

شناسایی آسیب در پل‌های کابلی با استفاده از اطلاعات مودال

محمد علیخانی دهقی^۱، غلامرضا قدرتی امیری^{۲*}، علی زارع حسین‌زاده^۳، سیدعلی سیدرزاقی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران-مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه به بررسی روش‌های شناسایی آسیب در پل‌های کابلی پرداخته شده است. پل‌های کابلی سازه‌هایی انعطاف پذیر هستند که در عین حال، از لحاظ لرزه‌ای نیز بسیار حساس می‌باشند. به علت رفتار ارتعاشی پیچیده حاکم بر پل‌های کابلی، همواره استفاده از روش‌های شناسایی آسیب بر پایه اطلاعات ارتعاشی در پل‌های کابلی با چالش‌هایی جدی روبرو بوده است. در این مطالعه، به مدل‌سازی، آنالیز و تشخیص آسیب در یک نمونه از پل‌های کابلی (پل کابلی بیل امرسون در ایالت میسوری) پرداخته شده است. در ابتدا، یک مدل اجزای محدود دقیق و صحیح برای شبیه‌سازی و مطالعه حالات مختلف آسیب در پل، ارائه شده است. سپس، مسأله شناسایی آسیب مورد مطالعه قرار گرفته است. روند کلی کار به این صورت است که از چهار شاخص شناسایی آسیب براساس اطلاعات مودال (مود شکل‌ها و فرکانس‌های طبیعی) استفاده و در هر مورد، نتیجه‌های شناسایی آسیب توسط شاخص‌های مربوط ارائه شده‌اند. این روش‌ها شامل شاخص هم‌بستگی اطمینان مودال بهبود یافته، شاخص خرابی، انحنای مودال، شاخص انعطاف‌پذیری مودال می‌باشند. تعدادی از این روش‌ها برای شناسایی آسیب در سازه‌ها و پل‌ها در گذشته به کار برده شده‌اند. در این مقاله، به بررسی مقایسه‌ای این روش‌ها تحت الگوهای مختلف آسیب و همچنین بررسی قوت روش‌ها تحت چالش‌هایی نظیر وجود نوفه‌های تصادفی در داده‌های ورودی، اطلاعات مودال ناقص و توانایی شناسایی آسیب‌ها با شدت کم در پل‌های کابلی پرداخته شده است و در ادامه، کارایی روش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: شناسایی آسیب در سازه‌ها، اطلاعات مودال، پل کابلی، مدل اجزا محدود، شاخص انحنای مودال، شاخص انعطاف‌پذیری مودال.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.127340.1523	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2018.127340.1523	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۲۶	۱۳۹۷/۰۴/۱۹	۱۳۹۷/۰۱/۲۷
			غلامرضا قدرتی امیری		*نویسنده مسئول:	
			ghodrati@iust.ac.ir		پست الکترونیکی:	

Damage identification in cable-stayed bridges using modal data

M. Alikhani Dehaghi¹, G. Ghodrati Amiri^{2*}, A. Zare Hosseinzadeh³, S. A. Seyed Razzaghi⁴

1- MSc Student in Civil Engineering-Earthquake Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- MSc in Civil Engineering-Earthquake Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this study, damage detection methods of cable stayed bridges were investigated. Cable stayed bridges are flexible structures; meanwhile they are sensitive to vibrations due to their complicated and multiple vibrations modes; therefore, damage detection methods based on vibration data in cable-stayed bridges has become a challenging issue. In the present study, finite element model of Bill Emerson, Missouri cable stayed bridge was simulated in order to achieve a precise finite element model to simulate the damage scenarios in bridge and the study of them. General process includes four damage detection indices based on the modal data (mode shapes and natural frequencies) achieved by modelling structure and simulated damages and in each case the results of damage detection were presented by indices. These methods are: Enhanced Coordinate Modal Assurance Criterion (ECOMAC), Mode Shape Curvature (MSC), Modal Flexibility Index (MFI), Damage Index (DI). Some of the methods were applied in damage detection of the pervious structures and bridges. In this paper, correlative study of these methods were performed based on different damage scenarios as well as study of challenges such as different levels of random noise in the input data, incomplete modal data and low damage intensity in detection of damage in cable-stayed bridge and then, performance of the methods were assessed.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 April 2018

Revise Date: 10 July 2018

Accept Date: 17 August 2018

Keywords:

*Structural damage detection
Modal data*

Cable-stayed bridges

Finite element model

Mode Shape Curvature

Modal Flexibility Index

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/jsce.2018.127340.1523

*Corresponding author: Gholamreza Ghodrati Amiri

Email address: ghodrati@iust.ac.ir

۱- مقدمه

پل‌های کابلی^۱ یک ساختار مقرون به صرفه و کارآمد هستند و اکنون در سراسر جهان بیشتر محبوب شده‌اند. با توجه به ویژگی‌های خوب آن‌ها در برابر زلزله، حتی به عنوان اولین انتخاب برای ساخت پل در مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالا تبدیل شده است [۱]. یکی از مسائل مهم که امروزه مهندسی عمران با آن مواجه است، شناسایی آسیب در سازه‌های موجود است. تصمیم‌گیری در مورد استفاده، ترمیم و یا عدم استفاده از یک سازه، در ابتدا مستلزم شناسایی آسیب و محل آن، همچنین تشخیص شدت آسیب می‌باشد. از سوی دیگر، پل‌های کابلی سازه‌های انعطاف پذیر و حساسی هستند و به‌طور معمول برای یک طول عمر طولانی طراحی می‌شوند. بر همین اساس، پایش سلامت پل‌های کابلی، از اهمیت زیادی به لحاظ ایجاد شریان‌های ارتباطی امن، برخوردار است. یکی از راه‌های این ارزیابی، مشاهده تغییرات در مشخصه‌های لرزه‌ای سازه مانند فرکانس‌های طبیعی، مود شکل‌ها و نسبت میرایی است. اساس تئوری این روش‌ها در حقیقت این است که آسیب موجب تغییرات در خصوصیات فیزیکی سازه خواهد شد و این امر باعث ایجاد تغییراتی در مشخصه‌های دینامیکی و لرزه‌ای سازه می‌شود. اگر این تغییرات به درستی شناسایی و طبقه‌بندی شوند، می‌توانند شاخص خوبی برای شناسایی آسیب در سازه باشند [۲،۳].

آزمایش‌های میدانی یک روش نسبتاً خوب برای توصیف خصوصیات مکانیکی و دینامیکی یک سازه نظیر پل کابلی است [۴]. آزمایشات میدانی به طور عمده به ۳ روش برای شناسایی مشخصات سازه انجام می‌گیرد: آزمایش ارتعاش اجباری^۲، آزمایش ارتعاش آزاد^۳، آزمایش ارتعاش محیطی^۴.

در ارتعاش اجباری، پل توسط یک دستگاه لرزاننده^۵ یا وسایل مصنوعی دیگر بارگذاری می‌شود. در این حالت، هم به اطلاعات ورودی و هم به اطلاعات خروجی دسترسی وجود دارد و با استفاده از یک تابع تحریک شناخته شده، از بسیاری از عدم قطعیت‌های مربوط به جمع‌آوری و پردازش داده‌ها اجتناب می‌شود. برای سازه‌های بزرگ مقیاس نظیر پل کابلی ایجاد لرزش‌های قابل توجه نیاز به دستگاه‌های لرزاننده‌ی قوی و سنگین و یا تجهیزات دیگر دارد که اغلب این روش را غیرعملی می‌سازد.

در ارتعاش آزاد نیز که با رهاسازی یک بار یا جرم سنگین آغاز می‌شود، مقداری از لرزش اولیه‌ی ایجاد شده به علت اتلاف انرژی به صورت گرما یا اصطکاک از بین می‌رود و لذا همانند روش‌های ارتعاش اجباری، دشواری‌های مختلفی در اجرای آن‌ها وجود دارد. در این روش با استفاده از سوابق ارتعاش آزاد، خصوصیات پل مورد بررسی مورد شناسایی قرار می‌گیرد. هر دو روش ارتعاش آزاد و اجباری به وسیله‌ی یک عامل مصنوعی ایجاد می‌گردند و در حین تست هم ترفیکی از روی پل نباید عبور کند. این مسائل در بسیاری از موارد برای پل‌ها باعث مزاحمت‌های زیادی می‌شوند و فرآیند تحریک سازه را غیر ممکن می‌سازند. در نتیجه، آزمایش ارتعاش محیطی به روش‌های دیگر آزمایش‌های میدانی ترجیح داده می‌شود. در آزمایش‌های ارتعاش محیطی از منابع لرزه‌ای که در حین کاربری و استفاده از پل موجود است (نظیر باد، زلزله‌های کوچک، حرکت ماشین‌ها و ...) به منظور ارتعاش پل استفاده می‌گردد [۵،۶].

تحقیقات دیگری در این زمینه صورت گرفته است، به طور مثال تست‌های ارتعاش اجباری زیادی بر روی پل I-40 در نیومکزیکو انجام پذیرفت، تا محققین بتوانند فرکانس‌های طبیعی و مود شکل‌های پل را تحت شدت‌های خرابی متفاوت اندازه‌گیری کنند. نتایج نشان دادند که فرکانس طبیعی پل نسبت به خرابی‌ها غیر حساس است و فقط در موارد خرابی‌های شدید می‌تواند شناسایی را انجام دهد [۷].

یک مطالعه بر روی روش‌های مختلف شناسایی آسیب که توسط سالوو^۶ در سال ۱۹۹۷ انجام پذیرفت، نشان داد که حتی تغییرات قابل توجه در فرکانس‌های طبیعی پل (بیش از ۵٪) نشان دهنده‌ی خرابی نیست، چرا که این تغییرات می‌تواند ناشی از شرایط محیطی باشد. شرایط محیطی نظیر تغییرات دما می‌تواند نقصان و نوسان‌های رخ داده در مشخصات مودال سازه را به صورت معکوس تحت الشعاع قرار داده، تغییرات مربوط به آسیب این مشخصات را پنهان کند [۸].

¹ Cable-stayed bridge

² Forced vibration tests

³ Free vibration tests

⁴ Ambient vibration tests

⁵ Shaker

⁶ Salawu

در مقاله‌ی حاضر، از مدل‌سازی اجزای محدود پل کابلی برای شبیه‌سازی آسیب و شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده و همچنین بررسی روش‌های شناسایی آسیب بر پایه‌ی اطلاعات به‌دست آمده از مدل، استفاده شده است. در گذشته محققین دیگری نیز به این موضوع پرداختند، یونگ و همکاران^۷ در سال ۲۰۰۵، یک روش با استفاده از مشخصات لرزه‌ای و الگوی شبکه‌ی عصبی برای تشخیص خرابی در پل‌های کابلی تحت ترافیک در حال حرکت ارائه کردند. آن‌ها یک شاخص تشخیص خرابی موفق و کارآمد به‌دست آوردند. در این مطالعه، خرابی در تیر اصلی و اعضای جانبی مورد توجه قرار گرفت [۹]. گرچه استفاده از مدل شبکه‌ی عصبی می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد، آموزش شبکه‌ی مناسب موضوعی است که باعث پیچیدگی این دسته از روش‌های می‌شود.

ماترازی و ابرتینی^۸ در سال ۲۰۱۱، ارتعاش قائم پل‌های کابلی با آسیب در کابل‌های اصلی را مورد بررسی قرار دادند. یک مطالعه پارامتریک برای بررسی حساسیت فرکانس‌های طبیعی و مود شکل‌ها نسبت به خرابی در کابل‌ها صورت گرفت. از این مطالعه نتیجه گرفته شد که استفاده از تغییرات فرکانس‌ها برای شناسایی آسیب رخ داده در پل‌های کابلی در مقایسه با تغییرات مود شکل‌ها نسبتاً شایسته‌تر است. لازم به ذکر است این بررسی بر روی یک مدل دوبعدی از پل کابلی صورت گرفت [۱۰].

یک مطالعه عددی برای کارایی ۴ روش شناسایی آسیب بر پایه‌ی اطلاعات لرزه‌ای بر روی پل کابلی توسط طالبی نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام شد. روش شناسایی مورد استفاده در این تحقیق شامل روش نرمی، روش سختی، روش بار سطحی یکنواخت و روش انحنای بار سطحی یکنواخت بود. الگوهای آسیب در نظر گرفته شده در آویزها با شدت خرابی ۵۰٪، ۷۵٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪ به درستی توسط هر ۴ روش، حتی در حالت آسیب چندگانه، قابل تشخیص بودند. خرابی ۹۰٪ در کابل اصلی واقع در دهانه‌ی میانی فقط توسط روش انحنای بار سطحی یکنواخت تشخیص داده شد؛ با این حال، هیچ‌یک از روش‌ها قادر به شناسایی آسیب در برج نبودند. آسیب با شدت ۹۰٪ توسط روش‌های نرمی و سختی تشخیص داده شد. همچنین مشاهده شد که کلیه‌ی روش‌ها در تشخیص خرابی در محل عرشه با شدت ۹۰٪ موفق بودند. الگوهای آسیب چندگانه فقط در آویزها در نظر گرفته شدند و همه‌ی آن‌ها در شدت‌های خیلی زیاد تعریف شدند [۱۱].

ویکراماسینگه و همکاران^۹ در سال ۲۰۱۶ به مطالعه‌ی خصوصیات لرزه‌ای و تشخیص خرابی در پل‌های معلق پرداختند، تمرکز این تحقیق بیشتر بر روی خرابی در کابل‌ها و تشخیص خرابی از این طریق بود. در انتها آن‌ها یک شاخص جدید تشخیص خرابی بر پایه‌ی وقوع خرابی در کابل‌ها و با استفاده از شاخص‌های شناسایی آسیب قبلی ارائه دادند [۱].

در این مقاله نیز به بررسی تعدادی از روش‌های شناسایی آسیب بر پایه‌ی اشکال مودی و مشتقات آنها نظیر شاخص همبستگی اطمینان مودال بهبود یافته^{۱۰} [۱۲]، شاخص خرابی^{۱۱} [۱۳]، انحنای مودال^{۱۲} [۱۴]، شاخص انعطاف پذیری مودال^{۱۳} [۱۵] جهت تشخیص آسیب در پل‌های کابلی پرداخته شده است. برای به‌دست آوردن تغییرات مشخصه‌های دینامیکی مودال، از مدل‌سازی اجزای محدود پل کابلی در فضای نرم افزار SAP2000 (براساس روش‌های ارائه شده و تأیید شده برای مدل‌سازی پل کابلی [۱۶، ۱۷]) استفاده شده است. به‌عنوان یک نمونه‌ی مطالعاتی، پل کابلی بیل امرسون مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود پل کابلی

پل یادبود بیل امرسون^{۱۴} به طول ۱۲۰۶ متر، یک پل کابلی مابین منطقه‌ی میسوری^{۱۵} و ایلی‌نویز^{۱۶} است که بر روی رودخانه‌ی می‌سی‌سی‌پی^{۱۷} واقع شده است. این پل در دسامبر ۲۰۰۳ برای حمل و نقل مورد استفاده قرار گرفت. همانطور که در شکل (۱) نشان داده

^۷ Yeung et al.

^۸ Materazzi and Ubertini

^۹ Wickramasinghe et al.

^{۱۰} Enhanced Coordinate Modal Assurance Criterion (ECOMAC)

^{۱۱} Damage Index (DI)

^{۱۲} Mode Shape Curvature (MSC)

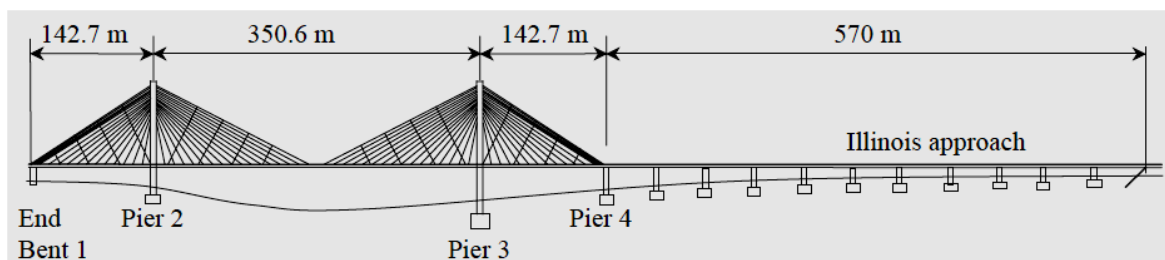
^{۱۳} Modal Flexibility Index (MFI)

^{۱۴} Bill Emerson Memorial Bridge

^{۱۵} Missouri

^{۱۶} Illinois

شده است، این پل دارای ۲ برج، ۱۲۸ کابل نگهدارنده، ۱۲ پایه‌ی اضافه برای دهانه‌ی انتقالی^{۱۸} پل در سمت ایلی نویز است. این پل دارای طول کلی ۱۲۰۶ متر است که شامل یک دهانه‌ی اصلی به طول ۳۵۰/۶ متر، دو دهانه‌ی کناری ۱۴۲/۷ متری و یک دهانه‌ی انتقالی ۵۷۰ متری می‌باشد. عرض نهایی عرشه‌ی پل ۲۹/۳ متر است که دارای دو مسیر رفت و برگشت است و هرکدام از مسیرها دارای ۴ خط عبوری هستند [۱۸].



شکل ۱: نمای شماتیک پل کابلی [۱۸]

در مدل اجزای محدود مورد بررسی، دهانه‌ی انتقالی ایلی نویز مدل‌سازی نشده است، به این علت که تکیه‌گاه در پایه‌ی شماره‌ی ۴ از حرکت طولی و دوران حول محور X (محور طولی پل) جلوگیری نمی‌کند و همچنین طبق مطالعات گذشته، ثابت شده است که این قسمت تاثیر ناچیزی در رفتار دینامیکی قسمت دیگر پل - که توسط کابل‌ها نگه داشته می‌شود - دارد [۱۷].

مدل‌سازی اجزای محدود، یک روش قدرت‌مند برای آنالیز و طراحی سازه‌های بزرگ مقیاس نظیر پل‌های کابلی است. برای مدل‌سازی اجزای محدود پل کابلی از فرض‌های ساده‌کننده‌ی معقولی استفاده شده است که قبلاً آزمایش شده‌اند و نتایج آن‌ها دارای دقت خوبی است. تکنیک‌های مختلفی برای ایجاد یک مدل اجزای محدود دقیق برای یک پل کابلی وجود دارد که توسط کانوک نوکولچای و همکاران^{۱۹} در سال ۱۹۹۲ و آلواراد کاردناس و همکاران^{۲۰} در سال ۲۰۰۷ شرح داده شده‌اند. یک روش متداول و معروف، مدل‌سازی به روش تیر اساسی^{۲۱} می‌باشد. در این روش از المان‌های تیر با مشخصات معادل کل عرشه استفاده می‌شود، که توسط اتصالات صلب^{۲۲} عرضی به محل اتصال کابل‌های نگه‌دارنده می‌رسند. این روش اولین بار توسط ویلسون و گراول^{۲۳} در سال ۱۹۹۱ برای مدل‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی پل کابلی کیونسی بی ویو^{۲۴} ارائه شد [۱۶، ۲۰، ۱۹].

در پل‌های کابلی، به دو علت رفتار غیرخطی وجود دارد: هندسی و مصالح. غیرخطی بودن ناشی از هندسه تحت بارهای بهره برداری یک مشخصه‌ی مهم است. غیر خطی بودن ناشی از هندسه‌ی سازه در پل‌های کابلی مربوط به دلایل ذیل می‌باشد:

- اثر خیز کابل‌های نگه‌دارنده، که به علت زیاد بودن طول آن‌ها به وجود می‌آید.

- اثر تغییر شکل‌های نسبتاً بزرگ کل سازه، به علت انعطاف پذیری آن.

از سوی دیگر، رن و اباتا^{۲۵} در سال ۱۹۹۹ با مطالعه‌ی لرزه‌ای الاستو-پلاستیکی که بر روی پل‌های کابلی انجام دادند، نتیجه گرفتند که غیر خطی بودن هندسی، تاثیر اندکی بر روی رفتار لرزه‌ای پل‌های نمونه می‌گذارد [۲۱]. ویلسون و گراول در سال ۱۹۹۱ نشان دادند که آنالیز

¹⁷ Mississippi

¹⁸ Approach span

¹⁹ Kanok-Nukulchai et al.

²⁰ Alvarado Cardenas et al.

²¹ Single Central Spine

²² Rigid Links

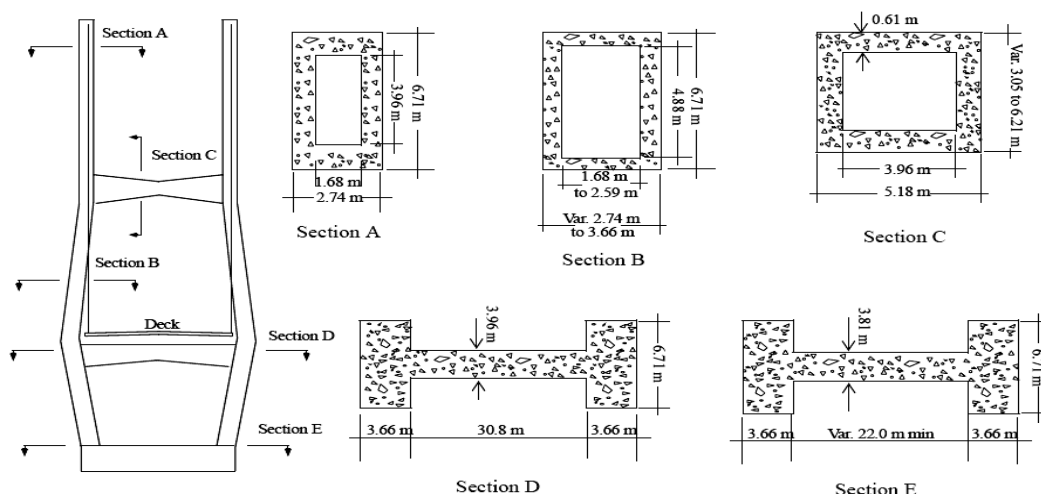
²³ Wilson and Gervelle

²⁴ Quincy Bayview

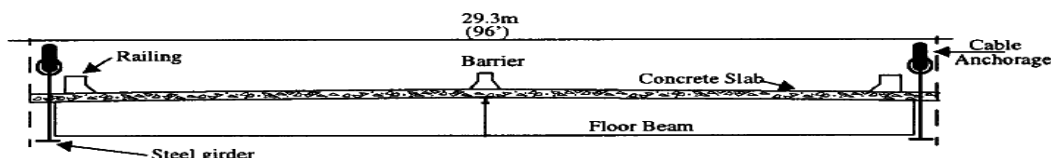
²⁵ Ren and Obata

خطی تنها، دارای دقت کافی برای استخراج فرکانسها و مود شکل‌های معقول پل‌های کابلی می‌باشد [۱۶]. لذا در این مطالعه، برای به‌دست آوردن مشخصات مودال از آنالیز خطی استفاده شده است.

مشخصات هندسی، از نقشه‌های ساخت پل کابلی مورد نظر برداشت و با در نظر داشتن فرضیات ساده‌کننده، مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به مصالح، مقاطع، شرایط مرزی و تکیه‌گاهی مورد استفاده در مدل‌سازی اجزای محدود پل کابلی، با استفاده از گزارش ارائه شده توسط دپارتمان حمل و نقل ایالت میسوری [۱۸]، نقشه‌های ساخت پل [۱۸] و مقالات مربوط به مدل‌سازی این پل [۱۶، ۱۷] استخراج شده است (شکل‌های ۲ و ۳) و با توجه به نکات ذکر شده در تحقیقات قبل و روش‌های ساده شده و تأیید شده بر روی پل‌های کابلی، اقدام به مدل‌سازی پل شده است.

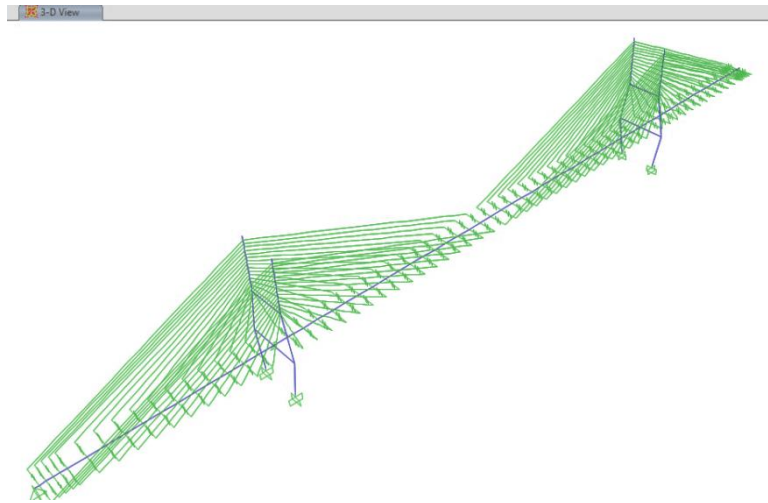


شکل ۲: نمای برج و ابعاد مقاطع ارائه شده در [۱۸]

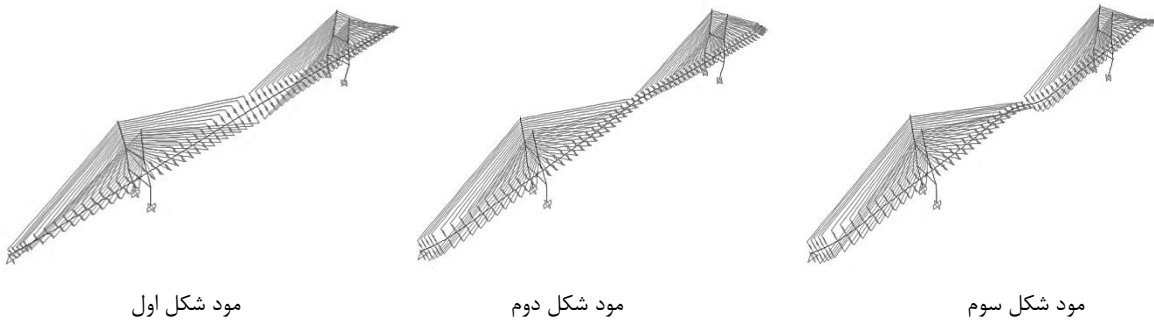


شکل ۳: مقطع عرضی عرشه‌ی پل [۱۸]

پارامترهای مودال پل با استفاده از آنالیز خطی محاسبه شده‌اند. در شکل‌های (۴) و (۵)، به ترتیب نمای سه‌بعدی مدل اجزای محدود پل و شکل مودهای سه مود اول آن، نشان داده شده است. در ادامه، برای اطمینان از صحت مدل‌سازی و نتایج به‌دست آمده، به مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی با مدل‌سازی عددی مطرح شده در این تحقیق، پرداخته می‌شود. در جدول (۱)، مقادیر فرکانس برای ۶ مود اول پل، ارائه و برای صحت سنجی مدل، با مقادیر ارائه شده در تست ارتعاش محیطی و مقالات گذشته [۱۷، ۱۸] مقایسه شده است.



شکل ۴: نمای سه بعدی مدل اجزا محدود پل کابلی



مود شکل اول

مود شکل دوم

مود شکل سوم

شکل ۵: نمایش شکل مودهای به دست آمده از مدل سازی پل کابلی

جدول ۱: مقادیر فرکانس طبیعی و صحت سنجی

شماره‌ی مود	فرکانس طبیعی مدل اجزا محدود	فرکانس طبیعی اندازه گیری شده	اختلاف (%)
۱	۰/۲۷۴۵۲۳	۰/۲۸۹۹	-۵/۳۰۴۳۳
۲	۰/۳۷۹۲۵	۰/۳۶۹۹	۲/۵۲۷۷۳۱
۳	۰/۴۸۶۹۹۸	۰/۴۶۸۳	۳/۹۹۲۷۶۲
۴	۰/۵۳۰۲۳۴	۰/۵۱۵۸	۲/۷۹۸۳۹۱
۵	۰/۵۳۷۷۹۱	۰/۵۸۱۲	-۷/۴۶۸۹۱
۶	۰/۵۸۸۰۶۵	۰/۶۴۹۰	-۹/۳۸۹۰۶

همان طوری که در مقایسه و اندازه گیری درصد اختلاف فرکانسها قابل مشاهده است (جدول (۱))، اختلاف مقادیر کم تر از ۱۰٪ است و می توان چنین نتیجه گرفت که مدل اجزای محدود ارائه شده در این مقاله، از دقت کافی برخوردار است و رفتار واقعی پل کابلی مورد نظر را منعکس می کند.

۳- روش های شناسایی آسیب

۳-۱- روش شاخص همبستگی اطمینان مودال بهبود یافته

این روش توسط هانت^{۲۶} [۱۲] برای بررسی همبستگی میان دو مود شکل ارائه شد. که به صورت زیر تعریف می شود:

$$ECOMAC(j) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N |\varphi_i^*(j) - \varphi_i(j)| \quad (1)$$

که در آن $\varphi_i^*(j)$ و $\varphi_i(j)$ به ترتیب نماینده ی مود شکل سازه ی آسیب دیده و سالم هستند، N تعداد مود شکلها و j شماره ی گره مورد نظر در مدل اجزای محدود است. مقادیر بالای ECOMAC حاکی از آن است که همبستگی خیلی کمی میان جفت مود شکل های کنترل شده، برقرار است و این بیانگر وقوع آسیب در آن محل است. بدیهی است که مقادیر کم نیز نشان دهنده همبستگی بالا میان جفت مود شکلها است و این به معنای سالم بودن محل تحت مطالعه می باشد.

۳-۲- روش انحنای مودال

پاندی و همکاران^{۲۷} [۱۴] یک روش شناسایی آسیب برپایه ی اشکال مودی با تمرکز بر روی انحنای شکل های مودی ارائه کردند. آن ها نشان دادند که تغییرات در انحنای اشکال مودی حساسیت بیش تری نسبت به تغییرات شکل های مودی در ناحیه ی آسیب دیده دارد به همین علت می تواند یک شاخص خوب برای شناسایی آسیب در سازه های تیر شکل باشد.

انحنا در موقعیت x از تیر به صورت رابطه ی (۲) تعریف می شود:

$$v''(x) = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (2)$$

که در آن v'' انحنای تیر، E مدول یانگ، I ممان اینرسی مقطع، M ممان خمشی است. براساس این معادله، هر کاهش (نقصی) در سختی خمشی مقطع که به علت خرابی در تیر به وجود آمده باشد، منجر به افزایش انحنا در تیر می شود. انحنای شکل های مودی با یک رابطه ی تقریبی بر اساس روش تفاضلات مرکزی به صورت رابطه های (۳) و (۴) محاسبه می گردد.

$$\varphi''(j) = \alpha [L(j-1) * \varphi_i(j+1) - \{L(j-1) + L(j+1)\} * \varphi_i(j) + L(j+1) * \varphi_i(j-1)] \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{[(L(j-1) + L(j+1)) * (L^2(j-1) + L^2(j+1))]} \quad (4)$$

²⁶ Hunt

²⁷ Pandey et al.

که در آن φ_i ، i امین مود شکل واقع در ماتریس مودال ($\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$)، $\varphi''(j)$ انحنای مودال، $L(j-1)$ فاصله بین گره j و $j-1$ ، $L(j+1)$ فاصله بین گره j و گره $j+1$ است.

برای حالتی که گره‌ها در فاصله‌ی یکسان از یکدیگر قرار گرفته باشند، رابطه‌ی محاسبه‌ی انحنای مودال به صورت رابطه‌ی ساده شده‌ی زیر قابل بیان است:

$$\psi''(j) = [\psi_i(j+1) - 2\psi_i(j) + \psi_i(j-1)]/L^2 \quad (5)$$

مقدار انحنای اشکال مودی برای هر مود شکل جداگانه محاسبه می‌شود. سپس نرخ تغییرات انحنای مودال به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$Index_i(j) = |\psi_i^{*''}(j) - \psi_i''(j)| / (\sum |\psi_i^{*''}(j) - \psi_i''(j)|) \quad (6)$$

در صورت استفاده از N مود، شاخص خرابی MSC برای گره j ام، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSC(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Index_i(j) \quad (7)$$

۳-۳- روش شاخص انعطاف پذیری مودال

ماتریس انعطاف پذیری (نرمی) عکس ماتریس سختی سازه است. هر ستون از ماتریس انعطاف پذیری نشان دهنده‌ی تغییر مکان به وجود آمده در درجات آزادی مختلف به ازای نیروی واحد وارده به درجه‌ی آزادی مورد نظر است. پانندی و بیسواس^{۲۸} [۱۵]، تغییر در ماتریس نرمی یک سازه به علت خرابی را به عنوان یک شاخص شناسایی آسیب در آن محل معرفی کردند و به بررسی آن پرداختند.

ماتریس نرمی از طریق رابطه‌ی (۸) قابل تخمین است:

$$F = \Phi \Lambda^{-1} \Phi^T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_i^2} \varphi_i \varphi_i^T \quad (8)$$

که در آن Φ ماتریس اشکال مودی ($\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$)، Λ ماتریس قطری مربوط به مربع فرکانس‌های مودال اندازه‌گیری شده و ω فرکانس مودال است. برخلاف سختی، ماتریس نرمی وابستگی کمتری نسبت به تعداد مود شکل‌های اندازه‌گیری شده دارد و می‌تواند با مودهای پایین و کم نیز محاسبه شود و در عین حال دقت مناسبی هم داشته باشد.

به این دلیل که ماتریس نرمی رابطه‌ی عکس با مجذور مقادیر فرکانس دارد (رابطه‌ی (۸))، هر اندازه مقادیر فرکانس افزایش یابد، به همان میزان تاثیر آن در ماتریس نرمی کمتر خواهد بود. بنابراین، یکی از مزایای روش فوق، امکان استفاده از اطلاعات به دست آمده از مودهای پایین است؛ به طوری که علی‌رغم استفاده از تعداد مود کم، کارایی روش حفظ می‌شود.

²⁸ Pandey and Biswas

با استفاده از مفاهیم فوق، ماتریس نرمی برای سازه‌های آسیب‌دیده و سالم محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از این ماتریس‌ها تصویری از تغییرات در ماتریس سختی به صورت زیر قابل تخمین است:

$$\Delta F = F^* - F \quad (9)$$

برای هر درجه‌ی آزادی موردنظر، شاخص MFI به صورت قطر اصلی ماتریس ΔF نرمال شده با ماتریس نرمی سازه سالم قابل محاسبه است.

$$MFI(j) = |\Delta F(j, j)| / F(j, j) \quad (10)$$

۴-۳- روش شاخص خرابی

تغییر در انرژی کرنشی ذخیره‌شده‌ی مودال می‌تواند به عنوان شاخصی برای شناسایی آسیب در سازه‌ها باشد. ایده‌ی اصلی این روش اولین بار توسط ستابز و همکاران^{۲۹} [۱۳] بیان گردید. یک شکل مودی تحت بارگذاری مشخص دارای میزان قابل توجهی انرژی کرنشی می‌باشد. در اثر وقوع آسیب در سازه، میزان این انرژی به علت حساسیت فرکانس طبیعی و شکل‌های مودی به مشخصات دینامیکی سازه و آسیب، تغییر می‌کند. در این روش، سازه در طول به نوارهایی از تیر مشابه با تیرهای اوپلر-برنولی تقسیم می‌شود؛ سپس، سهم انرژی مودال i ام مربوط به نوار تیر z ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta = \frac{\left(\int_a^b [\varphi^{*''}(x)]^2 dx + \int_a^L [\varphi^{*''}(x)]^2 dx \right) * \int_a^L [\varphi(x)']^2 dx}{\left(\int_a^b [\varphi''(x)]^2 dx + \int_a^L [\varphi''(x)]^2 dx \right) * \int_a^L [\varphi^*(x)]^2 dx} \quad (11)$$

که در آن φ'' و $\varphi^{*''}$ به ترتیب انحنای مودال سازه‌های سالم و آسیب‌دیده، L طول سازه، و a و b محدوده‌ی قسمتی از سازه که خرابی بررسی می‌شود، است. روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی انتگرال‌های مطرح‌شده در رابطه‌ی (۱۱) وجود دارد. در این جا، از روش تقریبی دوزنقه استفاده شده است.

وقتی در محاسبات بیش از یک مود استفاده می‌شود، می‌توان از میانگین شاخص β برای هرگره به صورت زیر استفاده نمود:

$$\beta(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_{ij} \quad (12)$$

²⁹ Stubbs et al.

چنانچه $\beta(j) > 1$ باشد، خرابی در موقعیت j رخ داده است. در ادبیات فنی به این روش، «روش شاخص خرابی» می‌گویند.

ستابز و همکاران [۱۳] پیشنهاد دادند که برای تبدیل این شاخص به فضای استاندارد نرمال، با در نظر گرفتن شاخص‌های خرابی به عنوان متغیرهای تصادفی و محاسبه‌ی مقدار میانگین و انحراف معیار آن‌ها، به صورت زیر عمل شود:

$$Z_j = (\beta_j - \bar{\beta}_i) / \sigma_i \quad (۱۳)$$

که در آن $\bar{\beta}_i$ و σ_i میانگین و انحراف معیار شاخص خرابی $\beta(j)$ هستند. اگر $2Z_j >$ باشد نشان دهنده‌ی وقوع خرابی در موقعیت j است.

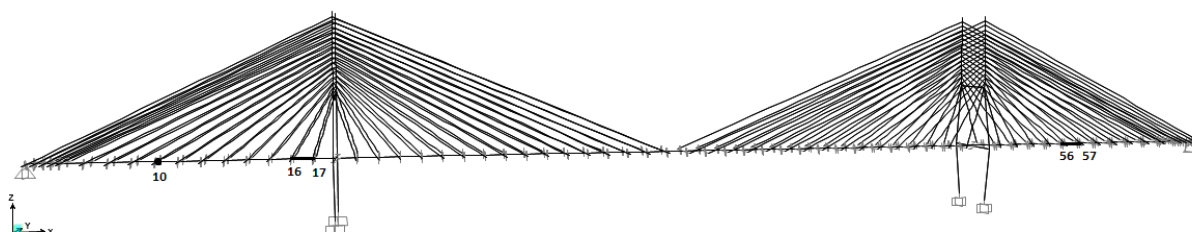
۴- مطالعات عددی

الگوهای آسیب در این مطالعه به صورت الگوهای ارائه شده در جدول (۲) است. شکل (۶)، نمایی از مکان‌هایی که در آن‌ها آسیب در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. هم‌چنین لازم به توضیح است که در این مطالعه، آسی به صورت کاهش سختی در پل یا کابل تعریف شده‌اند. الگوهای D1 تا D3، آسیب در عرشه در نزدیکی برج به ترتیب به با شدت‌های ۹۰، ۵۰، ۲۰ درصد را شبیه‌سازی می‌کنند. این الگوهای آسیب برای ارزیابی شاخص‌های شناسایی آسیب در شدت‌های آسیب مختلف تعریف شده‌اند. الگوهای آسیب D4 و D5 بیان‌گر آسیب در عرشه‌ی پل با ۹۰ درصد کاهش سختی و دو سطح نوفه‌ی ۲٪ و ۵٪ در اطلاعات مودال می‌باشند. این الگوها، برای بررسی میزان حساسیت شاخص‌های مورد استفاده برای شناسایی آسیب در سطوح‌های مختلف نوفه در اطلاعات ثبت‌شده از سازه، تعریف شده‌اند. الگوهای D6 و D7، الگوهای آسیب چندگانه هستند که برای ارزیابی توانایی روش‌های شناسایی آسیب مودال در پل‌های کابلی برای تشخیص رخداد آسیب هم‌زمان در مقاطع پل تعریف شده‌اند. نهایتاً، الگوی D8 برای شبیه‌سازی آسیب در کابل به صورت ۹۰ درصد کاهش سختی محوری کابل تعریف شده است.

برای هر الگوی آسیب از ۴ مود اول عرشه‌ی پل کابلی استفاده شده است. دلیل استفاده از این تعداد مود برای ارزیابی رفتار پل کابلی این است که، درصد مشارکت جرمی ۴ مود اول بسیار بالا است و در کارهای عملی نیز به مدهای بالای سازه دسترسی وجود ندارد. هم‌چنین، درموردی که استفاده از داده‌های تعداد مود بیش‌تر برای شناسایی آسیب توسط شاخص‌های مودال کنترل شد، این‌گونه مشاهده شد که استفاده از تعداد مود بیش‌تر نتیجه‌ی یکسانی خواهد داشت. این موضوع توسط محققین دیگر در گذشته نیز بررسی شده است. به‌عنوان مثال، ونگ و همکاران، یک بررسی مقایسه‌ای که بر روی دو نوع پل کابلی و با استفاده از روش‌های شناسایی آسیب مودال انجام دادند؛ به‌این‌ترتیب که از داده‌های ۳، ۵، ۸، ۱۰ مود اول پل‌ها برای شناسایی آسیب استفاده کردند. نتیجه نشان داد که روش‌ها نتیجه‌ی یکسانی در این حالت‌ها داشتند و این موضوع نشان دهنده‌ی این مساله بود که برای شناسایی آسیب استفاده از ۳ مود اول سازه کفایت [۲۲].

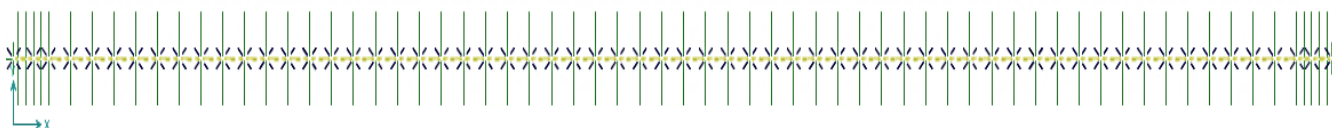
جدول ۲: الگوهای آسیب

الگوهای آسیب	موقعیت	نوع عضو	شدت آسیب (%)	سطح نوفه (%)
D1	گره ۱۶-۱۷	عرشه	۹۰	۰
D2	گره ۱۶-۱۷	عرشه	۵۰	۰
D3	گره ۱۶-۱۷	عرشه	۲۰	۰
D4	گره ۱۶-۱۷	عرشه	۹۰	۲
D5	گره ۱۶-۱۷	عرشه	۹۰	۵
D6	گره ۱۶-۱۷	عرشه	۹۰	۰
	گره ۵۶-۵۷		۹۰	۰
D7	گره ۱۶-۱۷	عرشه	۵۰	۰
	گره ۵۶-۵۷		۹۰	۰
D8	گره ۱۰	کابل	۹۰	۰



شکل ۶: مکان آسیب‌های در نظر گرفته شده در پل کابلی

پل کابلی بیل امرسون در عرشه دارای ۶۷ ناحیه است که شامل دهانه‌ی میانی و دو دهانه‌ی کناری است. بنابراین عرشه‌ی پل توسط ۶۸ گره (مقطع) عرشه به ۶۷ ناحیه تقسیم می‌شود. در این مطالعه مولفه‌های بردار مودال برای ۶۲ مقطع محاسبه شده است، به این دلیل که نواحی ابتدایی دهانه‌های کناری قسمت‌های نسبتاً کوچکی هستند و به هم نزدیک‌اند؛ لذا، مولفه‌های بردار مودال آن‌ها، تفاوت چندانی باهم نمی‌کند، به این ترتیب، مولفه‌های انتخابی برای گره‌های عرشه به فاصله‌ی تقریبی ۱۰/۵ متر استخراج شده‌اند.



شکل ۷: نقاط (گره‌های) در نظر گرفته شده در عرشه‌ی پل برای بردار مودال

گره‌هایی که برای استخراج مولفه‌های بردار مودال انتخاب شده‌اند واقع بر خط مرکزی عرشه‌ی می‌باشند (شکل ۷). با این کار عملاً از اطلاعات مودال ناقص در هر مقطع استفاده شده است، به این ترتیب که تنها مولفه‌های انتقالی تغییر شکل مودال لحاظ شده‌اند و از مولفه‌های دورانی و پیچشی تغییر شکل‌های مودال صرف‌نظر شده است. دلایل انجام این کار را می‌توان این‌طور تشریح کرد:

- استفاده از تعداد سنسور کم تر در موارد عملی (در هر مقطع استفاده از یک سنسور به جای دو سنسور در طرفین عرشه برای محاسبات مربوط به مولفه های دورانی و پیچشی در هر مقطع)
- آسیب در نظر گرفته شده در این تحقیق به صورت کاهش سختی خمشی در المان ها است و به طور ضمنی با مولفه های دورانی و پیچشی مرتبط است و رابطه ی مستقیمی با مولفه های انتقالی مودشکل ها دارد.

یک مساله ی مهم در شناسایی آسیب، میزان حساسیت روش های شناسایی آسیب به حضور نوفه های اتفاقی در عمل کرد آن ها است. در حالت کلی، در برنامه های عملی پایش سلامت سازه ها، داده های ثبت شده توسط حس گر ها به دلیل عوامل مختلفی مانند شرایط جوی، قدیمی بودن تجهیزات به کار برده شده و ... ممکن است با درصدی خطا همراه باشند. در مطالعات عددی، به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی سازه و برداشت اطلاعات سازه، این خطاها را می توان با افزودن نوفه های تصادفی به داده های مربوط به سازه ی آسیب دیده، وارد محاسبات کرد.

در میان روش های شناسایی آسیب، هر کدام حساسیت کمتری نسبت به این خطاها (وجود نوفه های تصادفی در داده ها) داشته باشند، روش مناسبتری برای استفاده در مسائل عملی خواهد بود. در این مقاله، برای مدل سازی نوفه ها از رابطه ی زیر، استفاده شده است:

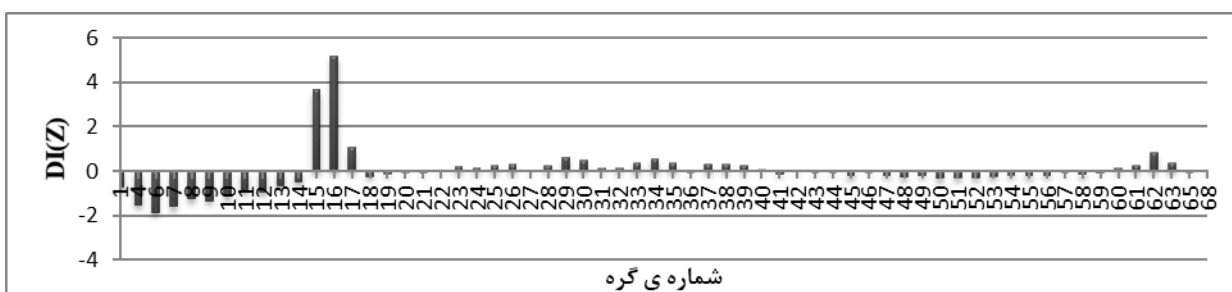
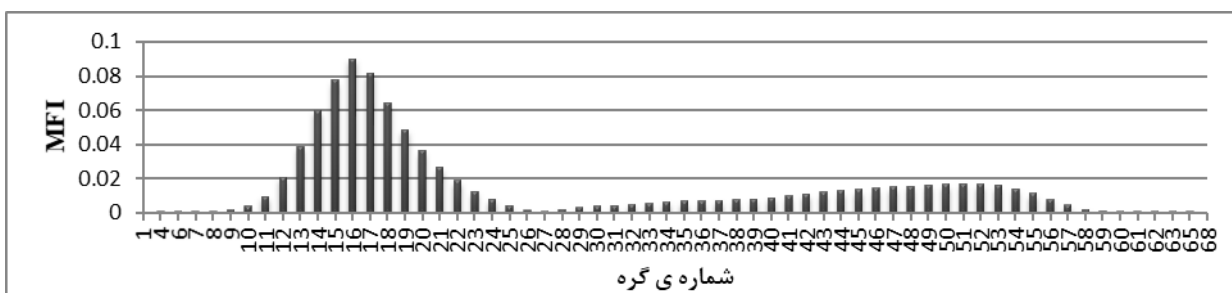
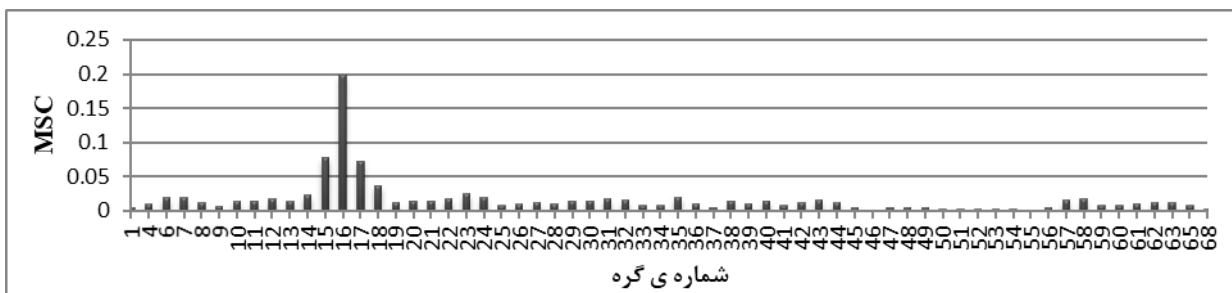
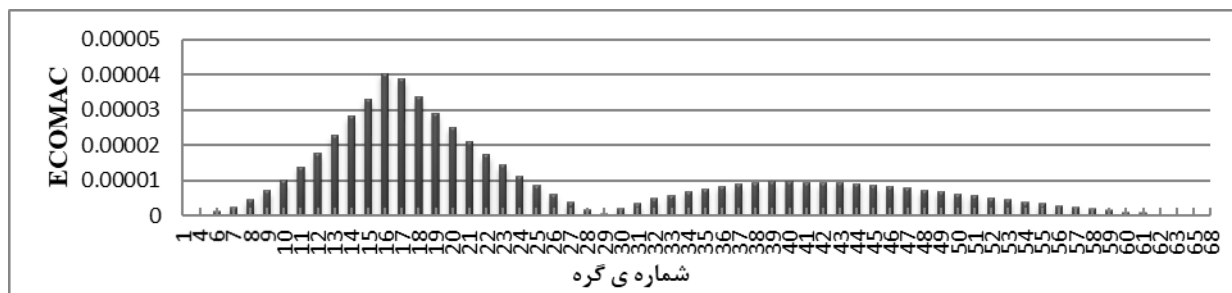
$$P_i = P_i^a \times (1 + \varepsilon R) \quad (14)$$

که در آن P_i^a فرکانس طبیعی یا بردار مودال مربوط به مود i -ام سازه ی آسیب دیده، به دست آمده از مدل آنالیزی (بدون نوفه)، P_i ، فرکانس طبیعی یا بردار مودال مربوط به مود i -ام سازه ی آسیب دیده در حضور نوفه، ε ، سطح نوفه ی در نظر گرفته شده، و R یک عدد تصادفی بین ۱ و -۱ است [۲۳].

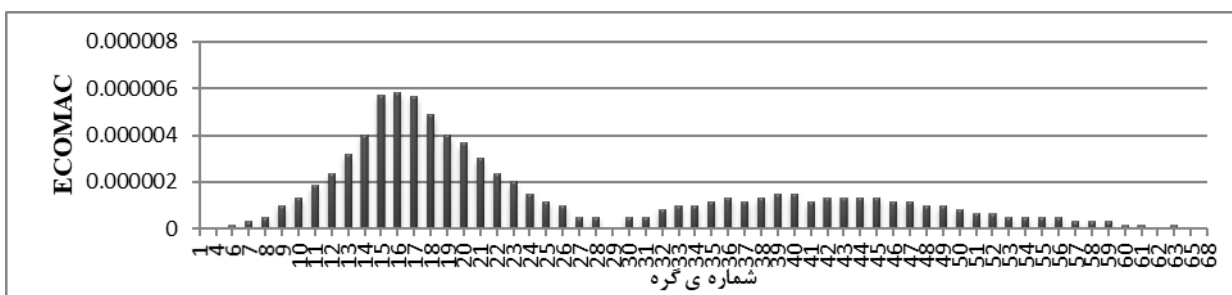
۵- نتایج مطالعات عددی

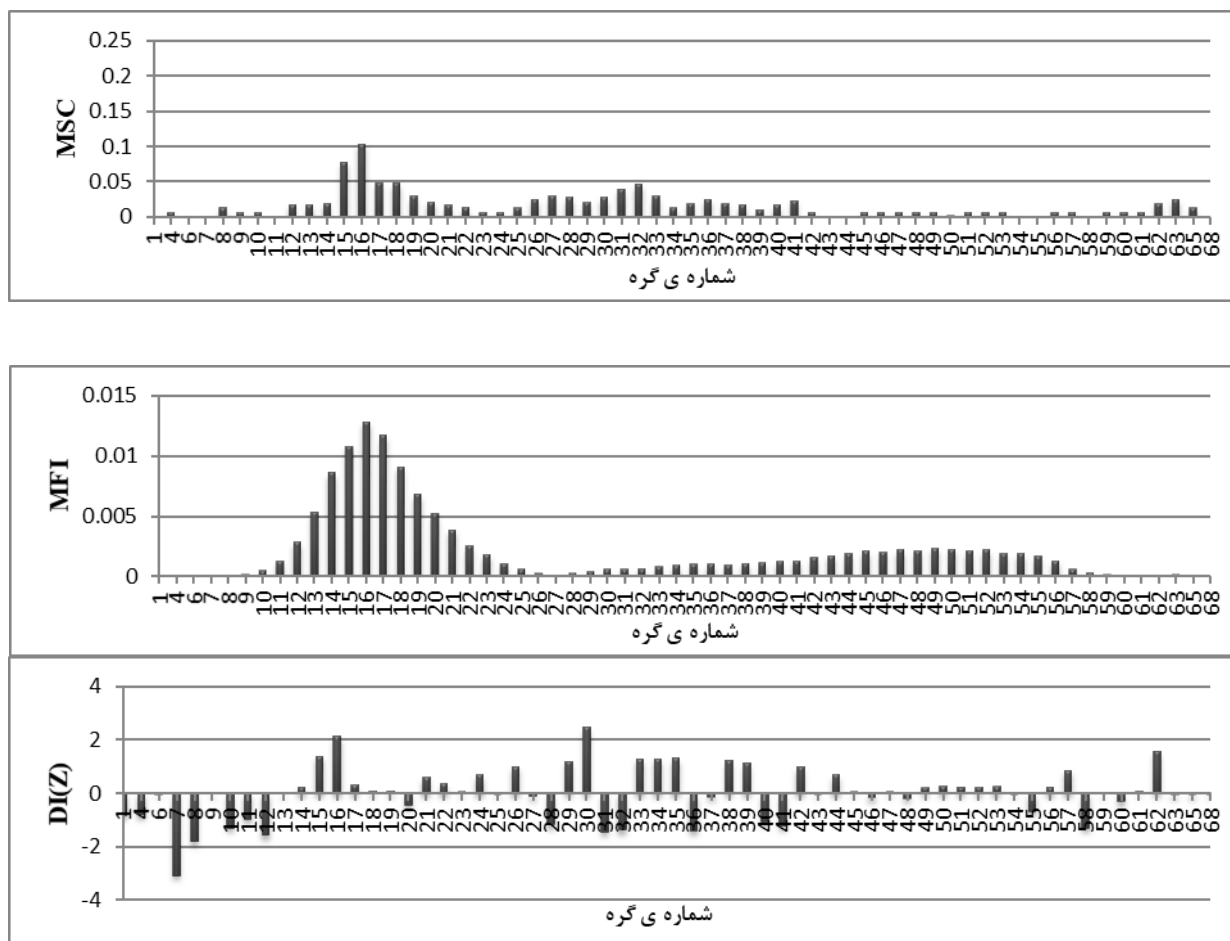
۵-۱- اثرات شدت خرابی

همان طوری که قبلا اشاره شد، الگوهای آسیبی D1، D2 و D3، به ارزیابی توانایی روش های شناسایی آسیب در تشخیص سناریوهایی با شدت های آسیب مختلف در عرشه واقع در نزدیکی برج تعریف شده اند. نتایج مربوط به شناسایی آسیب تحت این الگوها، در شکل های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است.

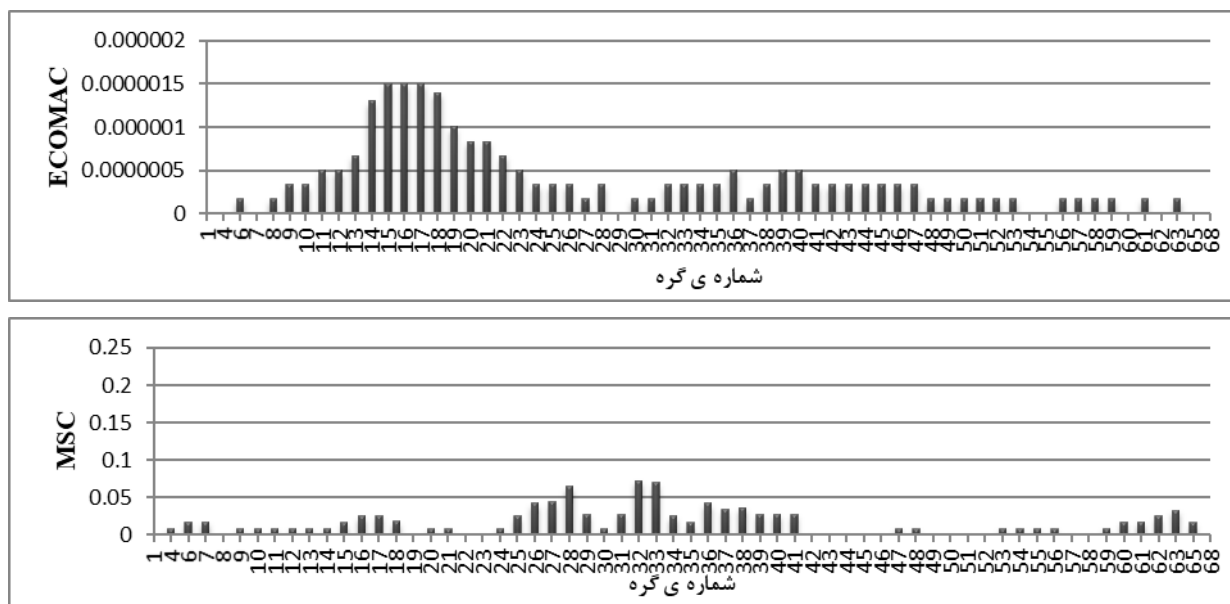


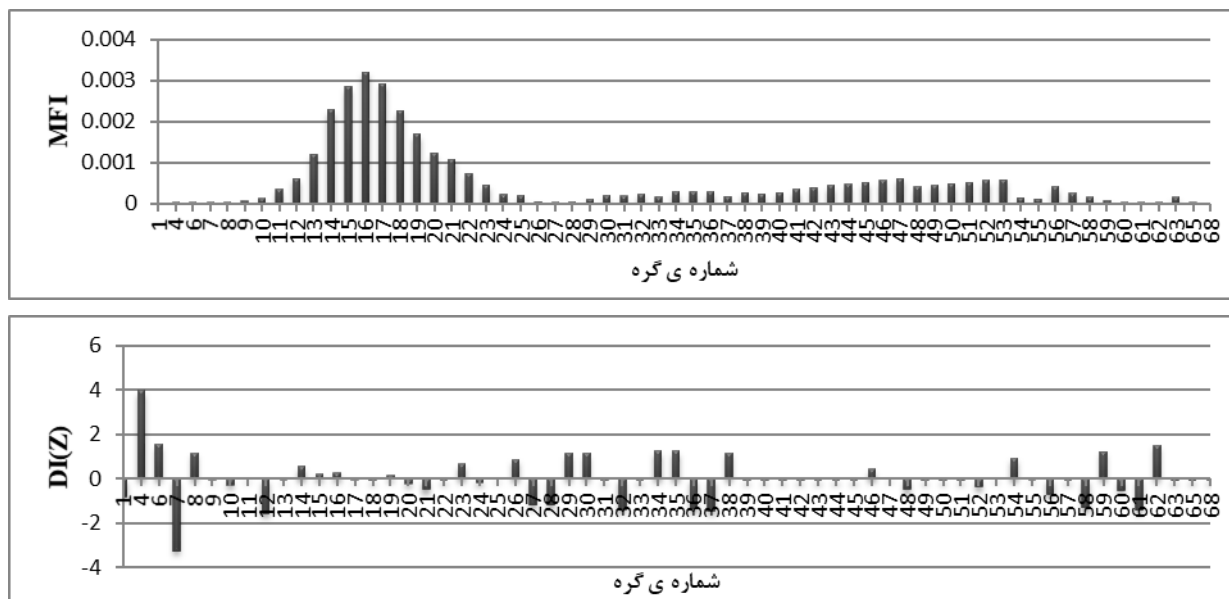
شکل ۸ : نتایج مربوط به روش های شناسایی آسیب برای الگوی D1





شکل ۹: نتایج مربوط به روش های شناسایی آسیب برای الگوی D2





شکل ۱۰: نتایج مربوط به روش‌های شناسایی آسیب برای الگوی D3

جدول ۳: نتایج مربوط به روش‌های شناسایی آسیب در شدت‌های مختلف

نتایج شناسایی آسیب برای الگوهای مختلف			روش‌های شناسایی آسیب
D3	D2	D1	
×	--	√	ECOMAC
×	√	√	MSC
√	√	√	MFI
×	--	√	DI

‘√’ : آسیب به درستی تشخیص داده شده است.

‘×’ : آسیب تشخیص داده نشده است.

‘-’ : آسیب به درستی تشخیص داده نشده است. (در نقاط بیشتر از انتظار تشخیص داده شده است).

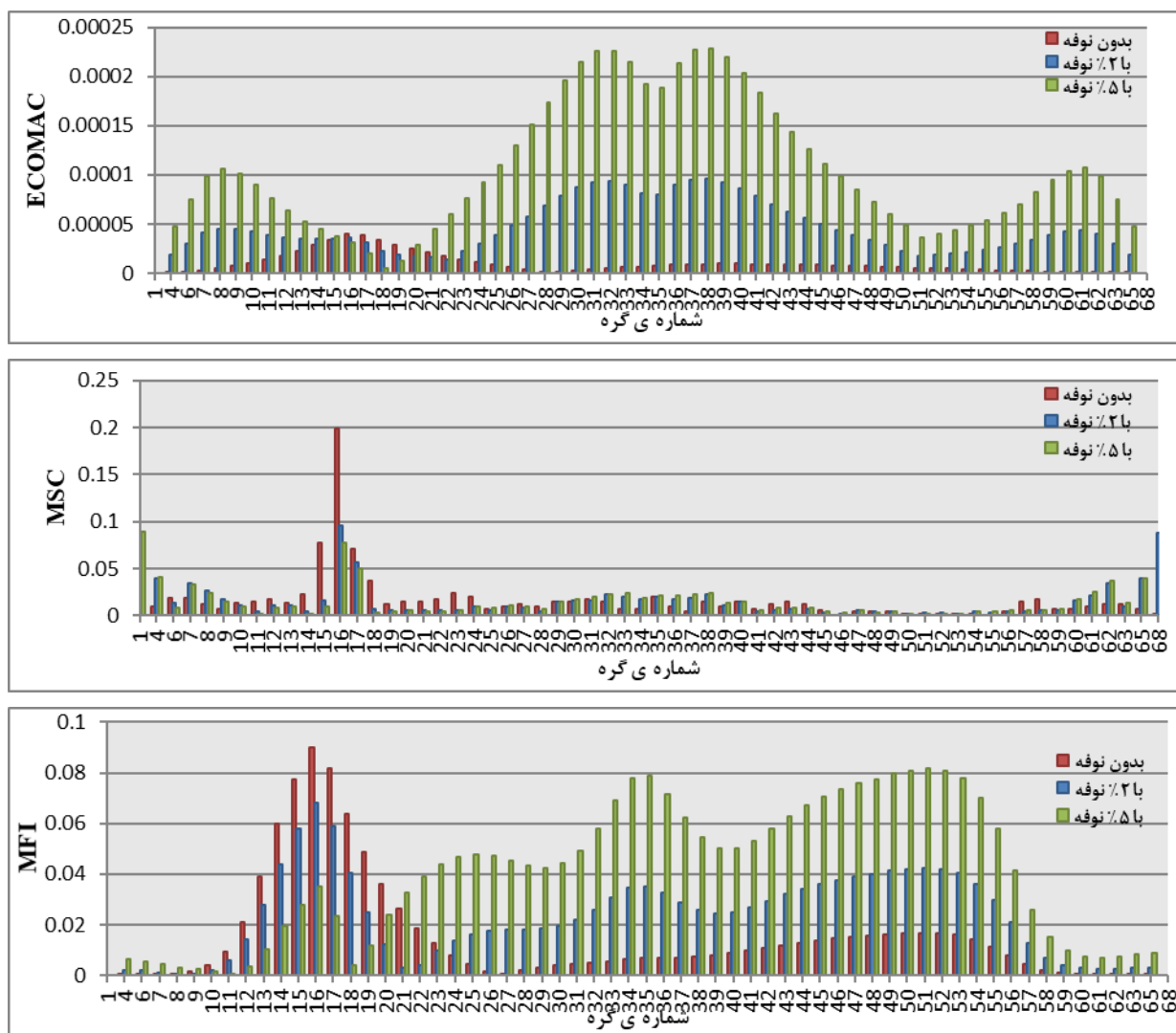
همان‌طوری که در نتایج روش‌ها مشهود است و در جدول (۳) نیز آمده است، تنها شاخصی که قادر به شناسایی آسیب در همه‌ی الگوها با شدت‌های مختلف (۲۰، ۵۰، ۹۰ درصد) بوده است، روش MFI است و این از نقاط قوت این روش است. نظر به این که اکثر روش‌های شناسایی آسیب حساسیت زیادی به آسیب‌های شدید دارند، لذا در اکثر تحقیقات گذشته در زمینه‌ی شناسایی آسیب در پل کابلی، به خرابی‌ها با شدت زیاد پرداخته شده است؛ حال آن‌که، مسأله‌ی شناسایی آسیب با شدت‌های کم از اهمیت زیادتری برخوردار است، چراکه هدف اصلی پایش سلامت سازه‌ها، تشخیص آسیب متوسط و حتی ضعیف (آسیب‌هایی که مشخصه‌ی ظاهری خاصی ندارند) می‌باشد.

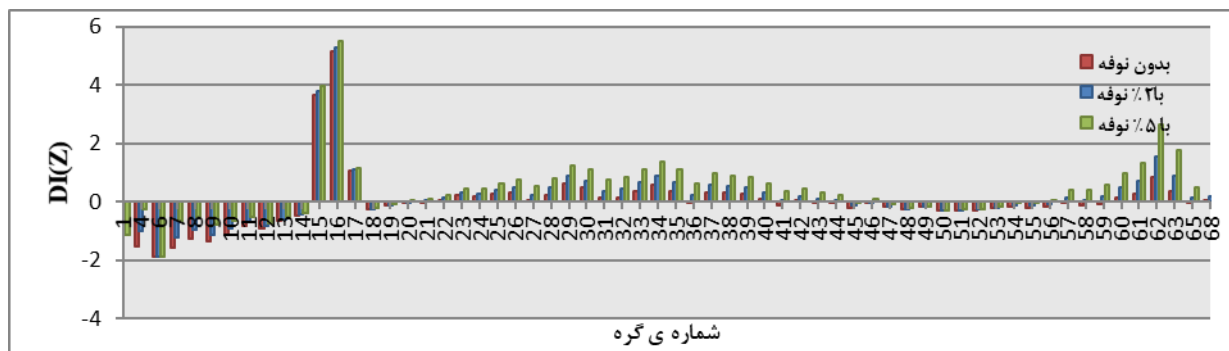
روش ECOMAC تنها آسیب با شدت زیاد (۹۰ درصد-الگوی آسیب D1) را توانست نسبتاً درست تشخیص دهد. در مورد الگوی آسیب D2، اگرچه مقدار شاخص در گره‌ی ۱۶ با تفاوت بسیار اندکی از مقادیر در گره‌های دیگر بیشتر است، اما در حالت تست عملی که موقعیت خرابی از قبل شناخته شده نیست، نمی‌تواند کارآمد باشد و این امکان وجود دارد که خرابی در نقطه‌ی دیگری به غیر از مقطع

۱۶-۱۷ رخ داده باشد. در مورد روش DI نیز همان طوری که در شکل (۹) نشان داده شده است، علاوه بر نقطه‌ی مورد نظر، خرابی در ۲ موقعیت دیگر نیز تخمین شده است.

۵-۲- اثرات وجود نوفه (نویز)

به منظور مدل سازی شرایط واقعی و عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های ثبت شده توسط حس گرها، پارامترهای موдал مربوط به سازه‌ی آسیب دیده با نوفه‌های تصادفی به شدت ۲٪ و ۵٪ آغشته شده و کارایی روش‌های ارائه شده بررسی گردیده است. دو الگوی آسیب D4 و D5 برای بررسی اثر وجود نوفه در شناسایی آسیب توسط روش‌های ارائه شده تعریف شده‌اند، که به ترتیب سطح نوفه ۲٪ و ۵٪ همراه با شدت خرابی ۹۰٪ در عرشه واقع در نزدیکی برج را در نظر می‌گیرند. نتایج به دست آمده از این مطالعات، در شکل (۱۱) و جدول (۴) مطرح شده است.





شکل ۱۱: نتایج مربوط به روش‌های شناسایی آسیب برای الگوی D5 و D4

جدول ۴: نتایج مربوط به روش‌های شناسایی آسیب در حالت وجود نوبه تصادفی

نتایج شناسایی آسیب برای الگوهای مختلف		روش‌های شناسایی آسیب
D5	D4	
×	×	ECOMAC
√	√	MSC
×	√	MFI
√	√	DI

‘√’ : آسیب به درستی تشخیص داده شده است.

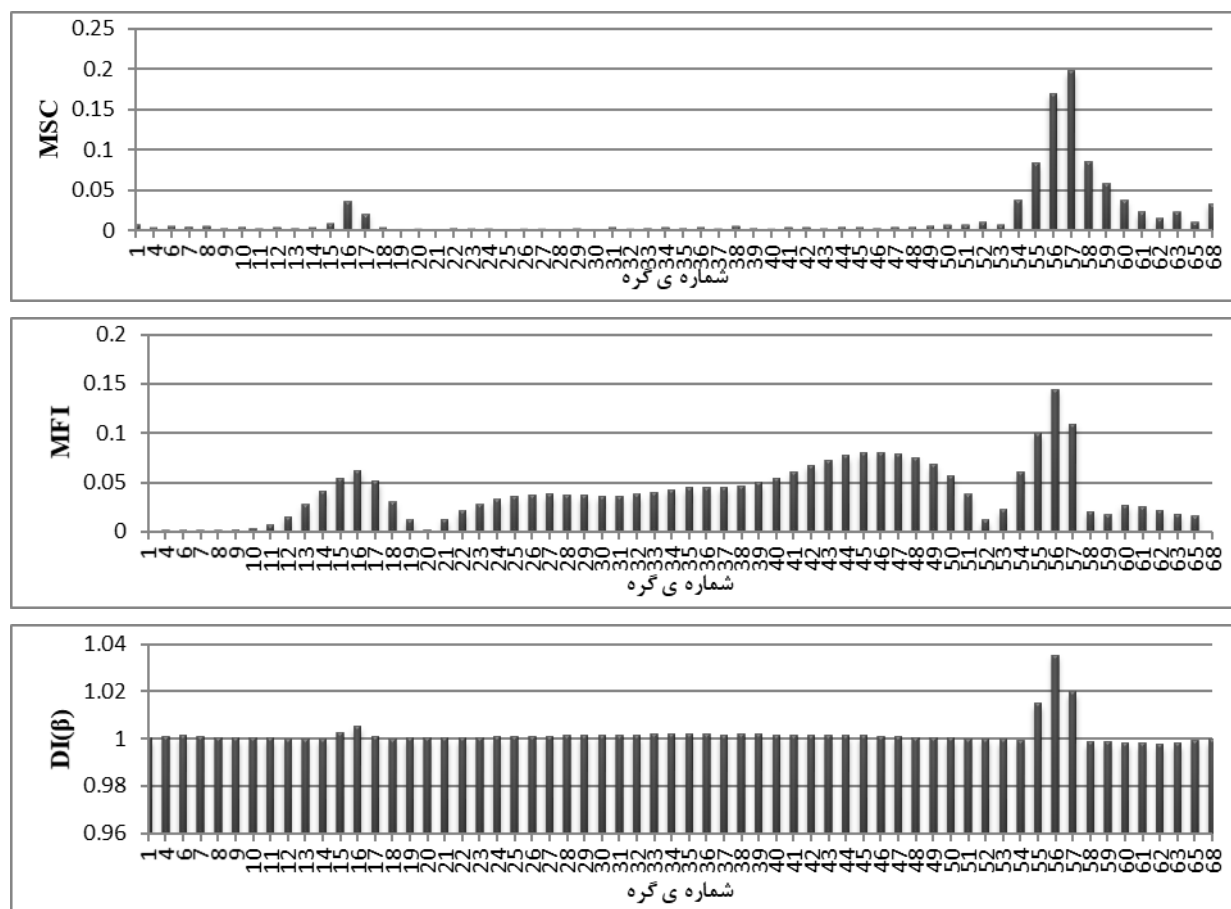
‘×’ : آسیب تشخیص داده نشده است.

‘-’ : آسیب به درستی تشخیص داده نشده است. (در نقاط بیشتر از انتظار تشخیص داده شده است).

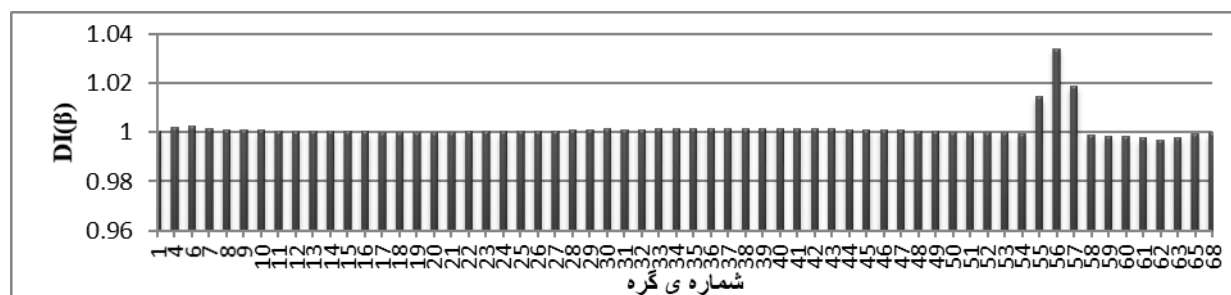
همان طوری که ملاحظه می‌شود، ECOMAC حساسیت زیادی نسبت به وجود نوبه‌های تصادفی در اطلاعات ورودی دارد و حتی در شدت خرابی ۹۰٪ هم قادر به شناسایی آسیب نیست. علت اصلی این مساله آن است که این شاخص یک ترکیب خطی از مودشکل‌ها است و لذا این شاخص حساسیت بالایی نسبت به وجود خطاها در داده‌های ورودی دارد. تنها دو روش MSC و DI قادر به شناسایی آسیب در هر دو سطح نوبه‌ی تصادفی بودند. گفتنی است که در این بین، روش MSC حساسیت بیش‌تری نسبت به وجود نوبه‌های تصادفی داشت و نتایج شاخص در بعضی نقاط در حال نزدیک شدن به هم بودند، اما روش DI به درستی هر دو الگوی آسیبی را تشخیص داده است و کارایی خوبی دارد. شاخص MFI نیز تنها در حالت سطح نوبه‌ی کم توانایی شناسایی آسیب را داشته است.

۵-۳- الگوهای آسیب D6 و D7:

این دو الگو برای بررسی روش‌های شناسایی آسیب در حالت رخداد آسیب هم‌زمان در دو مقطع مختلف از عرشه تعریف شده‌اند. الگوی D6 به صورت شدت آسیب یکسان (۹۰٪ کاهش سختی در هر دو مقطع) و الگوی D7 به صورت شدت آسیب متفاوت در نقاط (۹۰٪ کاهش سختی در مقطع ۵۷-۵۶، ۵۰٪ کاهش سختی در مقطع ۱۷-۱۶) در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۲: نتایج مربوط به روش‌های شناسایی آسیب برای الگوی D6



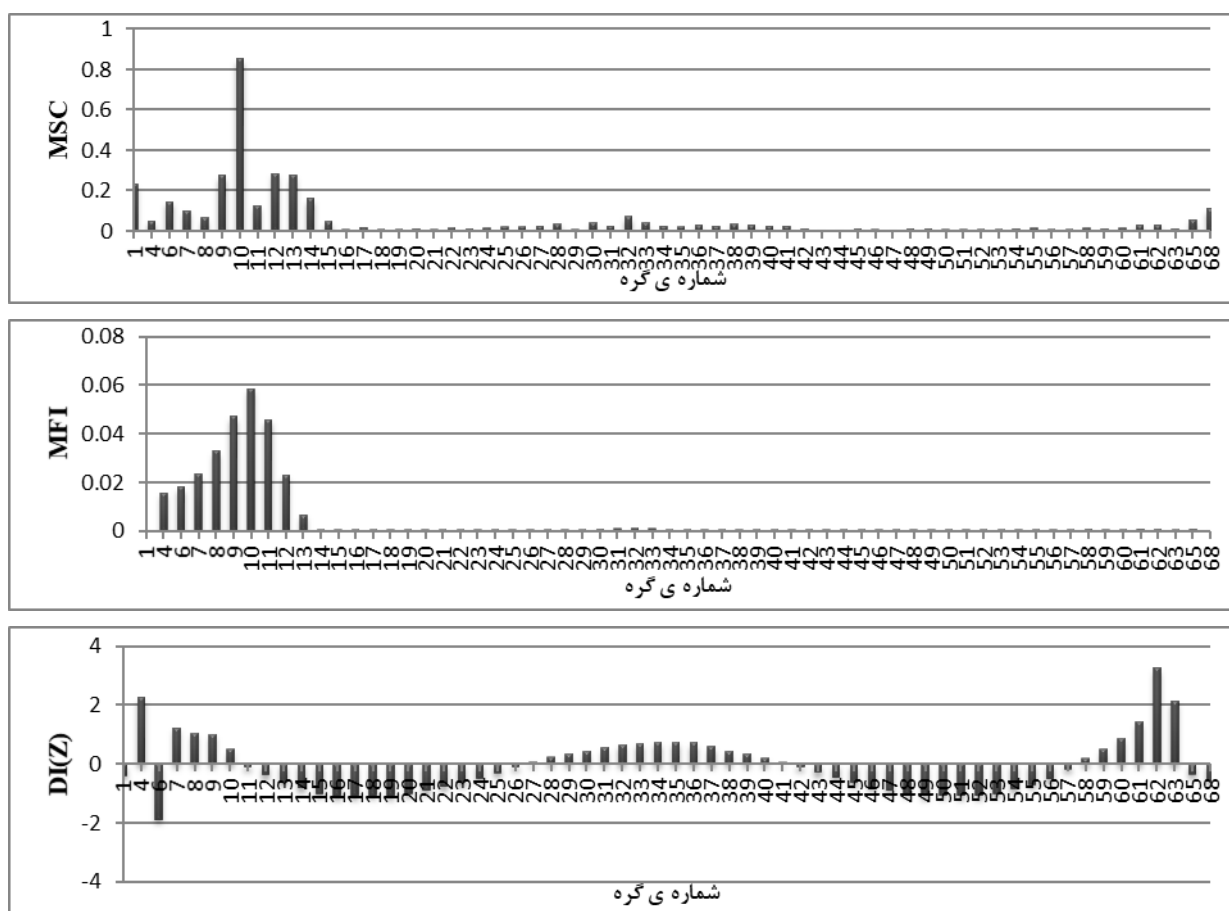
شکل ۱۳: نتایج مربوط به روش‌های شناسایی آسیب برای الگوی D7

از بررسی نتایج مربوط به روش‌های شناسایی آسیب برای این دو الگو، ملاحظه می‌شود که تنها شاخص DI تا حدودی قادر به تشخیص خرابی در الگوی آسیب چندگانه با شدت خرابی یکسان (D6) در هر دو محل بود، هیچ یک از روش‌های دیگر نتوانستند در این زمینه کارآمد باشند. نکته‌ی قابل توجه در این مطالعه این بود که مقطع ۵۷-۵۶، به‌خاطر قرارگیری در وسط دهانه پل، سختی کم‌تر و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به مقطع ۱۷-۱۶ (که در نزدیک برج واقع است)، دارد. این موضوع باعث می‌شود که در صورت وقوع آسیب در این مکان، تغییرات واضح‌تر و به‌مراتب بزرگ‌تری نسبت به موقعیت نزدیک برج در داده‌های مودال به‌دست‌آمده از سازه‌ی آسیب‌دیده مشاهده گردد و در نتیجه شاخص‌های شناسایی آسیب کارایی بهتری در تشخیص دادن محل آسیب داشته باشند. این موضوع در نتایج به‌دست آمده از مطالعات این بخش این‌گونه دیده شد که در حالت آسیب هم‌زمان در این مقاطع، روش‌های شناسایی آسیب غالباً مقادیر

بزرگتری در مقطع ۵۶-۵۷ و اطراف آن نسبت به مقادیر در مقطع ۱۶-۱۷ ارائه دادند و این باعث می‌شود در مسائل عملی که محل‌های آسیب از قبل شناخته شده نیستند، آسیب‌ها به درستی تشخیص داده نشوند و به اصطلاح پنهان باقی بمانند.

۴-۵- آسیب در کابل (الگوی D8)

برای بررسی روش‌ها در تشخیص آسیب در کابل‌ها، الگوی آسیب D8 تعریف شده است، این آسیب به صورت کاهش در سختی محوری عضو به شدت ۹۰٪ در نظر گرفته شده است. نقطه‌ی انتهایی کابل، متصل به عرشه (گره‌ی ۱۰) با تغییراتی که در پارامترهای مودال سازه‌ی آسیب‌دیده به علت کاهش سختی کابل مورد نظر وارد می‌کند، می‌تواند نشان‌دهنده‌ی آسیب در شاخص‌های مورد بررسی باشد. نتایج این مطالعه در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نتایج مربوط به روش‌های شناسایی آسیب برای الگوی D8

همان‌طوری که در نتایج شاخص‌ها مشخص است، آسیب در کابل، تنها توسط شاخص‌های MSC و MFI قابل شناسایی شده است، شاخص‌های DI و ECOMAC نتوانستند آسیب را تشخیص دهند و شاخص ECOMAC هم که یک ترکیب خطی از مودشکل‌ها است و در موارد قبل هم ذکر گردید، در اکثر مواقع قادر به ارائه‌ی پاسخ خوبی نبوده است. به همین دلیل، نتایج آن در موارد ذکر شده و هم‌چنین در این الگو ارائه نشده است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مطالعه‌ی عددی با استفاده از ۴ روش شناسایی آسیب بر پایه‌ی اطلاعات مودال بر روی پل کابلی بیل امرسون انجام شد. این بررسی با در نظر گرفتن ۸ الگوی آسیب در حالت‌ها و چالش‌های مختلف و مهمی نظیر وجود نوفه‌های تصادفی در داده‌های ورودی، اطلاعات مودال ناقص و آسیب با شدت کم در عرشه و کابل، صورت پذیرفت. نتایج به‌دست آمده به شرح زیر مطرح می‌گردد:

۱- روش ECOMAC، شاخصی است که یک ترکیب خطی از مود شکل‌ها را به‌منظور تشخیص آسیب در سازه استفاده می‌کند و دارای تابع ساده‌ای است. لذا همان‌طوری که در نتایج قابل مشاهده است، از بین الگوهای آسیب مطرح شده، تنها در حالت آسیب با شدت زیاد (۹۰٪) در حالت بدون حضور نوفه‌های تصادفی، توانست تا حدودی محل آسیب را تشخیص دهد و عملاً قادر به شناسایی آسیب در سازه‌های بزرگ مقیاس نظیر پل کابلی نمی‌باشد.

۲- روش MSC، از مشتقات شکل مود یا به‌عبارتی از انحنای شکل مود برای شناسایی آسیب استفاده می‌کند و به‌این‌طریق توانسته شاخص حساس‌تر و مناسب‌تری نسبت به تشخیص آسیب در سازه‌ها ارائه کند. در نتایج نیز این موضوع قابل مشاهده است، که در ادامه به تشریح آن پردمی‌شود: روش انحنای مودال در بین روش‌ها حساسیت کمی نسبت به وجود نوفه‌های تصادفی در داده‌های ورودی داشت و توانست در شناسایی آسیب در حضور هر دو سطح نوفه‌ی مطالعه شده پایداری خوبی ارائه کند. در رابطه با این شاخص، نقاط ضعفی هم دیده شده است، به‌طور مثال، این شاخص در حالت آسیب با شدت خیلی کم (۲۰٪) نتوانست شناسایی را انجام دهد. همین‌طور در حالت آسیب چندگانه نیز، قادر به شناسایی آسیب نبود که البته در این مورد، شاخص‌های دیگر فقط در یک مورد توانستند آسیب‌ها را تشخیص دهد.

۳- در رابطه با روش MFI، با توجه به ساختار این شاخص و استفاده از مود شکل‌ها به‌همراه فرکانس‌های طبیعی، انتظار بر این است که حساسیت مناسبی نسبت به رخداد آسیب گزارش شود و این موضوع در نتایج به‌خوبی نشان داده شده است به این‌صورت که، این روش توانست آسیب را در همه‌ی شدت‌ها (از ۹۰٪ تا ۲۰٪) به‌درستی تشخیص دهد. در رابطه با حضور نوفه‌های تصادفی نیز، در حالت نوفه‌ی زیاد نتوانست آسیب را تشخیص دهد و لذا MFI در این رابطه دچار ضعف می‌باشد.

۴- روش DI با استفاده از مفهوم انرژی کرنشی مودال و ارائه‌ی تابعی براساس مود شکل‌ها توسعه یافته است. این روش در ابتدا، اساساً برای سازه‌های تیر شکل معرفی شده است ولی به مرور در سازه‌های دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته و نقاط قوت و ضعفی را از خود نشان داده است. در این‌جا نیز در شناسایی آسیب با شدت‌های کم‌تر (نظیر ۵۰٪ و ۲۰٪) موفق نبوده است، اما در حالت آسیب با شدت زیاد (مثل ۹۰٪) و هم‌چنین حضور نوفه‌های تصادفی در داده‌های ورودی توانست آسیب را شناسایی کند.

۵- از نتیجه‌ی اخیر و نیز نتایج شاخص‌های قبل می‌توان این‌گونه برداشت کرد که، پایداری در حالت وجود نوفه‌های تصادفی در داده‌های ورودی به تابع مورد استفاده در شاخص و نیز به عملیاتی که بر روی اطلاعات مودال (مود شکل‌ها، فرکانس‌های طبیعی) انجام می‌پذیرد وابسته است؛ اما، حساسیت روش نسبت به شدت‌های آسیب مختلف به مفهومی که روش بر پایه‌ی آن شکل گرفته و هم‌چنین عمل کرد سازه‌ای که روش براساس آن توسعه یافته است، مربوط می‌شود.

۶- از بین تمامی روش‌ها، تنها روشی که در حالت آسیب چندگانه قادر به شناسایی آسیب‌ها بود، روش DI می‌باشد که البته سناریوی مطالعه شده، به‌صورت آسیب چندگانه با شدت زیاد (۹۰٪) و یکسان بود.

۷- در مورد شناسایی آسیب در کابل با استفاده از کنترل نقطه اتصال کابل به عرشه نیز، تنها روش‌های MFI و MSC قادر به شناسایی آسیب بودند.

۷-مراجع

[1] W. Wickramasinghe et al. (2016). "Vibration characteristics and damage detection in a suspension bridge." *Journal of Sound and Vibration*, 375, 254-274.

- [2] S.W. Roebing, C.R. Farrar, M.B. Prime and D.W. Shevitz. (1996). "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics" a literature review. Research report LA-13070-MS, ESA-EA, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA.
- [3] W. Ren, X. Peng and Y. Lin. (2005). "Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge." *Engineering Structures*, 27, 535-548.
- [4] J. Hu, I.E. Harik, S.W. Smith, J.G. Campbell and R.C. Graves. (2006). "Baseline modeling of the Owensboro cable-stayed bridge over the Ohio River." Research Report KTC-06-04/FRT116-020-1F, College of Engineering, University of Kentucky.
- [5] J.C. Wilson and T. Liu. (1991). "Ambient vibration measurements on a cable-stayed bridge." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, 723-47.
- [6] J.H.G. Macdonald and E.D. Wendy. (2005). "Variation of modal parameters of a cable-stayed bridge identified from ambient vibration measurements and FE modeling." *Engineering Structures*, 27, 1916-1930.
- [7] Ch. Farrar, W.E. Baker, T.M. Bell, K.M. Cone, T.W. Darling and T.A. Duffey. (1994). "Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande." Los Alamos National Laboratory Report LA-12767-MS.
- [8] O.S. Salawu. (1997). "Detection of structural damage through changes in frequency: a review." *Engineering Structures*, 19(9), 718-23.
- [9] W.T. Yeung and J.W. Smith. (2005). "Damage detection in bridges using neural networks for pattern recognition of vibration signatures." *Engineering Structures*, 27(5), 685-698.
- [10] A. Materazzi and U. Filippo. (2011). "Eigenproperties of suspension bridges with damage." *Journal of sound and vibration*, 330.26, 6420-6434.
- [11] I. Talebinejad et al. (2014). "Implementation of damage detection algorithms for the Alfred Zampa memorial suspension bridge." *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security*. Vol. 9063, P. 906312. International Society for Optics and Photonics.
- [12] D.L. Hunt. (1992). "Application of an enhanced coordinate modal assurance criterion." *10th International modal analysis conference*. Vol. 1.
- [13] N. Stubbs, K. Jeong-Tae and C.R. Farrar. (1994). "Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm." Texas A&M University Report Prepared for New Mexico State University.
- [14] A.K. Pandey, M. Biswas and M.M. Samman. (1991). "Damage detection from changes in curvature mode shapes." *Journal of sound and vibration*, 145.2, 321-332.
- [15] A.K. Pandey and M. Biswas. (1994). "Damage detection in structures using changes in flexibility." *Journal of sound and vibration*, 169(1), 3-17.
- [16] J.C. Wilson and G. Wayne. (1991). "Modelling of a cable-stayed bridge for dynamic analysis." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 20.8, 707-721.
- [17] S.J. Dyke et al. (2003). "Phase I benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges." *Journal of Structural Engineering*, 129.7, 857-872.
- [18] G. Chen et al. (2007). "Assessment of the Bill Emerson memorial cable-stayed bridge based on seismic instrumentation data." No. UTC-R164. Missouri University of Science and Technology. Center for Infrastructure Engineering Studies.
- [19] Kanok-Nukulchai et al. (1992). "Mathematical modelling of cable-stayed bridges." *Structural Engineering International*, 2.2, 108-113.
- [20] R.A. Cárdenas et al. (2007). "Cable 3D nonlinear model and damping systems on stayed bridges." *Signal Processing and Control for Smart Structures*. Vol. 6523. International Society for Optics and Photonics.
- [21] W.X. Ren, M. Obata. (1999). "Elastic-plastic seismic behavior of long span cable-stayed bridges." *Journal of Bridge Engineering*, 4(3), 194-203.
- [22] B.S. Wang et al. (2000). "Comparative study of damage indices in application to a long-span suspension bridge." *Proceeding of International Conference on Advances in Structural Dynamic, Hongkong Polytechnic University*, 1058-1092.
- [23] G. Ghodrati Amiri, A. Zare Hosseinzadeh, and S.A. Seyed Razzaghi. (2015). "Generalized flexibility-based model updating approach via democratic particle swarm optimization algorithm for structural damage prognosis." *Iran University of Science & Technology*, 5.4, 445-464.