

ارزیابی روش تشخیص آسیب مبتنی بر پاسخ‌های حوزه زمان با پارامترهای مودال برای کابل‌ها در پل‌های ترکه‌ای

مهتاب محسنی مقدم^۱، احسان دهقانی^{۲*}، مریم بیطرف^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

*قم، صندوق پستی ۳۷۱۶۱۴۶۱۱، dehghani@qom.ac.ir

چکیده

با توجه به نقش حیاتی پل‌های ترکه‌ای و شرایط محیطی نامطلوب که اغلب برای این پل‌ها چالش‌برانگیز است، پایش سلامت آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. کابل‌های کششی، به‌عنوان اجزای اصلی باربر در پل‌های ترکه‌ای به‌دلیل شرایط محیطی، بسیار آسیب‌پذیر هستند. در این مقاله، به بررسی عملکرد روشی جهت ارزیابی کابل‌های پل ترکه‌ای توسط پاسخ‌های عرشه در قیاس با پارامترهای مودال پرداخته شد. این روش با استفاده از تحلیل فضای فاز پاسخ‌های تغییر مکان عرشه در حوزه زمان تحت عبور بار مشخص، از طریق یک شبیه‌سازی عددی از پل ترکه‌ای ماناواگات ارزیابی شد. سناریوهای آسیب با شدت‌های آسیب ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ برای سطح مقطع کابل‌ها در نظر گرفته شد. شناسایی آسیب از طریق بررسی تغییرات در توپولوژی فضای فاز پاسخ‌ها بین مدل‌های سالم و آسیب‌دیده و دو شاخصه معیار اطمینان مودال و انعطاف‌پذیری مودال انجام شد. بر اساس نتایج، شاخصه تغییر در توپولوژی فضای فاز برخلاف انعطاف‌پذیری مودال، کابل‌های آسیب‌دیده را در تمام سطوح آسیب در نظر گرفته‌شده به‌غیر از کابل‌های پشتیبان شناسایی کرد. تغییرات ایجادشده در معیار اطمینان مودال برای سطح آسیب ۴۰٪ نیز بسیار ناچیز بود. این روش می‌تواند به‌عنوان یک ایده اولیه برای پایش سریع و مستمر کابل‌ها در پل‌های ترکه‌ای با حداقل اختلال ترافیکی و تنها با تکیه بر پاسخ‌های تغییر مکان عرشه مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی

پل ترکه‌ای، پایش سلامت کابل، پاسخ‌های حوزه زمان، فضای فاز، پارامترهای مودال

Evaluation of a Damage Detection Method Using Time-Domain Responses and Modal Parameters for Cables in Cable-Stayed Bridges

M. Mohseni Moghaddam, E. Dehghani, M. Bitaraf

Abstract

Given the crucial role of cable-stayed bridges and the challenging environmental conditions they often face, monitoring their health is essential. Stay cables, which are the primary load-bearing elements in cable-stayed bridges, are prone to damage due to environmental conditions. This paper investigated the performance of a method for evaluating the cables of a cable-stayed bridge using deck responses, compared to modal parameters. The technique utilized phase space analysis of deck displacement responses in the time domain under a specific moving load. This method was evaluated through a numerical simulation of the Manavgat cable-stayed bridge. Damage scenarios with intensities of 20%, 30%, and 40% were applied to the cross-sections of the cables. Damage identification was carried out by analyzing the changes in phase space topology (CPST) of the responses between the healthy and damaged models, along with two indicators, the modal assurance criterion (MAC) and modal flexibility. The results showed that the CPST index, unlike modal flexibility, identified the damaged cables at all damage levels except for the back-stay cables. The changes in the modal assurance criterion (MAC) at the 40% damage level were also very insignificant. This method can serve as a preliminary approach for fast and continuous monitoring of cables in cable-stayed bridges, minimizing traffic disruption while relying solely on the displacement responses of the deck.

Keywords

Cable-Stayed Bridge, Cable Health Monitoring, Time-Domain Responses, Phase Space, Modal Parameters

۱- مقدمه

پل‌های ترکه‌ای تحت تأثیر شرایط محیطی نامطلوب از جمله بادهای شدید، تغییرات دمایی زیاد و بارهای سنگین وسایل نقلیه هستند، که اغلب چالش‌هایی را برای مدیریت و نگهداری مؤثر این سازه‌ها ایجاد می‌کنند. بازرسی‌های معمول برای نگهداری مطلوب این پل‌ها، ناکافی و از نظر نیروی کار پرهزینه و زمانبر است. بنابراین، تمایل به استفاده از سیستم‌های پایش سلامت سازه^۱ در ارزیابی پل‌های ترکه‌ای نیز افزایش یافته است. پایش سلامت سازه شامل نظارت بر سازه در طول زمان، با استفاده از اندازه‌گیری پاسخ‌های دوره‌ای در فواصل معین، استخراج مشخصه‌ای حساس به آسیب از پاسخ‌ها و تحلیل آماری این مشخصه‌ها برای تعیین سطح سلامت فعلی سازه می‌باشد. این سیستم‌ها می‌توانند با ارائه هشدارهای اولیه، امکان اصلاح و نگهداری به‌موقع را تسهیل سازند. همچنین، ارزیابی آسیب در اجزای حیاتی از جمله درزهای انبساط و کابل‌های کششی را سهولت بخشند [۱ و ۲]. کابل‌های کششی، اجزای اصلی باربر در پل‌های ترکه‌ای هستند. عوامل محیطی، خوردگی، خستگی و ضربه می‌توانند به تخریب کابل‌ها منجر شده و سبب کاهش ظرفیت باربری آن‌ها گردند. اطمینان از سلامت کابل‌ها در طول عمر سازه و ارزیابی کارایی آن‌ها، یک مسئله مهم برای پل‌های ترکه‌ای موجود و تازه ساخته شده است.

با گذشت زمان، مطالعات عددی و آزمایشگاهی متعددی به بررسی پایش سلامت پل‌های ترکه‌ای پرداختند. در زمینه پایش سلامت پل‌های ترکه‌ای تحت تحریکات لرزه‌ای، بخشی‌زاده و همکاران [۳]، تأثیر تحریکات چندگانه تکیه‌گاهی^۲ بر پاسخ دینامیکی پل‌های ترکه‌ای با دهانه بلند را تحت اثر مخاطرات لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند. تومه^۳ و همکاران [۴]، روشی آنلاین جهت تشخیص زودهنگام آسیب و محل آن تحت تأثیر تغییرات شرایط محیطی و اجرایی پیشنهاد کردند که بر روی داده‌های پل ترکه‌ای بتنی پیش‌تنیده پیاده‌سازی شد. پل‌های ترکه‌ای انعطاف‌پذیری بسیاری دارند. در پیکربندی سازه‌ای آن، تیر اصلی مانند یک تیر بر روی پایه‌های الاستیک رفتار می‌کند. تکیه‌گاه‌های الاستیکی در حقیقت همان کابل‌های پل در نقاط اتصالشان هستند. مسیرهای اصلی بار در سراسر عرشه پل، اطلاعات ارزشمندی در

مورد وضعیت المان‌های سازه‌ای ثانویه ارائه می‌دهند. به بیان دیگر می‌توان نیروهای المان‌های ثانویه را یک تکیه‌گاه جزئی برای المان‌های اصلی در نظر گرفت. در پل‌های ترکه‌ای، کابل‌ها به‌عنوان المان‌های ثانویه، تکیه‌گاهی برای مسیر اصلی بار (تیرهای عرشه) هستند. نظریان و همکاران [۵]، رویکردی ساده برای شناسایی مکان کابل آسیب‌دیده و تخمین سطح آسیب در پل‌های ترکه‌ای معرفی نمودند. این روش شامل نظارت بر تغییرات واکنش‌های تکیه‌گاهی از طریق تحلیل نیروهای برشی وارد بر اجزای عرشه در نزدیک تکیه‌گاه بود. تغییر مکان‌های تیر اصلی و پایلون که عموماً با استفاده از حسگرهای سیستم موقعیت‌یابی جهانی^۴ و روش‌های مبتنی بر تصویر^۵ پیگیری می‌شوند، از شاخصه‌های اصلی عملکرد پل ترکه‌ای هستند. در پل‌های ترکه‌ای با دهانه‌های بلند، این تغییر مکان‌ها اغلب به‌صورت استاتیکی در حین آزمایش بارگذاری قبل از افتتاح پل جهت تردد، اندازه‌گیری می‌شوند. اندازه‌گیری‌های شتاب نیز می‌توانند داده‌های تغییر مکان را ارائه دهند، اما دقت آن‌ها کم‌تر است (ژانگ^۶ و همکاران [۶]). علاوه بر این، عوامل مختلفی مانند تغییرات دمایی، نیروهای باد و ترافیک وسایل نقلیه بر تغییر مکان پل‌های با دهانه بلند تأثیر می‌گذارند. در مطالعه لی^۷ و همکاران [۷]، رویکردی شامل یک مدل رمزگذار خودکار حلقه‌ای باقی‌مانده^۸ یک‌بعدی جهت تخمین پاسخ‌های تغییر مکان یک پل ترکه‌ای تحت شرایط بارگذاری مختلف جهت ارائه هشدارهای اولیه برای خرابی‌های احتمالی پل پیشنهاد کردند.

بازرسی کابل‌ها به‌عنوان اجزای حیاتی پل‌های ترکه‌ای به‌دلیل انتقال مستقیم بارهای مرده و زنده از طریق کابل‌ها به پایلون از جمله مسائل بنیادی و مهم است. از اولین پژوهش‌ها در زمینه اهمیت تأثیر سختی کابل‌ها در رفتار پل‌های ترکه‌ای، مطالعه کریشنا^۹ و همکاران بود [۸]. مطالعات آن‌ها بر روی پل‌هایی با تعداد کابل‌های مختلف و نسبت‌های متفاوت دهانه کناری به میانی انجام پذیرفت. پاسخ کشش کابل‌ها، تغییر شکل تیر و پایلون و لنگر تیر، تحت بار گسترده یکنواخت سراسر عرشه مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های مبتنی بر ارتعاش به‌طور گسترده‌ای برای تخمین کشش کابل و ارزیابی سلامت سازه‌های کابلی استفاده می‌شوند. کشش کابل می‌تواند با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله اندازه‌گیری‌های مستقیم با حسگر نیرویی، اندازه‌گیری‌های

⁴ Global Positioning System⁵ Vision-based Methods⁶ Zhang⁷ Lei⁸ Residual Convolutional Autoencoder Model⁹ Krishna¹ Structural Health Monitoring² Multiple Support Excitations³ Tome

بدون تماس^۱ و یا ارزیابی پارامترهایی مانند تنش، کرنش و فرکانس طبیعی تعیین شود [۹-۱۱]. در مطالعه زرباف و همکاران [۱۲]، از فرکانسهای طبیعی، خواص مکانیکی و ویژگیهای هندسی کابلها برای برآورد کشش و ارزیابی کابلهای پل ترکیبی استفاده شد. وانگچوک^۲ و همکاران [۱۳]، مطالعه‌ای در زمینه تخمین کشش کابلهای ترکیبی با استفاده از اندازه‌گیریهای مبتنی بر تصویر انجام دادند. جابه‌جاییهای مکانی کابل از توالی تصاویر کابل استخراج گردید و پارامترهای مودال کابل از پاسخهای جابه‌جایی کابل شناسایی شدند. تکنیک پیشنهادی بر اساس فرکانسهای طبیعی شناسایی شده، به‌طور دقیق کشش کابلها را برآورد کرد.

درحالی‌که اندازه‌گیری فرکانس دقت بالایی ارائه می‌دهد، اما به یک دید کلی تمایل دارد. این روش برای تشخیص آسیبهای موضعی چالش‌هایی ایجاد کرده است. شکل مد و مشتقات آن نیز مانند انحنای مودال و انعطاف‌پذیری مودال، از نظر تئوری حساس به آسیب هستند. با این حال، اغلب تحت تأثیر نوفه^۳ اندازه‌گیری قرار می‌گیرند و قابلیت اطمینان آنها در سناریوهای عملی هنگام استفاده از داده‌های جابه‌جایی یا شتاب کاهش می‌یابد (وو^۴ و همکاران [۱۴]). روشهای تشخیص آسیب مبتنی بر پاسخهای حوزه زمان در شناسایی آسیبهای موضعی قوی‌تر عمل کرده است. روشهای مبتنی بر پاسخهای حوزه زمان به‌صورت مستقیم آسیب را از پاسخهای خروجی بدون نیاز به تبدیل به مشخصات مودال سازه شناسایی می‌کنند. این روش به‌طور مستقیم سطح آسیب موضعی پل را منعکس کرده است و حساسیت بالاتری نسبت به آسیبهای موضعی نشان داده است [۱۵ و ۱۶]. وسایل نقلیه عامل اصلی تأثیرگذار بر رفتار پلها هستند. وو و همکاران [۱۴]، روشی جهت پایش سختی و تشخیص آسیب در پلها، تحت عبور وسیله نقلیه پیشنهاد کرده‌اند. ژانگ و همکاران [۱۷]، یک تکنیک سریع برای تشخیص آسیب در پلهای بزرگراهی تحت بار متحرک مبتنی بر خروجی معرفی کرده‌اند. این تکنیک بر اساس بعد فراکتال^۵ پاسخهای کرنش عمل کرده است.

تحلیل فضای فاز^۶ به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای شناسایی آسیب ظهور کرده است. این روش در ابتدا داده‌های سری زمانی را به یک حوزه فضایی تبدیل می‌کند. در این حوزه، تغییرات

جزئی در پارامترها نیز می‌توانند در سراسر سیستم منعکس شوند. ژانگ و همکاران [۱۸]، روشی برای شناسایی آسیب در پل با تکیه‌گاههای ساده تحت عبور بار متحرک پیشنهاد دادند که از تغییرات در مسیرهای فازی استفاده کرده است. نتایج این پژوهش نشان داد، روش ارائه‌شده عملکرد بسیار خوبی در تشخیص آسیب موضعی در پلهای تحت عبور بار متحرک داشت و مقدار آن با افزایش شدت آسیب نیز افزایش یافت. این روش همچنین عملکرد قابل‌قبولی در مقابله با اثرات نوفه در اندازه‌گیریها داشت. نی^۷ و همکاران [۱۹ و ۲۰]، شاخص‌ای برای شناسایی آسیب سازه‌ای بر اساس تغییرات در توپولوژی فضای فاز (CPST)^۸ پاسخهای یک دال دو دهانه پیشنهاد دادند. مقادیر CPST ناشی از پاسخهای نقاط اندازه‌گیری در فضای فاز نیز با افزایش سطح آسیب افزایش یافت. مطالعه توتیپونگساوات^۹ و همکاران [۲۱] نیز در زمینه تشخیص آسیب در تیر بتنی پیش‌تنیده بر اثر تغییرات توپولوژی فضای فاز بود. پنگ^{۱۰} و همکاران [۲۲]، رویکردی برای افزایش قابلیت شناسایی آسیب سازه‌ای با استفاده از تکنیک توپولوژی فضای فاز مبتنی بر تحلیل طیف منفرد^{۱۱} از پاسخهای شتاب پیشنهاد دادند. حساسیت قابل‌توجه تحلیل فضای فاز به آسیب، سبب شده است که این روش به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف مربوط به شناسایی آسیبهای سازه‌ای استفاده شود [۲۳-۲۵].

مقاله حاضر به بررسی عملکرد پایش سلامت کابلهای پلهای ترکیبی در حوزه فضای فاز با پارامترهای مودال می‌پردازد. در بسیاری از مطالعات و پژوهشهای انجام‌شده بر روی پلهای ترکیبی، تشخیص آسیب اغلب در حوزه فرکانس بررسی شده است. این روش برای تشخیص آسیبهای موضعی چالش‌هایی ایجاد کرده است. روشهای مبتنی بر پاسخهای حوزه زمان به‌صورت مستقیم آسیب را از پاسخهای خروجی بدون نیاز به تبدیل به مشخصات مودال سازه، شناسایی می‌کنند. همان‌طور که در مطالعات گذشته ذکر شد، تکنیک فضای فاز اغلب بر روی قاب‌ها یا پلهای بزرگراهی انجام شده است. در این مقاله از این روش برای شناسایی آسیب در پلهای ترکیبی استفاده شد. به‌کارگیری پاسخهای حوزه زمان مانند تغییر مکان عرشه و پس از آن و ارزیابی تغییرات توپولوژی فضای فاز پاسخها در یک پل

⁷ Nie

⁸ Change in Phase Space Topology

⁹ Tuttipongsawat

¹⁰ Peng

¹¹ Singular Spectrum Analysis

¹ Non-Contact Measurements

² Wangchuk

³ Noise

⁴ Wu

⁵ Fractal Dimension

⁶ Phase Space Analysis

آسیب با حالت سالم، امکان شناسایی آسیب را فراهم می‌کند. در این مقاله، شاخصه آسیب تغییر در توپولوژی فضای فاز (CPST) برای پل ترک‌های مورد استفاده قرار گرفت.

مفهوم CPST، اندازه‌گیری عدم تشابه بین حالت آسیب پیش‌بینی‌شده و حالت آسیب واقعی است (پاموانی^۷ و شلکه^۸ [۲۳]). اگر $X(n)$ و $Y(n)$ به ترتیب پاسخ‌های بازسازی‌شده در فضای فاز برای حالت سالم و حالت آسیب‌دیده در نظر گرفته شود، ابتدا یک نقطه مرجع $Y(k)$ در زمان k از حالت آسیب‌دیده انتخاب و بر روی حالت سالم نگاشت می‌شود. با کمینه‌کردن نرم اقلیدسی، نزدیک‌ترین نقاط در همسایگی این نقطه مرجع در حالت سالم به دست می‌آیند:

$$NN_F(n_j): \min \|X(n_j) - Y(k)\|, \quad j = 1, \dots, p \quad (2)$$

(P) نشان‌دهنده تعداد کل نقاط همسایگی است. مجموعه نقاط همسایگی نزدیک به نقطه مرجع $Y(r)$ با عنوان (NN) نشان داده می‌شود. حالت آسیب پیش‌بینی‌شده در گام زمانی (s) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

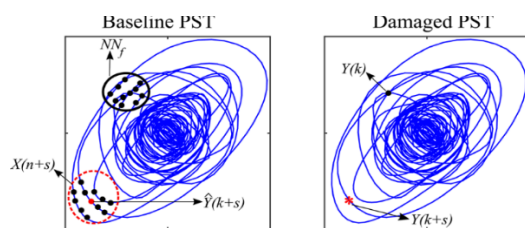
$$\bar{Y}(k+s) = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p X(n_j + s), \quad j = 1, \dots, p \quad (3)$$

تفاوت حالت آسیب واقعی و حالت آسیب پیش‌بینی‌شده در نقطه مرجع در زمان (r) به شرح زیر است:

$$CPST = \frac{1}{p} \left\| \bar{Y}(k+s) - Y(k+s) \right\| \quad (4)$$

برای دستیابی به برآورد معقول از CPST، روند محاسبات بالا برای تعداد (nt) نقاط مرجع تکرار می‌شود. در نظر گرفتن حداقل ۵٪ از کل تعداد نقاط در مسیر بازسازی‌شده به عنوان تعداد نقاط مرجع توصیه شده است (نیکلز^۹ [۳۱]). نمای شماتیک از محاسبات ذکر شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

$$CPST = \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{nt} CPST(i) \quad (5)$$



شکل ۱- تصویر شماتیک محاسبه CPST بین مسیر فضای فاز برای حالت سالم و آسیب‌دیده [۲۳]

ترک‌های معیار، جهت بررسی سلامت کابل‌ها در اثر عبور بار متحرک مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. رویکرد مورد بررسی، نیاز به جایگذاری سنسورهای پرهزینه در سراسر پل و اختلال ترافیک جهت آزمایش‌های فرکانس را به حداقل می‌رساند. تغییر مکان‌های عرشه توسط روش‌های مبتنی بر دید^۱ به وسیله دوربین قابل اندازه‌گیری هستند. جزئیات بازسازی فضای فاز، مدل پل ترک‌های و نتایج حاصل از پاسخ‌های فضای فاز و مشخصه‌های مودال در بخش‌های بعد ارائه شده است.

۲- روش شناسی

۲-۱- تغییر در توپولوژی فضای فاز (CPST)

تحلیل فضای فاز روشی نوین جهت تشخیص آسیب است. این روش به دلیل بزرگ‌نمایی تغییرات ایجاد شده در پاسخ‌های حوزه زمان و بازگردانی آن‌ها در یک حوزه فضایی، حساسیت بالایی نسبت به آسیب‌ها نشان می‌دهد. در فضای فاز، هر متغیر از سازه، نشان‌دهنده یک بعد متمایز از فضای چندبعدی می‌باشد. در نتیجه هر تغییری در یک پارامتر، در کل سیستم انعکاس می‌یابد. سیستم‌های دینامیکی را نیز می‌توان با بازسازی پاسخ‌های سری زمانی اندازه‌گیری‌شده در یک فضای فاز تعریف کرد. بازسازی این فضا می‌تواند با به‌کارگیری چندین نوع پاسخ انجام پذیرد و یا با استفاده از یک نوع پاسخ مبنی بر یک اختلاف فاز یا تأخیر زمانی بر اساس پارامترهای تأخیر زمانی (T) و بعد تعبیه‌شده (d) صورت گیرد (تاکنس^۲ [۲۶]). در هر زمان (n)، بازسازی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۱]:

$$X(n) = [x(n), x(n+T), \dots, x(n+(d-1)T)] \quad (1)$$

تأخیر زمانی با استفاده از روش‌هایی مانند تابع همبستگی خودکار^۳ و تابع اطلاعات متقابل میانگین^۴ تعیین می‌شود [۲۷ و ۲۸]. تکنیک‌های برجسته‌ای شامل تحلیل سیستم منفرد^۵ و روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب^۶، برای تعیین بعد تعبیه‌شده مناسب استفاده می‌شود [۲۹ و ۳۰]. در این مقاله، از تابع اطلاعات متقابل میانگین برای تعیین تأخیر زمانی و از روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب برای تعیین بعد تعبیه‌شده استفاده شد. مجموعه تمام ابعاد ترسیم‌شده به عنوان توپولوژی فضای فاز شناخته می‌شود. هندسه مسیر فاز به شدت به پاسخ و رفتار دینامیکی سازه وابسته است. با وقوع تدریجی آسیب، تغییرات قابل توجهی در پاسخ‌های سازه ایجاد می‌شود که به صورت متمایزی در توپولوژی فضای فاز منعکس می‌شود. کمی‌سازی عدم تشابه توپولوژی در هنگام وقوع

⁷ Pamwani

⁸ Shelke

⁹ Nichols

¹ Vision-based Methods

² Takens

³ Autocorrelation Function

⁴ Average Mutual Information Function (AMIF)

⁵ Singular System Analysis (SSA)

⁶ False Nearest Neighbor (FNN)

با ایجاد آسیب سختی، جرم و یا مشخصه‌های اتلاف انرژی سیستم تغییر می‌کنند. مشخصه‌های مودال تابعی از این خصوصیات هستند. آسیب به‌طور معمول یک پدیده موضعی است و ممکن است تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سازه در فرکانس‌های پایین نداشته باشد. عدم امکان تعیین دقیق موقعیت مکانی آسیب نیز از معایب دیگر فرکانس مودال به‌عنوان شاخصه شناسایی آسیب است. شکل‌های مد برخلاف فرکانس، می‌توانند اطلاعات مکانی در مورد وضعیت آسیب ارائه دهند و قابل اندازه‌گیری هستند. در این مقاله، از مشتقات شکل‌های مد به معیار اطمینان مودال (MAC)^۱ و انعطاف‌پذیری^۲ مودال پرداخته شد.

۲-۲-۱- معیار اطمینان مودال (MAC)

معیار اطمینان مودال یک شاخصه عددی جهت تعیین سطح همبستگی و تشابه بین مدهای حالت سالم و مدهای حالت آسیب‌دیده است. این مشخصه از ویژگی‌های تعامد شکل‌های مد بهره می‌گیرد و مقدار آن بین صفر و یک است. مقدار یک و صفر به‌ترتیب نشان‌دهنده تشابه کامل دو شکل مد و عدم تشابه کامل است. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۹ نشان‌دهنده تطابق سازگار است، درحالی‌که مقادیر کوچک نشان‌دهنده شباهت ضعیف بین دو شکل مد است (پاستور^۳ و همکاران [۳۲]).

$$MAC(\{\phi\}_x, \{\phi\}_y) = \frac{|\{\phi\}_x^T \{\phi\}_y|^2}{(\{\phi\}_x^T \{\phi\}_x)(\{\phi\}_y^T \{\phi\}_y)} \quad (6)$$

$\{\phi\}_x$ و $\{\phi\}_y$ به‌ترتیب بردار شکل‌های مد برای حالت سالم و آسیب‌دیده هستند.

۲-۲-۲- انعطاف‌پذیری مودال

ماتریس نرمی $[G]$ به‌عنوان معکوس ماتریس سختی $[k]$ تعریف می‌شود:

$$\{f\} = [k]\{y\} \rightarrow \{y\} = [k]^{-1}\{f\} = [G]\{f\} \quad (7)$$

$\{f\}$ بردار بارهای استاتیکی اعمال‌شده به سازه و $\{y\}$ بردار تغییرمکان متناظر این بارگذاری است. ماتریس نرمی از داده‌های مودال به‌صورت زیر مشتق می‌شود:

$$[G] \approx [\phi][diag(\omega^2)]^{-1}[\phi]^T \quad (8)$$

$[\phi]$ ماتریس شکل مد و (ω) فرکانس‌های طبیعی متناظر هستند. تفاضل ماتریس‌های نرمی دو مدل سالم و آسیب‌دیده،

معیاری جهت ارزیابی تغییرات نرمی حاصل از آسیب در نظر گرفته می‌شود.

$$[\Delta G] = [G]_x - [G]_y \quad (9)$$

که در آن $[\Delta G]$ تغییرات ماتریس نرمی است و از شکل‌های مد و فرکانس‌های طبیعی تعیین می‌شود. بیش‌ترین مقدار مطلق هر ستون در این ماتریس برای تعیین سطح تغییرات ناشی از آسیب محاسبه می‌شود (پاندی^۴ و بیسواس^۵ [۳۳]). به‌دلیل آن که ایجاد آسیب در سازه اغلب بر سختی و فرکانس‌های طبیعی آن تأثیر می‌گذارد، تغییرات در انعطاف‌پذیری مودال نیز در پایش سلامت پل‌ها و سازه‌های دیگر استفاده می‌شود.

۳- پل ترکیه‌ای مورد مطالعه

پل ترکیه‌ای ماناواگات^۶ برای تحلیل عددی مورد مطالعه قرار گرفت. این پل اولین پل ترکیه‌ای در کشور ترکیه است که برای عبور دو خط ترافیک طراحی شده است. پل ماناواگات دارای یک پایلون به ارتفاع ۴۲ متر و دو دهانه به طول ۱۰۱ متر است. عرشه آن به عرض ۱۳/۷ متر توسط ۲۸ کابل به برج فولادی متصل شده است. عرشه از یک مقطع کامپوزیت که شامل ۲۵ سانتی‌متر بتن، ۱۰ سانتی‌متر آسفالت و دو تیر فولادی پیوسته که به‌صورت عرضی مهار شده‌اند، ساخته شده است. پروفیل‌های فولادی I شکل به‌صورت پیوسته در طول عرشه تعبیه شده‌اند. فاصله کابل‌ها از یکدیگر مساوی و برابر با ۱۲ متر و فاصله نزدیک‌ترین کابل به پایلون ۱۹/۶ متر است. کابل‌های پشتیبان^۷ در فاصله ۹/۴ متری از تکیه‌گاه‌ها قرار دارند. آرایش کابل‌ها، سطح مقطع عرشه و پایلون در شکل (۲) نشان داده شده است (پن^۸ و همکاران [۳۴]).

۳-۱- مدل‌سازی

مدل‌سازی پل ترکیه‌ای ماناواگات، توسط یک مدل سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 انجام شد. برای مدل‌سازی عرشه و پایلون از المان قاب و برای کابل‌ها از المان خرپا استفاده شد. اتصال پایلون به فونداسیون به‌صورت گیردار در نظر گرفته شد. کابل‌ها که با برچسب C1 تا C7 و C14 تا C8 مشخص شده است، به‌ترتیب شامل ۲۴، ۱۹، ۲۲، ۱۹، ۱۹، ۱۶ و ۱۵ رشته^۹ هستند. هر رشته دارای مدول الاستیسیته ۱۹۷ گیگاپاسکال، سطح مقطع ۱۵۰ میلی‌مترمربع و مقاومت نهایی ۱۸۶۰ مگاپاسکال است. مدول

⁴ Pandey

⁵ Biswas

⁶ Manavgat Cable-Stayed Bridge

⁷ Back-stay cables

⁸ Pan

⁹ Strand

¹ Modal Assurance Criterion

² Modal Flexibility

³ Pastor

الاستیسیته برای بتن و فولاد به ترتیب ۳۴ گیگاپاسکال و ۲۰۰ گیگاپاسکال لحاظ شد.

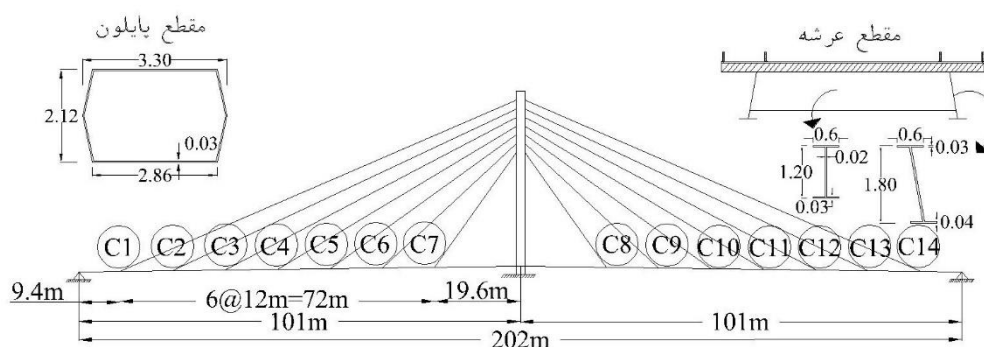
برای شبیه سازی تعامل بین پل و وسیله نقلیه، بار محورهای یک کامیون دوحوره مشابه بار استاندارد آشتو به عنوان نمونه در مدل سه بعدی به کار گرفته شد. تحلیل پل ترکیه ای با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی تحت عبور کامیون به صورت رفت و برگشت با سرعت متوسط ۱۰ کیلومتر بر ساعت انجام شد. از اثرات دینامیکی در تحلیل صرف نظر شد. بار متحرک از طریق توزیع چندین بار متمرکز با فواصل یکسان با تابع زمانی مثلی به صورت متوالی به عرشه اعمال شد. بدین صورت که هر یک از بارهای متمرکز به صورت تاریخچه زمانی به عرشه اعمال و از روی آن حذف شدند. بارهای متمرکز با اختلاف زمانی معادل نسبت فاصله بارها از هم به سرعت عبور، به صورت متحرک از روی عرشه عبور داده شده است.

آسیب در کابل ها می تواند ناشی از عوامل متفاوتی مانند خوردگی، خستگی یا برخورد وسایل نقلیه ایجاد شود. همه حالت های آسیب سبب کاهش سختی کابل و تغییر در نیروی آن می شود. کاهش سختی اغلب با تغییر در سطح مقطع و یا مدول الاستیسیته کابل شبیه سازی می شود. در این مقاله، میزان کاهش سختی کابل با کاهش درصدی از سطح مقطع کابل شبیه سازی شد. برای نمونه، شش سناریوی آسیب هر کدام با درصدهای ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ طبق مشخصات ذکر شده در جدول (۱) انتخاب شدند. شماره گذاری کابل ها به ترتیب از چپ به راست، C1 تا C14 در نظر گرفته شد.

جدول ۱- سناریوهای آسیب

شماره	شماره	درصد	شماره	درصد	شماره
سناریو	کابل	آسیب (%)	سناریو	کابل	آسیب (%)
۱	C1	۲۰	۴	C9	۲۰
		۳۰			۳۰
		۴۰			۴۰
۲	C4	۲۰	۵	C12	۲۰
		۳۰			۳۰
		۴۰			۴۰
۳	C7	۲۰	۶	C13	۲۰
		۳۰			۳۰
		۴۰			۴۰

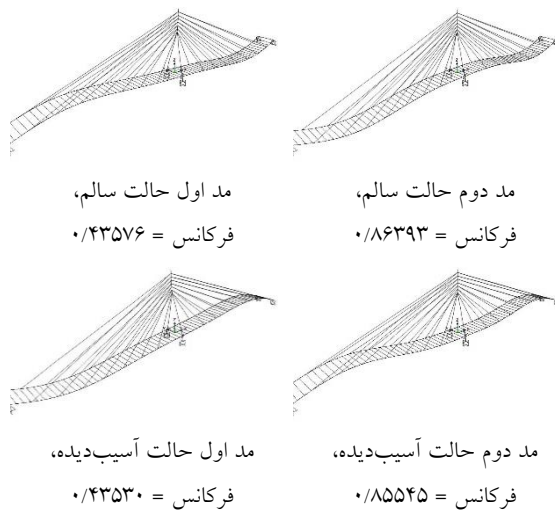
بار کامیون به مدل پل در حالت سالم و هر یک از شش سناریوی آسیب با درجات آسیب مختلف به صورت جداگانه اعمال شد. برای تحلیل تاریخچه زمانی، از فرکانس نمونه برداری ۲۰ هرتز و نسبت میرایی ۵٪ استفاده شد. پاسخ های تغییر مکان عرشه در نقاط اتصال به کابل ها استخراج شد. تغییر مکان هر نقطه در طول زمان عبور بار، با استفاده از تأخیر زمانی و بعد تعبیه شده که از خود تغییر مکان های اندازه گیری شده به دست آمده بود، در فضای فاز بازسازی شد. شاخصه CPST بین مسیرهای فاز مدل های سالم و آسیب دیده با استفاده از رابطه های (۲) الی (۵) محاسبه شد. با استفاده از فرکانس های طبیعی و شکل های مد برای شش مد اول حاصل از مدل های حالت سالم و آسیب دیده، انعطاف پذیری مودال و معیار اطمینان مودال (MAC) مطابق رابطه های (۶) الی (۹) به دست آمد.



شکل ۲- نمایی از پل ترکیه ای ماناوگات و مقاطع عرضی اجزای پل

۴- بحث و بررسی نتایج

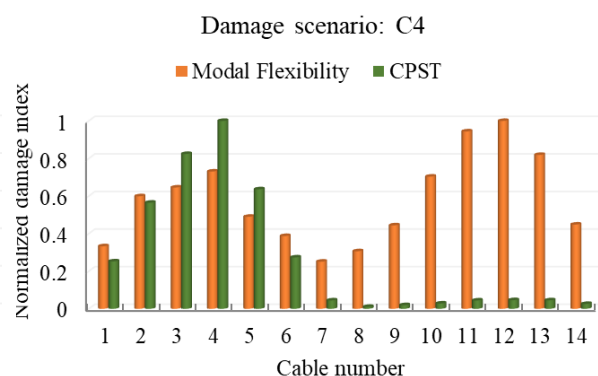
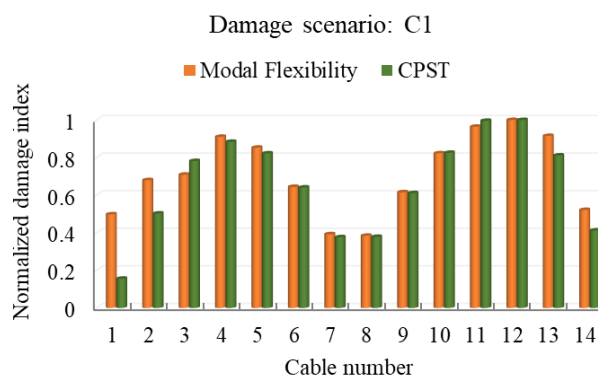
شکل‌های مد اول و دوم و فرکانس‌های شش مد اول سازه در حالت سالم و حالت ۳۰٪ آسیب در کابل ۱۲ برای نمونه به ترتیب در شکل (۳) و جدول (۲) نشان داده شده است. جهت ارزیابی تأثیر شدت آسیب در تشخیص کابل آسیب‌دیده توسط روش بیان‌شده و انعطاف‌پذیری مودال، نتایج سناریوها برای هر سطح آسیب به صورت مجزا در شکل‌های (۴) الی (۶) ارائه شده است. در شکل (۴) نتایج تشخیص آسیب برای سطح آسیب ۲۰٪ نشان داده شده است. با ایجاد آسیب در پل و تغییر در پاسخ‌های تغییرمکان، به دلیل عدم تشابه در مسیرهای فازی در فضای فاز، مقادیر CPST از مقدار صفر افزایش پیدا کرد. CPST در نقاط مشخصی به طور چشمگیر افزایش یافت و شماره کابل آسیب‌دیده با یک افزایش قابل توجه مشخص شد. شاخصه CPST برخلاف انعطاف‌پذیری مودال، کابل‌های آسیب‌دیده را در سناریوهای مربوط به کابل‌های ۴، ۷، ۹ و ۱۲ شناسایی کرد. همان‌طور که از نتایج نمودار این کابل‌ها مشخص است، تغییرات ایجادشده در سایر کابل‌ها به غیر از کابل آسیب‌دیده بسیار کم‌تر از پارامتر انعطاف‌پذیری مودال بود. زمانی که کابلی دچار کاهش سختی می‌شود و نیروی کششی آن کاهش می‌یابد، نیروی ازدست‌رفته بین کابل‌های نزدیک آن مجدداً توزیع می‌گردد. در نتیجه، در نمودار CPST برای کابل‌های نزدیک به کابل آسیب‌دیده نیز تغییرات بیش‌تری نسبت به کابل‌های دورتر مشاهده شد. کابل‌های آسیب‌دیده ۱ و ۱۳ توسط این شاخصه شناسایی نشدند. کابل شماره ۱ و ۱۳ کابل‌های پشتیبان هستند. کابل‌های پشتیبان، نقش تکیه‌گاه را برای سایر کابل‌های پل ایفا می‌کنند و هر تغییر در سختی و نیروی کششی آن‌ها در تمام کابل‌های پل نیز منعکس می‌شود.



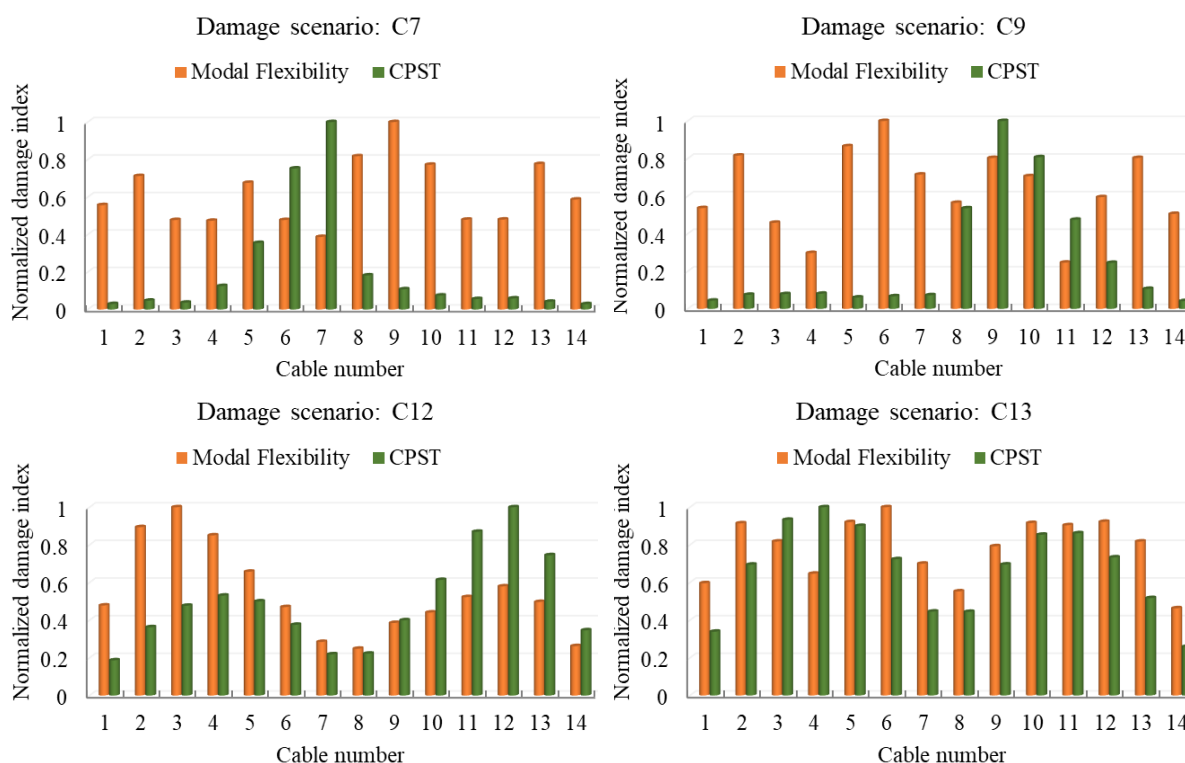
شکل ۳- شکل‌های مد اول و دوم برای حالت سالم و ۳۰٪ آسیب کابل ۱۲

جدول ۲- فرکانس‌های شش مد اول حالت سالم و ۳۰٪ آسیب کابل ۱۲

مد	فرکانس حالت سالم (Hz)	فرکانس حالت آسیب‌دیده (Hz)
۱	۰/۴۳۵۷۶	۰/۴۳۵۳۰
۲	۰/۸۶۳۹۳	۰/۸۵۵۴۵
۳	۱/۲۲۰۱۴	۱/۲۱۷۴۹
۴	۱/۳۹۳۹۲	۱/۳۹۳۶۱
۵	۱/۸۹۳۴۶	۱/۸۹۳۰۲
۶	۲/۱۶۱۸۲	۲/۱۶۱۴۱



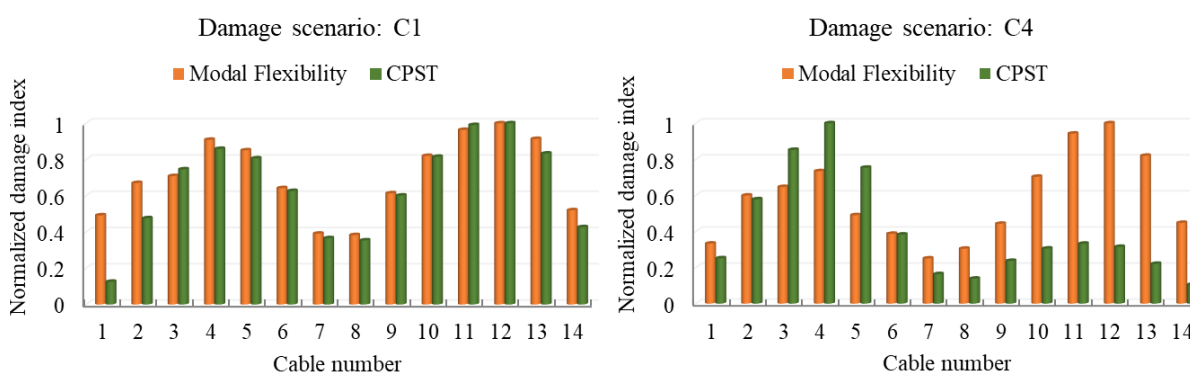
شکل ۴- نتایج تشخیص آسیب توسط CPST و انعطاف‌پذیری مودال برای ۲۰٪ آسیب



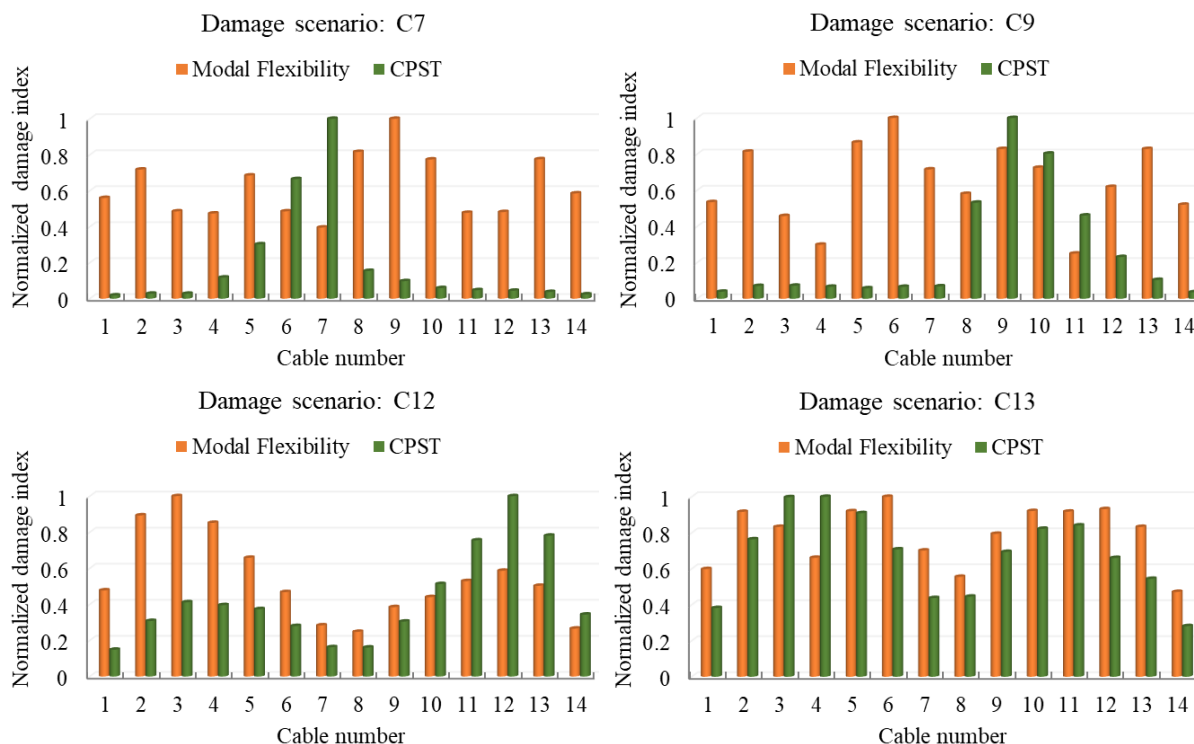
ادامه شکل ۴- نتایج تشخیص آسیب توسط CPST و انعطاف‌پذیری مودال برای ۲۰٪ آسیب

کم بود. شاخصه CPST این تغییرات کم را نیز به درستی با تشخیص کابل ۱۲ به عنوان کابل آسیب دیده شناسایی کرد. در این سطح آسیب نیز انعطاف‌پذیری مودال قادر به تشخیص هیچ کدام از سناریوهای آسیب نبود.

نتایج تشخیص آسیب برای سطح آسیب ۳۰٪ در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شدت آسیب نیز شاخصه CPST، تمام سناریوهای آسیب به غیر از سناریوهای مربوط به کابل‌های پشتیبان را شناسایی کرد. به دلیل افزایش شدت آسیب، تغییرات در سایر کابل‌ها نسبت به شدت آسیب ۲۰٪ افزایش داشته است. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شد، اختلاف مقادیر فرکانس‌های شش مد اول در سناریوی ۳۰٪ آسیب کابل ۱۲ بسیار



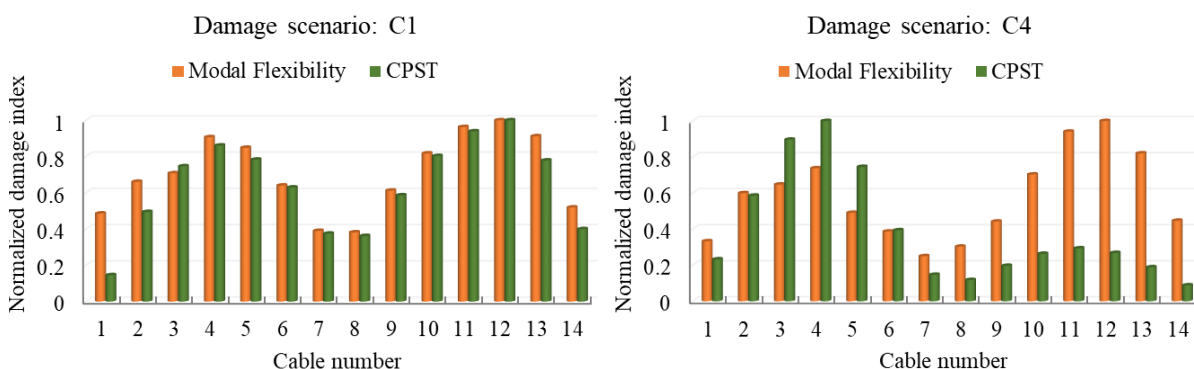
شکل ۵- نتایج تشخیص آسیب توسط CPST و انعطاف‌پذیری مودال برای ۳۰٪ آسیب



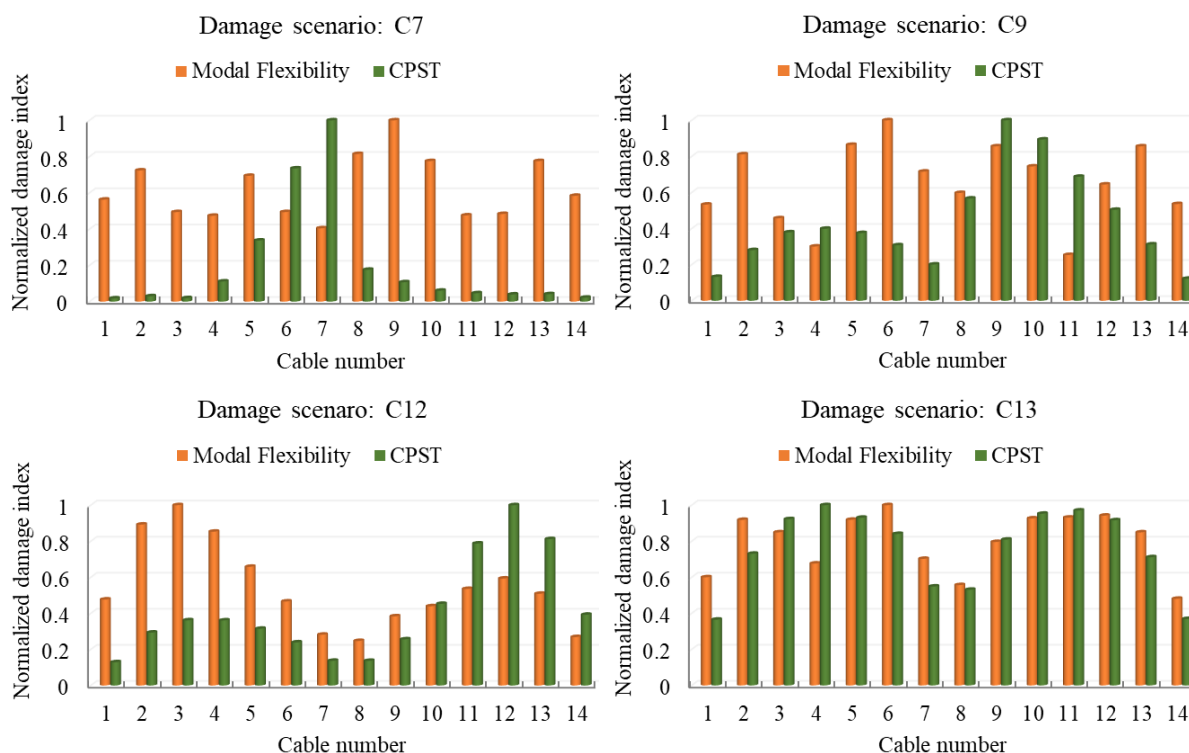
ادامه شکل ۵- نتایج تشخیص آسیب توسط CPST و انعطاف‌پذیری مودال برای ۳۰٪ آسیب

میزان افزایش CPST با افزایش شدت آسیب بیش‌تر شده است. اما در این مقاله به‌دلیل امکان مقایسه با انعطاف‌پذیری مودال، هر دو شاخصه نسبت به بیش‌ترین مقدار خود نرمال شدند.

همان‌طور که در نتایج تشخیص آسیب برای شدت آسیب ۴۰٪ در شکل (۶) نشان داده شده است، شاخصه CPST، سناریوهای آسیب مربوط به کابل‌های نزدیک پایلون (کابل ۷ و ۹) را نیز با دقت شناسایی کرد. نتایج در شدت آسیب ۴۰٪ نشان داد، CPST دقت بالایی برای شناسایی کابل‌های پشتیبان نداشت. مقایسه مقادیر CPST برای درجات مختلف آسیب نشان داد که



شکل ۶- نتایج تشخیص آسیب توسط CPST و انعطاف‌پذیری مودال برای ۴۰٪ آسیب



ادامه شکل ۶- نتایج تشخیص آسیب توسط CPST و انعطاف‌پذیری مودال برای ۴۰٪ آسیب

مقادیر با فرض درصد آسیب‌های در نظر گرفته شده برابر با ۱/۱٪ و ۱٪ آسیب هستند. در صورتی که داده‌های مودال از حالت آسیب ۴۰٪ استخراج شدند. به عبارت دیگر، ۴۰٪ آسیب در کابل‌های پل در مکان‌های مختلف تأثیر قابل توجهی در شکل‌های مد سازه ایجاد نکرد.

معیار اطمینان مودال (MAC) برای تمام سناریوهای آسیب در سطح آسیب ۴۰٪ برای شش مدل اول حالت سالم و آسیب‌دیده پل در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که در مقادیر قطر اصلی مشخص است، شاخصه MAC تغییرات بسیار ناچیزی برای تمامی کابل‌ها نشان داد. اگر بازه صفر (عدم تشابه کامل) تا یک (تشابه کامل) در شاخصه MAC معادل درصد آسیب ۰٪ تا ۱۰۰٪ در نظر گرفته شود، بیش‌ترین مقدار کاهش شاخصه MAC مربوط به مدل سوم و چهارم کابل ۹ معادل ۰/۱۱۰۵ و ۰/۱۰۲۶ بود. این

جدول ۳- معیار اطمینان مودال (MAC) برای سناریوهای ۴۰٪ آسیب

سطح آسیب ۴۰٪ در C1						
مد	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۱/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۴۲۱	۰/۰۰۲۱۲	۰/۰۰۰۰۵
۲	۰/۰۰۰۱۵	۰/۹۹۹۹۸	۰/۰۰۷۸۹	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۹۳	۰/۰۰۱۸۵
۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۷۳۰	۰/۹۹۹۹۶	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۲۴۸
۴	۰/۰۰۴۳۸	۰/۰۰۰۳۰	۰/۰۰۰۵۳	۰/۹۹۹۹۹	۰/۰۰۳۶۲	۰/۰۰۰۳۲
۵	۰/۰۰۱۶۷	۰/۰۰۰۷۷	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۰۲۶۵	۰/۹۹۹۹۲	۰/۰۰۰۲۳
۶	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۱۷۷	۰/۰۰۲۴۷	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۳۱	۰/۹۹۹۹۸
سطح آسیب ۴۰٪ در C4						
مد	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰/۹۹۹۹۸	۰/۰۰۱۲۱	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۲۷۲	۰/۰۰۱۳۱	۰/۰۰۰۳۹
۲	۰/۰۰۱۲۸	۰/۹۹۹۸۳	۰/۰۰۵۶۲	۰/۰۰۰۹۱	۰/۰۱۵۷۵	۰/۰۰۷۸۴
۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۳۲۵	۰/۹۹۹۷۱	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۲۱۰	۰/۰۰۱۳۷
۴	۰/۰۰۲۷۴	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۰۱۰	۰/۹۹۹۹۹	۰/۰۰۱۶۳	۰/۰۰۰۸۷
۵	۰/۰۰۰۹۷	۰/۰۱۱۱۳	۰/۰۰۱۶۶	۰/۰۰۱۴۵	۰/۹۹۹۶۷	۰/۰۲۹۷۳
۶	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۷۸۵	۰/۰۰۳۶۶	۰/۰۰۰۷۲	۰/۰۳۶۸۷	۰/۹۹۹۴۴
سطح آسیب ۴۰٪ در C7						
مد	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۱/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۲۰	۰/۰۰۱۶۹	۰/۰۰۲۳۲	۰/۰۰۳۸۴
۲	۰/۰۰۰۶۲	۰/۹۹۹۹۷	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۳۴۰	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۲۴
۳	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۲۰	۰/۹۹۲۰۶	۰/۰۰۱۹۷	۰/۰۴۹۸۳	۰/۰۱۵۶۱
۴	۰/۰۰۱۶۰	۰/۰۰۳۳۵	۰/۰۰۰۸۷	۰/۹۹۹۹۹	۰/۰۰۱۳۰	۰/۰۰۳۵۵
۵	۰/۰۰۱۴۶	۰/۰۰۰۶۸	۰/۰۳۷۸۸	۰/۰۰۲۱۲	۰/۹۹۶۷۳	۰/۱۱۷۷۹
۶	۰/۰۰۴۴۱	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۴۱۲۸	۰/۰۰۱۸۸	۰/۱۴۸۱۶	۰/۹۹۰۲۴
سطح آسیب ۴۰٪ در C9						
مد	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰/۹۹۹۷۹	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۵۲۳	۰/۰۰۱۶۹	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۰۱۳۲
۲	۰/۰۰۰۳۱	۱/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۱۵۱	۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۰۴۶۱
۳	۰/۰۰۳۹۷	۰/۰۰۰۸۹	۰/۹۸۸۹۵	۰/۱۳۶۵۲	۰/۰۱۰۶۰	۰/۰۰۰۱۱
۴	۰/۰۰۶۶۶	۰/۰۰۰۰۳	۰/۱۴۳۵۴	۰/۹۸۹۷۴	۰/۰۰۸۸۱	۰/۰۰۳۷۱
۵	۰/۰۰۰۴۹	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۱۱۲۷	۰/۰۲۳۸۸	۱/۰۰۱۳۰	۰/۰۰۲۹۱
۶	۰/۰۰۱۵۷	۰/۰۰۴۳۵	۰/۰۰۳۰۹	۰/۰۰۲۴۵	۰/۰۰۳۵۲	۱/۰۰۰۰۰



سطح آسیب ۴۰٪ در C12

مد	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۱/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰۴	۰/۰۰۲۹۶	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۳۰
۲	۰/۰۰۱۰۰	۰/۹۹۹۹۶	۰/۰۰۰۵۷	۰/۰۰۸۰۵	۰/۰۰۵۴۲	۰/۰۰۳۶۸
۳	۰/۰۰۲۸۱	۰/۰۰۰۵۵	۰/۹۹۹۹۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴۰	۰/۰۰۰۶۸
۴	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۷۸۴	۰/۰۰۰۱۳	۰/۹۹۹۸۷	۰/۰۰۲۴۰	۰/۰۰۱۲۵
۵	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۴۱۱	۰/۰۰۰۳۹	۰/۰۰۱۶۸	۰/۹۹۹۹۸	۰/۰۰۳۶۹
۶	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۳۲۶	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۰۱۲۱	۰/۰۰۴۶۴	۱/۰۰۰۰۰

سطح آسیب ۴۰٪ در C13

مد	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰/۹۹۹۹۳	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۱۹۱	۰/۰۰۰۵۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۳۸
۲	۰/۰۰۰۳۳	۱/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۹۷	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۰۳۹۷	۰/۰۰۳۲۲
۳	۰/۰۰۱۷۵	۰/۰۰۱۰۷	۰/۹۹۹۵۰	۰/۰۳۳۰۶	۰/۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۴۹
۴	۰/۰۰۱۸۸	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۳۵۴۹	۰/۹۹۹۴۱	۰/۰۰۲۲۳	۰/۰۰۰۴۲
۵	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۳۰۸	۰/۰۰۰۴۰	۰/۰۰۱۹۸	۰/۹۹۹۹۸	۰/۰۰۴۶۷
۶	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۰۳۰۶	۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۵۷۴	۰/۹۹۹۹۶

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد روش تشخیص آسیب در کابل‌های پل ترکه‌ای توسط تغییر در توپولوژی فضای فاز پاسخ‌های حوزه زمان عرشه با پارامترهای مودال مانند شاخصه معیار اطمینان مودال و انعطاف‌پذیری مودال بررسی شد. برای این منظور، پل ترکه‌ای ماناوگات با سناریوهای آسیب و شدت‌های آسیب مختلف به‌عنوان مدل عددی در نظر گرفته شد. روش تشخیص آسیب ارائه‌شده در فضای فاز بر پایه پاسخ تغییرمکان عرشه در نقاط اتصال به کابل‌ها تحت عبور بار متحرک مشخص بود. نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

- به دلیل آن که هرگونه تغییر در مشخصات کابل‌های پل در پاسخ‌های سازه منعکس می‌شود، بازسازی آن‌ها در فضای فاز سبب بزرگ‌نمایی این تغییرات می‌شود. شاخصه تغییر در توپولوژی فضای فاز (CPST)، کابل‌های آسیب‌دیده را در تمام سطوح آسیب در نظر گرفته‌شده به‌غیر از کابل‌های پشتیبان شناسایی کرد.
- کابل‌های پشتیبان به دلیل رفتار پیچیده خود مانند تکیه‌گاهی برای سایر کابل‌ها عمل می‌کنند. هر تغییری در مشخصات آن‌ها در سایر کابل‌ها نیز مشاهده شد. در حال حاضر این

روش دقت کافی برای تشخیص آسیب در کابل‌های پشتیبان

در ابتدا و انتهای پل را نداشت.

- انعطاف‌پذیری مودال که از معکوس ماتریس‌های سختی حالت سالم و آسیب‌دیده به‌دست آمد، قادر به تشخیص کابل آسیب‌دیده در هیچ‌کدام از سناریوهای آسیب نبود. در تمام سطوح آسیب، تغییرات زیادی در تمام کابل‌ها مشابه آنچه برای کابل‌های پشتیبان در شاخصه CPST رخ داد، مشاهده شد.
- در معیار اطمینان مودال ناشی از شکل‌های مد شش مد اول پل در سطح آسیب ۴۰٪ نیز تغییرات بسیار ناچیز مشاهده شد. به بیان دیگر، پایش سلامت کابل‌های پل مورد مطالعه در این پژوهش از طریق اشکال مد پل و مشتقات آن امکان‌پذیر نبود.

- [13] Wangchuk, S., Siringoringo, D.M., and Fujino, Y. (2022), "Modal Analysis and Tension Estimation of Stay Cables Using Noncontact Vision-Based Motion Magnification Method", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 29(7), pp. e2957.
- [14] Wu, B., Wu, G., Lu, H., and Feng, D. (2017), "Stiffness Monitoring and Damage Assessment of Bridges Under Moving Vehicular Loads Using Spatially-Distributed Optical Fiber Sensors", *Smart Materials and Structures*, Vol. 26(3), pp. 35058.
- [15] Wu, B., Wu, G., and Yang, C. (2019), "Parametric Study of a Rapid Bridge Assessment Method Using Distributed Macro-Strain Influence Envelope Line", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 120, pp. 642-663.
- [16] He, W.Y., Ren, W.X., and Zhu, S. (2017), "Baseline-free Damage Localization Method for Statically Determinate Beam Structures Using Dual-type Response Induced by Quasi-static Moving Load", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 400, pp. 58-70.
- [17] Zhang, L., Wu, G., and Cheng, X. (2020), "A Rapid Output-only Damage Detection Method for Highway Bridges Under a Moving Vehicle Using Long-gauge Strain Sensing and the Fractal Dimension", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 158, pp. 107711.
- [18] Zhang, W., Li, J., Hao, H., and Ma, H. (2017), "Damage Detection in Bridge Structures Under Moving Loads with Phase Trajectory Change of Multi-type Vibration Measurements", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 87(A), pp. 410-425.
- [19] Nie, Z., Hao, H., and Ma, H. (2013), "Structural Damage Detection Based on the Reconstructed Phase Space for Reinforced Concrete Slab: Experimental Study", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332(4), pp. 1061-1078.
- [20] Nie, Z., Hao, H., and Ma, H. (2012), "Using Vibration Phase Space Topology Changes for Structural Damage Detection", *Structural Health Monitoring*, Vol. 11(5), pp. 538-557.
- [21] Tuttipongsawat, P., Sasaki, E., Suzuki, K., Fukuda, M., Kawada, N., and Hamaoka, K. (2019), "PC Tendon Damage Detection Based on Phase Space Topology Changes in Different Frequency Ranges", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 17(8), pp. 474-488.
- [22] Peng, Z., Li, J., Hao, H., and Nie, Z. (2021), "Improving Identifiability of Structural Damage Using Higher Order Responses and Phase Space Technique", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 28(10), pp. 2808.
- [23] Pamwani, L., and Shelke, A. (2018), "Damage Detection Using Dissimilarity in Phase Space Topology of Dynamic Response of Structure Subjected to Shock Wave Loading", *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, Vol. 1(4), pp. 1-13.
- [24] Peng, Z., Li, J., and Hao, H. (2022), "Data Driven Structural Damage Assessment Using Phase Space Embedding and Koopman Operator Under Stochastic Excitations", *Engineering Structures*, Vol. 255, pp. 113906.
- [1] Zhang, Y.M., Wang, H., Bai, Y., Mao, J.X., Chang, X.Y., and Wang, L.B. (2021), "Switching Bayesian Dynamic Linear Model for Condition Assessment of Bridge Expansion Joints Using Structural Health Monitoring Data", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 160, pp. 107879.
- [2] Li, S., Niu, J., and Li, Z. (2021), "Novelty Detection of Cable-Stayed Bridges Based on Cable Force Correlation Exploration Using Spatiotemporal Graph Convolutional Networks", *Structural Health Monitoring*, Vol. 20(4), pp. 2216-2228.
- [3] Bakhshizadeh, A., Sadeghi, K., Ahmadi, S., and Royaei, J. (2023), "Damage Identification in Long-Span Cable-Stayed Bridges Under Multiple Support Excitations", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 21, pp. 1275-1290.
- [4] Tomé, E.S., Pimentel, M., and Figueiras, J. (2019), "Online Early Damage Detection and Localisation Using Multivariate Data Analysis: Application to a Cable-Stayed Bridge", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 26(11), pp. 1-20.
- [5] Nazarian, E., Ansari, F., and Azari, H. (2016), "Recursive Optimization Method for Monitoring of Tension Loss in Cables of Cable-Stayed Bridges", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27(15), pp. 2091-2101.
- [6] Zhang, H., Mao, J., Wang, H., Zhu, X., Zhang, Y., Gao, H., Ni, Y., and Hai, Z. (2023), "A Novel Acceleration-Based Approach for Monitoring the Long-Term Displacement of Bridge Cables", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 23(05), pp. 2350053.
- [7] Lei, X., Siringoringo, D.M., Sun, Z., and Fujino, Y. (2023), "Displacement Response Estimation of a Cable-Stayed Bridge Subjected to Various Loading Conditions with One-Dimensional Residual Convolutional Autoencoder Method", *Structural Health Monitoring*, Vol. 22(3), pp. 1790-1806.
- [8] Krishna, B.P., Arya, A.S., and Agrawal, T.P. (1985), "Effect of Cable Stiffness on Cable-Stayed Bridges", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 111(9), pp. 2008-2020.
- [9] Cheng, Y., Su, Z., and Zhang, J. (2024), "Mode Shape-Aided Cable Force Estimation of a Double-Hanger System Using a Vision-Based Monitoring Method", *Measurement*, Vol. 227, pp. 114214.
- [10] Rinaldi, C., Lepidi, M., Potenza, F., and Gattulli, V. (2023), "Identification of Cable Tension through Physical Models and Non-Contact Measurements", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 205, pp. 110867.
- [11] Yu, C.P. (2020), "Tension Prediction for Straight Cables Based on Effective Vibration Length with a Two-Frequency Approach", *Engineering Structures*, Vol. 222, pp. 111121.
- [12] Zarbaf, S.E.H.A.M., Norouzi, M., Allemang, R.J., Hunt, V.J., Helmicki, A., and Venkatesh, C. (2018), "Ironton-Russell Bridge: Application of Vibration-Based Cable Tension Estimation", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 144(6), pp. 04018066.



- [30] Broomhead, D.S., and King, G.P. (1986), "Extracting Qualitative Dynamics from Experimental Data", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 20(2-3), pp. 217-236.
- [31] Nichols, J.M. (2003), "Structural Health Monitoring of Offshore Structures Using Ambient Excitation", *Applied Ocean Research*, Vol. 25(3), pp. 101-114.
- [32] Pastor, M., Binda, M., and Harčarik, T. (2012), "Modal Assurance Criterion", *Procedia Engineering*, Vol. 48, pp. 543-548.
- [33] Pandey, A.K., and Biswas, M. (1994), "Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 169(1), pp. 3-17.
- [34] Pan, H., Azimi, M., Yan, F., and Lin, Z. (2018), "Time-Frequency-Based Data-Driven Structural Diagnosis and Damage Detection for Cable-Stayed Bridges", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 23(6).
- [25] Paul, B., George, R.C., and Mishra, S.K. (2017), "Phase space interrogation of the empirical response modes for seismically excited structures", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 91, pp. 250-265.
- [26] Takens, F. (1981), "Detecting Strange Attractors in Turbulence", In: *Dynamical Systems and Turbulence*, Vol. 898, pp. 366-381.
- [27] Jiang, A.H., Huang, X.C., Zhang, Z.H., Li, J., Zhang, Z.Y., and Hua, H.X. (2010), "Mutual Information Algorithms", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24(8), pp. 2947-2960.
- [28] Abarbanel, H., (2012), "Analysis of observed chaotic data", *Springer Science and Business Media*.
- [29] Rhodes, C., and Morari, M. (1997), "The False Nearest Neighbors Algorithm: An Overview", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 21, pp. 1149-1154.