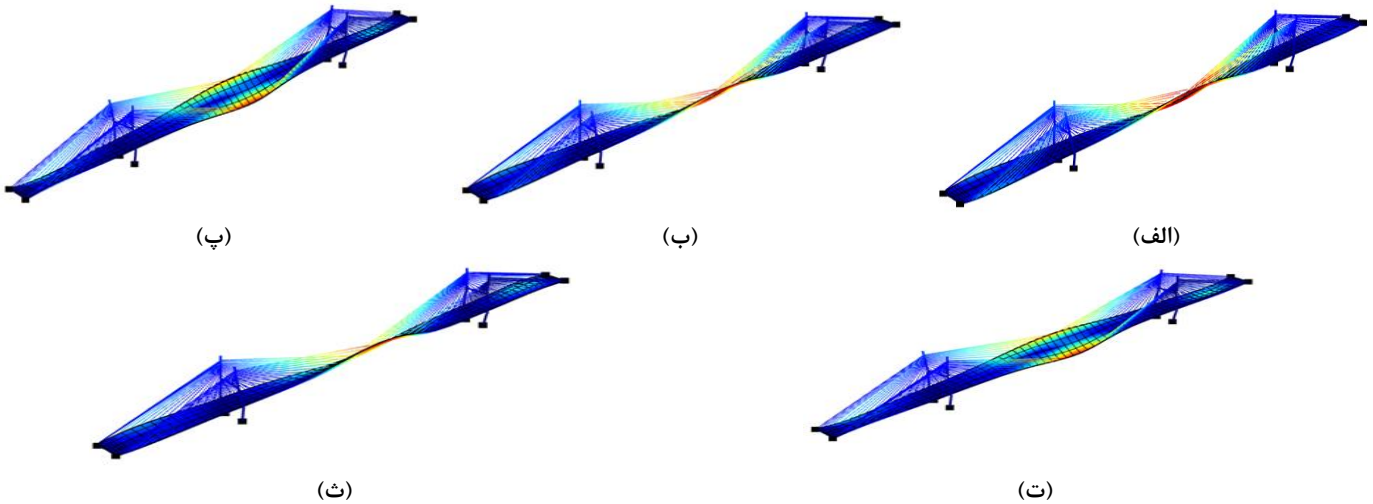
شرایط پل	در جهت x	در جهت y	در جهت z	حول محور x	حول محور y	حول محور z
بدون نقص	۳۴	۱۴۰	۱۷۱	۱۱۴	۱۶۶	۱۴۳
یک کابل	۳۵	۱۴۰	۱۷۲	۱۱۴	۱۶۴	۱۴۳
دو کابل	۳۵	۱۲۱	۱۷۳	۱۱۸	۱۶۴	۱۲۳
سه کابل	۳۶	۱۲۱	۱۷۴	۱۱۸	۱۶۴	۱۲۳
چهار کابل	۳۶	۱۲۱	۱۷۴	۱۱۹	۱۶۴	۱۲۳



شکل ۴. تغییر شکل مودی اول برای حالت‌های مختلف نقص کابل، الف: بدون نقص، ب: یک کابل دارای نقص، پ: دو کابل دارای نقص ت: سه کابل دارای نقص، ث: چهار کابل دارای نقص



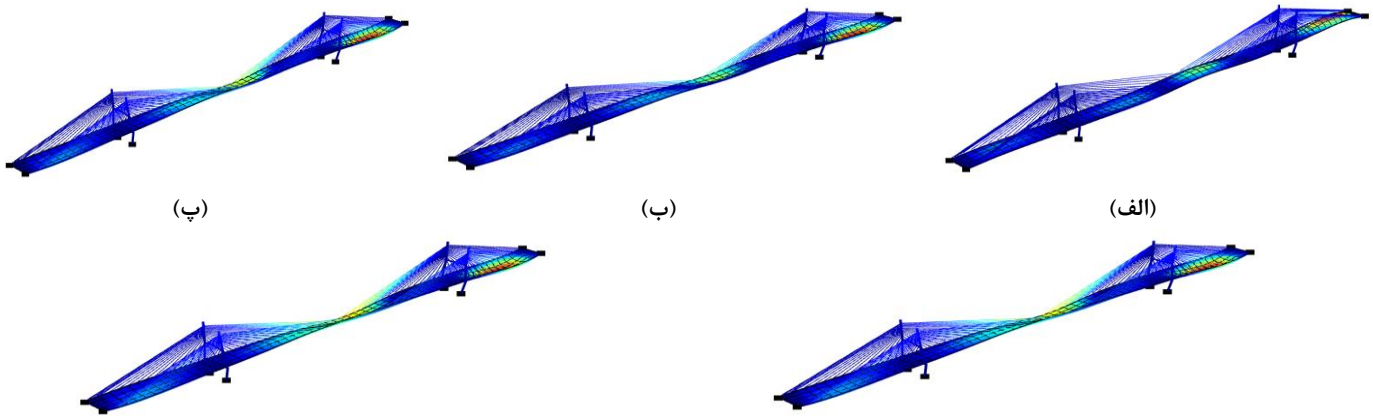
شکل ۵. تغییر شکل مودی دوم برای حالت‌های مختلف نقص کابل، الف: بدون نقص، ب: یک کابل دارای نقص، پ: دو کابل دارای نقص، ت: سه کابل دارای نقص، ث: چهار کابل دارای نقص



(الف) (ب) (پ)

(ت) (ث)

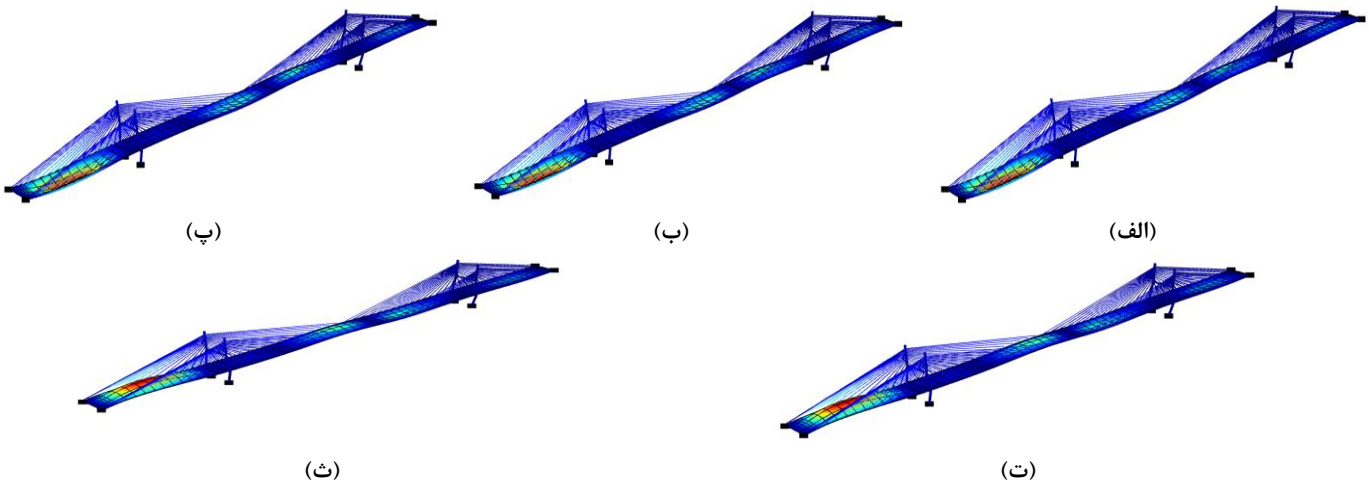
شکل ۶. تغییر شکل مودی سوم برای حالت‌های مختلف نقص کابل، الف: بدون نقص، ب: یک کابل دارای نقص، پ: دو کابل دارای نقص ت: سه کابل دارای نقص، ث: چهار کابل دارای نقص



(الف) (ب) (پ)

(ت) (ث)

شکل ۷. تغییر شکل مودی چهارم برای حالت‌های مختلف نقص کابل، الف: بدون نقص، ب: یک کابل دارای نقص، پ: دو کابل دارای نقص ت: سه کابل دارای نقص، ث: چهار کابل دارای نقص



(الف) (ب) (پ)

(ت) (ث)

شکل ۸. تغییر شکل مودی پنجم برای حالت‌های مختلف نقص کابل، الف: بدون نقص، ب: یک کابل دارای نقص، پ: دو کابل دارای نقص، ت: سه کابل دارای نقص، ث: چهار کابل دارای نقص

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر خرابی متوالی کابل‌ها بر ویژگی‌های دینامیکی پل‌های کابلی خودایستا موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا مدل‌سازی عددی پل با رویکرد عرشه کامل در نرم‌افزار اپن‌سیس صورت گرفت تا شرایط واقعی‌تری از رفتار سازه شبیه‌سازی شود. پس از ایجاد مدل اجزای محدود به‌منظور اطمینان از صحت آن، تحلیل مودال اجرا گردید و مقادیر دوره تناوب طبیعی برای پنج مود اول استخراج شد. همچنین به‌منظور درک بهتر رفتار دینامیکی، شکل‌های مودی برای پنج مود ابتدایی در اثر خرابی متوالی کابل‌ها از یک تا چهار کابل، مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که خرابی متوالی کابل‌ها به‌صورت کلی تغییرات محدودی در مقادیر دوره تناوب ایجاد می‌کند و این تغییرات چندان محسوس نیست. بااین‌حال، در مود سوم تغییرات بیشتری نسبت به سایر مودها مشاهده شد که بیانگر حساسیت بالاتر این مود به پدیده خرابی کابل‌ها است. بررسی تغییر شکل‌های مودی نیز آشکار ساخت، راستای اصلی تغییر شکل در مودهای اول تا پنجم برای حالت‌های مختلف خرابی کابل (از یک تا چهار کابل) به طور عمده در راستای طولی پایلون قرار دارد. باتوجه‌به سهم مشارکت جرمی تجمعی مودها در راستاهای متفاوت، می‌توان نتیجه گرفت به دلیل پیچیده بودن سازه از لحاظ هندسی باید تحلیل مودال را برای ۳۴ مود در جهت طولی انجام داد تا مشارکت مودها حداقل به ۷۰ درصد رسیده باشد که با خرابی متوالی کابل‌ها تغییرات چندانی در تعداد مودهای لازم برای رسیدن به ۷۰ درصد مشارکت جرمی ایجاد نشده است. بنابراین نتایج کلی نشان داد که خرابی حداقل چهارکابل بصورت متوالی باعث کمترین تغییرات در مشخصات دینامیکی سازه خواهد شد و این سازه‌ها به درستی در برابر کنترل خرابی پیش‌رونده طراحی شده‌اند

مراجع

1. L. Wei, H. Cheng, and J. Li, "Modal analysis of a cable-stayed bridge," *Procedia engineering*, vol. 31, pp. 481-486, 2012.
2. G. Chen, D. Yan, W. Wang, M. Zheng, L. Ge, and F. Liu, "Assessment of the Bill Emerson memorial cable-stayed bridge based on seismic instrumentation data," 2007.
3. S. J. Dyke, J. M. Caicedo, G. Turan, L. A. Bergman, and S. Hague, "Phase I benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, no. 7, pp. 857-872, 2003.

۴. د. فراهانی. م. یزدانی, "بررسی تاثیر رویکردهای گوناگون مدل‌سازی پل‌های کابلی خودایستا با استفاده از تحلیل مودال", دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات, ۱۴۰۱.

5. M. Wolff and U. Starossek, "Cable loss and progressive collapse in cable-stayed bridges," *Bridge structures*, vol. 5, no. 1, pp. 17-28, 2009.
6. R. Das, A. Pandey, M. Mahesh, P. Saini, and S. Anvesh, "Progressive collapse of a cable stayed bridge," *Procedia Engineering*, vol. 144, pp. 132-139, 2016.
7. M. E. Omran and A. H. Karani, "Cable loss performance investigation of cable-stayed bridge equipped with Roll-N-Cage isolator," in *Structures*, 2022, vol. 41: Elsevier, pp. 1329-1344.

۸. د. فراهانی. م. یزدانی, "محاسبه ضریب امنیت پل‌های کابلی خودایستا به علت گسیختگی متوالی کابل‌ها در هنگام زلزله "نهمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله, ۱۴۰۲.

۹. د. فراهانی. م. یزدانی, ""بررسی تاثیر گسیختگی کابل‌های متوالی بر ظرفیت لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا ", سیزدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران, ۱۴۰۲.

۱۰. د. فراهانی. م. یزدانی, "بررسی تاثیر گسیختگی یک کابل بحرانی بر ظرفیت لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا ",ششمین همایش بین المللی مهندسی سازه, ۱۴۰۱.

۱۱. م. یزدانی. د. فراهانی, "بررسی تاثیر گسیختگی کابل بر رفتار لرزه‌ای پل‌های کابلی خودایستا در حوزه فرکانس the ", چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات, ۱۴۰۳.