مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲-۳۲، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۱۱-۲۱

Original Article

توسعه‌ی روش‌های ضریب انحناء آسیب (CDF)، تغییر در نرمی (CFM) و تغییر در انحناء نرمی (CFCM) برای تشخیص آسیب در وسط دهانه‌ی عرشه‌ی پل‌ها

سید علی طبائی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
فرهاد دانشجو* (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

روش ضریب انحناء آسیب (CDF)[1]، که بر پایه‌ی تغییر در انحناء شکل مودی است، و روش‌های تغییر در نرمی (CFM)[2] و تغییر در انحناء نرمی (CFCM)[3]، که بر پایه‌ی تغییر در ماتریس نرمی سازه هستند، در شناسایی مقطع طولی آسیب‌دیده در وسط دهانه‌ی عرشه‌ی پل‌ها قادر به تشخیص مقطع طولی آسیب‌دیده نیستند و در برخی موارد، مقطع عرضی آسیب‌دیده را نیز به‌درستی تشخیص نمی‌دهند. در این پژوهش، ابتدا ضعف روش‌های ذکرشده نشان داده شده و سپس روشی جدید برای تشخیص آسیب در عرشه‌ی پل از طریق توسعه‌ی روش‌های مذکور ارائه شده است. برای این منظور، مدل عددی پل ۳ دهانه‌ی بزرگمهر اصفهان، که از طریق آزمایش‌های میدانی تأیید شده و مدل یک پل ۵ دهانه‌ی ۲۵ متری استفاده و آسیب ایجادشده روی عرشه‌ی پل از طریق کاهش مدول کشسانی یک المان در وسط دهانه‌ی مدل پل‌ها تعریف شده است.

واژگان کلیدی: روش‌های شناسایی آسیب، عرشه‌ی پل، شکل‌های مودی، بسامدهای طبیعی، مقطع طولی و عرضی آسیب‌دیده.

seyedali.tabaei@modares.ac.ir
danesh_fa@modares.ac.ir

۱. مقدمه

پل‌ها در طول عمر سرویس‌دهی به دلایل مختلف مانند: تأثیر وسائط نقلیه، خستگی، زلزله، و... دچار صدمه می‌شوند. با رجوع به مبانی تئوری دینامیک سازه‌ها مشخص می‌شود که مشخصات دینامیکی یک سازه، مختص آن سازه است و با تغییر در خصوصیات فیزیکی دچار تغییر می‌شوند. این امر تشخیص و مکان‌یابی آسیب موجود در سازه‌یی که به هر دلیل دچار تغییر ماهیتی شده است، را ممکن می‌سازد. ایجاد آسیب در سازه ممکن است باعث تغییر در مشخصات فیزیکی سازه (سختی، میرایی، و جرم) شود. این تغییرات در پاسخ‌های دینامیکی و مشخصات دینامیکی سازه تأثیر می‌گذارد. در بعضی مواقع، مکان و میزان آسیب با استفاده از بازرسی چشمی قابل تعیین است. اما در مواقعی که آسیب در درون سازه اتفاق افتاده باشد و قابل دیدن نباشد، این روش توانایی محدودی در ردیابی آسیب دارد.[1]

برخی پارامترهای دینامیکی نظیر بسامدهای طبیعی و شکل‌های‌مودی به‌منظور شناسایی آسیب، مورد استفاده قرارگرفته‌اند. دلیل این امر آن است که دست‌یابی به پارامترهای مودال یک سازه‌ی واقعی به‌راحتی ممکن است.[2] بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی مستقیماً مربوط به سختی سازه هستند. بنابراین هرگونه کاهش در بسامدهای طبیعی و یا تغییر در شکل‌های مودی، نشان‌دهنده‌ی کاهش در سختی است.

در زمینه‌ی شناسایی آسیب در پل، کارهای بسیاری انجام شده است. در پژوهشی در سال ۱۹۸۶،[3] ارتعاش‌های روی یک پل بتنی موجود در طول انجام آزمایش شکست، اندازه‌گیری و کاهش مقادیر بسامدهای طبیعی در طول اعمال بار تا مقدار نهایی مشاهده شده است. در پژوهش دیگری (۱۹۹۶)،[4] نیز آزمایشی روی پل I-۴۰ انجام شده و با اعمال ۵ روش شناسایی آسیب بر روی اطلاعات مودال (عددی و آزمایشگاهی)، مقایسه‌یی بین روش‌ها صورت گرفته است. روش‌های مذکور عبارتند از: تغییر در انرژی کرنشی مودال، تغییر در انحناء شکل مودی، تغییر در نرمی، تغییر در انحناء نرمی، و تغییر در سختی. پارامترهای متفاوتی که در مطالعه‌ی مذکور مورد استفاده قرارگرفته‌اند، شامل تعداد مودهای مورد استفاده برای شناسایی آسیب، تعداد، و مکان حس‌گرها بوده و نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است در صورتی که آسیب شدید باشد، تمامی روش‌ها قابلیت شناسایی محل آسیب را دارند و در صورتی که آسیب کمتر باشد، روش انرژی کرنشی مودال در شناسایی آسیب، عملکرد بهتری در برابر دیگر روش‌ها دارد. برخی پژوهشگران نیز در پژوهشی در سال ۱۹۹۹،[2] کاربرد

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۲۱، پذیرش ۱۳۹۴/۳/۵.

Archive of SID
www.SID.ir

روش انحناء مودال را در شناسایی آسیب مورد بررسی قرار داده‌اند. انحناهای مودهای پایینی نسبت به انحناهای مودهای بالایی دقت بیشتری دارند و برای مودهای بالاتر نیاز به اندازه‌گیری گسترده است. زمانی که بیشتر از یک آسیب در سازه وجود داشته باشد، یافتن آسیب با استفاده از فقط مود اول امکان‌پذیر نیست. نتایج به‌دست‌آمده از اعمال روش مذکور بر روی پل Z۲۴ نیز حاکی از آن است که روش انحناء مودال قادر است آسیب را به درستی شناسایی کند. در پژوهشی در سال ۲۰۰۲،[۵] چند تیر بتن مسلح به طول ۶ متر به منظور تشخیص ترک مورد آزمایش قرارگرفته و برای تشخیص ترک از روش‌های معیار اطمینان مودی، معیار اطمینان مودی مختصاتی، تغییر انرژی کرنشی، تغییر انعطاف‌پذیری، و تغییر بسامدهای طبیعی استفاده شده است. در میان روش‌های مذکور، روش تغییر انرژی کرنشی بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۷،[۶] روش‌های شکل مودی، انحناء شکل مودی، انعطاف‌پذیری، انحناء انعطاف‌پذیری، و نشانه‌ی آسیب روی عرشه‌ی یک پل با تکیه‌گاه ساده مورد بررسی قرارگرفته است. زمانی که آسیب از کنار تکیه‌گاه به سمت وسط دهانه تغییر می‌کند، عملکرد تمامی روش‌ها کاهش می‌یابد. هر چه تعداد نقاط اندازه‌گیری افزایش پیدا می‌کند، دقت مکان‌یابی ۳ روش بر پایه‌ی انحنا افزایش می‌یابد. برخی پژوهشگران در پژوهشی در سال ۲۰۰۹،[۷] به‌منظور شناسایی آسیب، روش‌هایی بر پایه‌ی ارتعاش بر روی یک پل یک دهانه‌ی مرکب و با چند شاه‌تیر اعمال و از اطلاعات مودال شبیه‌سازی‌شده با نرم‌افزار آنالیز المان محدود، روش‌های بر پایه‌ی نرمی مودال و انرژی کرنشی مودال استفاده کرده و نشان داده‌اند که روش ماتریس نرمی مودال قادر به شناسایی آسیب در تیر و عرشه نیست. پژوهشگران مذکور به این نتیجه رسیده‌اند که روش انرژی کرنشی مودال برای اعمال بر روی این نوع پل‌ها می‌تواند مفید واقع شود.

در پژوهش دیگری (۲۰۰۹)،[۸] نیز مروری بر روش‌های شناسایی آسیب بر پایه‌ی ارتعاش انجام شده است. از جمله روش‌های مورد استفاده می‌توان به تغییر در بسامدهای طبیعی، انحناء مود، انرژی کرنشی موال، نرمی دینامیکی، و شبکه‌های عصبی مصنوعی اشاره کرد. روش‌های جدید پردازش سیگنال باعث شده‌اند که روش‌های شناسایی آسیب با دقت بیشتری وجود آسیب را تخمین بزنند. همچنین در پژوهش مذکور اشاره شده است که برای سلامت‌سنجی پل‌ها، به‌دلیل محدودیت‌هایی که روش‌های موجود دارند، یک روش واحد برای انجام آن نمی‌توان نام برد. برخی پژوهشگران در پژوهشی در سال ۲۰۱۰،[۹] یک پل پیش‌ساخته با بتن پیش‌تنیده به منظور بررسی عملکرد روش‌های VBDD مورد آزمایش قرار داده‌اند. روش‌های مورد استفاده عبارت بوده‌اند از: شکل‌مودی، انحناء شکل مودی، انعطاف‌پذیری، انعطاف‌پذیری اصلاح‌شده، و نشانه‌ی آسیب. تمامی روش‌ها قادر به شناسایی و مکان‌یابی آسیب در ناحیه‌ی ۱/۶ برابر فاصله بین شتاب‌سنج‌ها بوده‌اند. تحلیل‌های المان محدود نشان داده است که افزایش تعداد مکان حس‌گرها منجر به افزایش دقت مکان‌یابی می‌شود. در حالی که استفاده از تعداد مودهای بیشتر، بهبود کمی در نتایج و در مواقعی باعث ایجاد خطا در تحلیل‌ها شده‌اند. در سال ۲۰۱۳ نیز پژوهشگران شاخص جدیدی بر پایه‌ی انحناء نرمی ارائه داده‌اند، که در آن اثر تفاوت طول المان‌های مجاور در نظر گرفته شده است. آنها نشان داده‌اند که این روش به‌خوبی قادر به شناسایی آسیب است.[۱۰] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ نشان داده شده است که روش نرمی در شناسایی آسیب در پل‌های معلق کارامد است و باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود.[۱۱]

در این نوشتار به بررسی روش‌های ضریب انحناء شکل مودی، تغییر در نرمی، و تغییر در انحناء نرمی پرداخته و روشی جدید از طریق توسعه‌ی روش‌های مذکور ارائه شده است.

۲. روش‌های شناسایی آسیب استفاده‌شده

۱.۲. روش ضریب انحناء شکل مودی (CDF)

پندی و همکارانش (۱۹۹۱)،[۱۲] نشان داده‌اند که تغییر در منحنی شکل مود می‌تواند یک نشان‌گر مناسب آسیب برای تیرهای سازه‌یی المان محدود باشند. تغییرات در انحناء شکل مودی نسبت به تغییرات در جابه‌جایی شکل مودی، در ناحیه‌ی آسیب‌دیده بیشتر است. به عبارتی، با رسم نمودار تفاوت منحنی مودال بین حالت سالم و حالت آسیب‌دیده‌ی یک پیک در محل المان آسیب‌دیده، وجود آسیب را نشان می‌دهد. انحناء شکل مودی با سختی خمشی مقطع عرضی تیر مرتبط است. انحنا در یک نقطه از رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:

$$\kappa = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{d^2 \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i}{dx^2} = \frac{M}{EI} \qquad (1)$$

که در آن، κ انحنا در یک مقطع، M ممان خمشی، E مدول کشسانی، I ممان اینرسی مقطع، y تغییرشکل کل، و $\frac{d^2 \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i}{dx^2}$ مشتق دوم مجموع شکل مودها نسبت به فاصله‌ی طولی x است. اگر ترک یا آسیب دیگری در سازه ایجاد شود، باعث کاهش EI در مقطع آسیب‌دیده می‌شود، که بزرگای انحنا را در آن مقطع افزایش می‌دهد.

فرض می‌شود که iاُمین شکل مود برای سازه‌ی اصلی و سازه‌ی صدمه‌دیده به ترتیب با بردارهای ϕ_i و ϕ_i^* نشان داده شود. بردارهای انحناء مربوط به این شکل‌های مودی، ϕ_i'' و $\phi_i^{*''}$ هستند. در این حالت افزایش در انحناء شکل مودی مربوط به آسیب از طریق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$\Delta\phi_i'' = \left|\phi_i^{*''} - \phi_i''\right| \qquad (2)$$

پیک‌های مثبت بزرگ ایجادشده برای $\Delta\phi_i''$، محل آسیب را نشان می‌دهند. ژو (۲۰۰۶) با توجه به پژوهشی که انجام داده است، رابطه‌ی ۳ را پیشنهاد کرده است:[۱۳]

$$\Delta\phi_i'' = \left|\phi_i^{*''}\right| - \left|\phi_i''\right| \qquad (3)$$

مشکل اصلی این روش مربوط به شیوه‌ی مورد استفاده برای به‌دست‌آوردن مشتق دوم شکل مودی است. معمولاً در این مواقع از روش تفاضل مرکزی استفاده می‌شود.[۱۴] به‌علاوه شکل‌های مودی با اندازه‌گیری و یا محاسبه‌ی مقادیر در تعداد محدودی مکان‌های مجزا روی سازه تعیین می‌شوند (رابطه‌ی ۴):

$$\phi_{ji}'' = \frac{\phi_{(j+1)i} - 2\phi_{ji} + \phi_{(j-i)i}}{h^2} \qquad (4)$$

که در آن، ϕ_{ji}'' انحنا در نقطه‌ی j مربوط به مود iاُم (عضو jاُم در بردار ϕ_i'')، ϕ_{ji} جابه‌جایی در نقطه‌ی j مربوط به مود iاُم و h میانگین فاصله بین نقاط در بردار ϕ_i است. وهاب،[۲] ضریب آسیب انحنا را به‌صورت رابطه‌ی ۵ تعریف کرده است:

$$\mathrm{CDF} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left|\phi_{o_i}'' - \phi_{d_i}''\right| \qquad (5)$$

که در آن، N تعداد مودهای درنظرگرفته‌شده، ϕ_o'' انحناء شکل مود سازه‌ی سالم، و ϕ_d'' انحناء شکل مود سازه‌ی آسیب‌دیده است.

۲.۲. روش تغییر در نرمی (CFM)

دسته‌ی دیگری از روش‌های شناسایی آسیب با استفاده از ماتریس نرمی دینامیکی برای تخمین تغییرات در رفتار استاتیکی سازه استفاده می‌شود.[۱۵] ماتریس نرمی

Archive of SID
www.SID.ir

به‌صورت عکس ماتریس سختی تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۶):

$$\{u\} = [G]\{F\} \qquad (۶)$$

با مقایسه‌ی ماتریس نرمی به‌دست‌آمده از مودهای سازه‌ی صدمه‌دیده با ماتریس نرمی به‌دست‌آمده از مودهای سازه‌ی سالم و یا ماتریس نرمی حاصل از نتایج المان محدود، آسیب ردیابی می‌شود. به‌دلیل اینکه ماتریس نرمی با مجذور بسامدهای مودال رابطه‌ی عکس دارد، بنابراین به تغییرات مودهای بسامدی پایین، بیشتر حساس است. با استفاده از تعداد کمی از مودهای پایین می‌توان تخمین خوبی از ماتریس نرمی به‌دست آورد.[۱۶] وجود ترک یا آسیب در سازه، سختی سازه را کاهش می‌دهد. به‌دلیل اینکه نرمی عکس سختی است، ایجاد آسیب موجب افزایش نرمی سازه می‌شود. ماتریس نرمی سازه در دو حالت سالم و صدمه‌دیده به ترتیب با F و F^* نشان داده می‌شود و براساس رابطه‌ی ارائه‌شده‌ی پژوهشگران [۱۷] به‌صورت رابطه‌های ۷ و ۸ از تعداد کمی مودهای ارتعاشی پایین تعیین می‌شوند:

$$F \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\omega_i^2}\phi_i\phi_i^T \qquad (۷)$$

$$F^* \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\omega_i^{*2}}\phi_i^*\phi_i^{*T} \qquad (۸)$$

که در آن‌ها، ω_i بسامد مود iاُم، n تعداد مودهای اندازه‌گیری‌شده، ϕ_i شکل مودهای نرمال‌شده و علامت ستاره مربوط به سازه‌ی آسیب‌دیده است. تغییر در نرمی ایجادشده به‌دلیل آسیب را می‌توان از اختلاف این ماتریس‌ها به‌صورت رابطه‌ی ۹ محاسبه کرد:

$$\Delta F = F - F^* \qquad (۹)$$

که در آن، ΔF تغییردر ماتریس نرمی است. برای jاُمین ستون این ماتریس، $\bar{\delta}_j$ بیشینه‌ی مقداری اعضاء این ستون است، که از طریق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$\bar{\delta}_j = \max|\Delta F_{ij}|, \qquad i = 1...m \qquad (۱۰)$$

که در آن، ΔF_{ij} اعضاء ΔF و m تعداد نقاطی است که در شکل‌مودی تعیین شده است. پارامتر $\bar{\delta}_j$ از تغییر نرمی در نقطه‌ی j به‌دست می‌آید. بزرگ‌ترین مقدار $\bar{\delta}_j$، نشان‌دهنده‌ی محتمل‌ترین مکان برای وجود آسیب است.

۳.۲. روش تغییر در انحنای نرمی (CFCM)

ژانگ و آکتان،[۱۸] دریافته‌اند که تغییر در انحناهای تغییرشکل سازه، یک نشانه‌ی حساس به آسیب موضعی است. ستون jاُم از ماتریس نرمی F مربوط به تغییرشکل سازه تحت بارواحد در مقطع عرضی j است. مجموع اعضاء مرتبط درکل ستون‌های ماتریس نرمی، یک بردار ایجاد می‌کند که نشان‌دهنده‌ی تغییرشکل خمشی است. اگر بار واحد به‌صورت هم‌زمان به مقاطع عرضی اعمال شود، این شکل به‌عنوان نرمی بار یکنواخت است و با بردار f نشان داده می‌شود.

اعضاء بردار انحناء نرمی یکنواخت f'' با استفاده از f و یا با روش تفاضل مرکزی محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۱۱):

$$f''_j = \frac{f_{j+1} - 2f_j + f_{j-1}}{h^2} \qquad (۱۱)$$

که در آن، h میانگین فاصله بین نقاط اندازه‌گیری‌شده است. مقدار افزایش مطلق انحنا در مکان j، به‌صورت رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\Delta f''_j = \left|f_j^{*''} - f''_j\right| \qquad (۱۲)$$

که در آن، علامت ستاره مربوط به حالت آسیب‌دیده است. بزرگ‌ترین مقدار مثبت $\Delta f''$، به‌عنوان مکان آسیب به‌شمار می‌رود. ژو (۲۰۰۶)،[۱۳] به‌جای رابطه‌ی ۱۲، رابطه‌ی ۱۳ را ارائه کرده است:

$$\Delta f''_j = \left|f_j^{*''}\right| - \left|f''_j\right| \qquad (۱۳)$$

۳. پل‌های مورد استفاده

۱.۳. پل ۳ دهانه‌ی بزرگمهر اصفهان

پل بزرگمهر یکی از پل‌های پرتردد شهر اصفهان با یک عرشه‌ی بتنی به‌طول ۱۱۵ متر و عرض ۱۰ متراست (شکل ۱). جزئیات پایه‌های پل و عرشه در شکل‌های ۲ الی ۴ ارائه شده است.

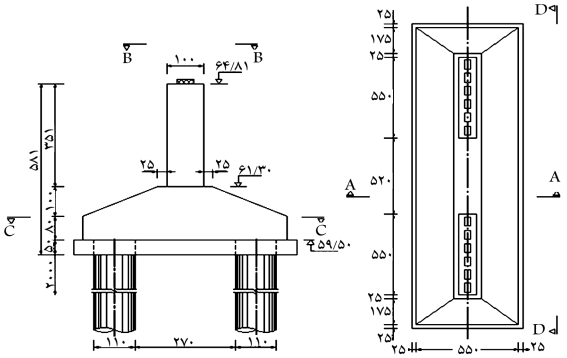
۱.۱.۳. ایجاد مدل عددی پل بزرگمهر

برای مدل‌سازی پل بزرگمهر، نرم‌افزار CSIBridge و در آن المان پوسته برای عرشه و المان فریم برای ستون‌ها مورد استفاده قرارگرفته است. تکیه‌گاه‌ها در جهت طولی و عرضی نیمه‌صلب هستند و در جهت قائم صلب مدل‌سازی شده‌اند. اندازه‌ی مش‌های در نظرگرفته‌شده در جهت طولی، به میزان بیشینه‌ی ۲٫۸۵ متر و در جهت عرضی، به میزان بیشینه‌ی ۲٫۱۵ متر بوده است. مدل عددی سه‌بُعدی پل بزرگمهر در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۲.۱.۳. تأیید مدل عددی از طریق انجام آزمایش میدانی

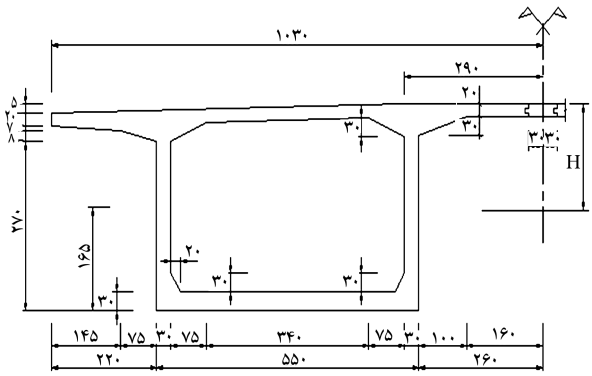
برای تأیید مدل عددی ایجادشده، بسامدهای طبیعی مدل با بسامدهای طبیعی پل مقایسه شده‌اند. برای به‌دست‌آوردن بسامدهای طبیعی پل، اقدام به انجام آزمایش

شکل ۱. پل بزرگمهر اصفهان.

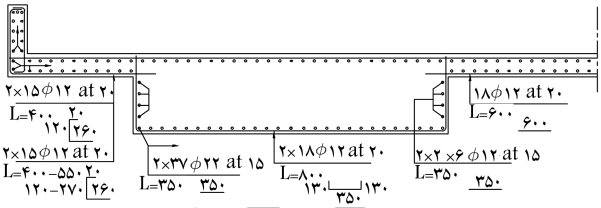


شکل ۲. پایه‌ی پل بزرگمهر.

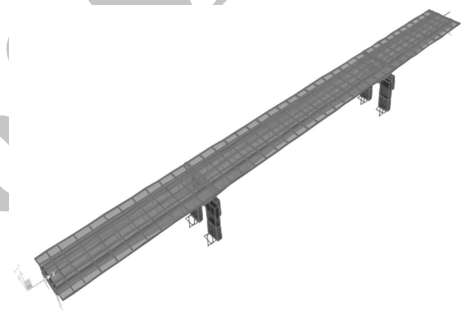
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۳. مقطع عرضی شاه‌تیر جعبه‌یی پل بزرگمهر.



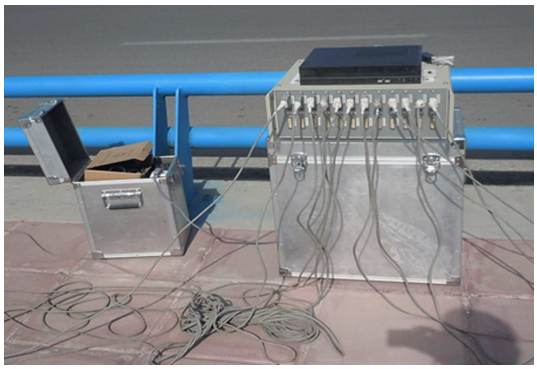
شکل ۴. جزئیات مقطع پل بزرگمهر.



شکل ۵. مدل سه‌بُعدی پل بزرگمهر.

شکل ۶. حس‌گر شتاب‌سنج مورد استفاده در آزمایش پل بزرگمهر.

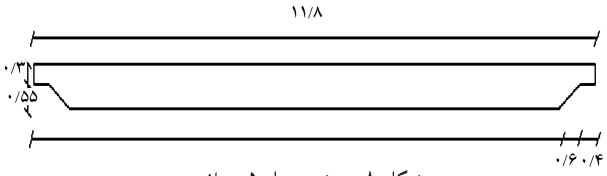
در شرایط عبور و مرور ترافیک روزانه شده است. بدین منظور، ۱۲ عدد حس‌گر شتاب‌سنج مورد استفاده قرارگرفته است (شکل ۶). پاسخ پل در برابر عبور وسائط نقلیه از طریق شتاب‌سنج‌ها ثبت و از طریق کابل به دستگاه دیتالاگر منتقل شده است (شکل ۷). این اطلاعات از طریق یک مودم بی‌سیم به رایانه قابل حمل انتقال یافته و در آن ذخیره شده است. سپس به منظور استخراج بسامدهای طبیعی از روش تجزیه‌ی حوزه‌ی بسامد توسعه‌یافته (EFDD) استفاده شده است. بسامدهای به‌دست‌آمده از آزمایش و مدل عددی در جدول ۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود



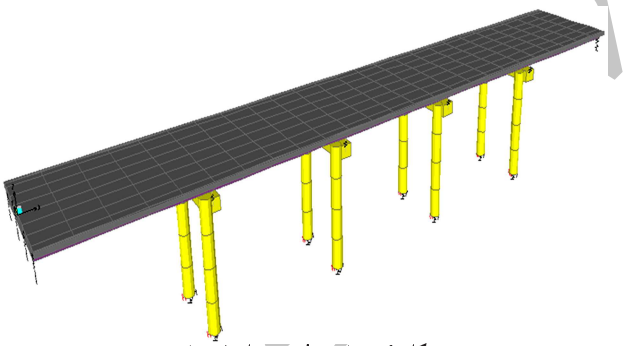
شکل ۷. دستگاه دیتالاگر مورد استفاده در آزمایش پل بزرگمهر.

جدول ۱. بسامدهای طبیعی پل بزرگمهر.

شماره‌ی مود	بسامد طبیعی (آزمایش)	بسامد طبیعی (مدل)	درصد اختلاف
۱	۱٫۸۵۵	۱٫۸۵۲	۰٫۱۶
۲	۳٫۵۱۶	۳٫۵۳۱	۰٫۴۲
۳	۵٫۴۶۹	۵٫۵۱۲	۰٫۷۸
۴	۶٫۵۴۳	۶٫۴۱	۲٫۰۳
۵	۹٫۵۷۰	۹٫۴۵۴	۱٫۲۱



شکل ۸. عرشه‌ی پل ۵ دهانه.



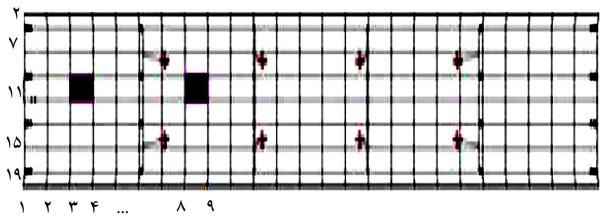
شکل ۹. مدل سه‌بُعدی پل ۵ دهانه.

که اختلاف بسامدها اندک بوده و مدل ایجادشده برای انجام ادامه‌ی روند پژوهش مناسب است.

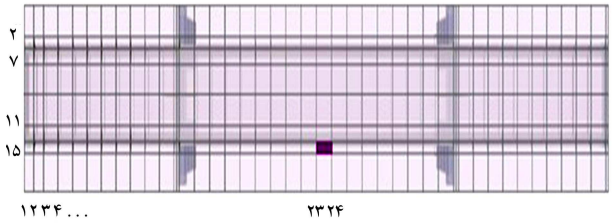
۲.۳. پل ۵ دهانه

پل دیگری که جهت انجام تحلیل‌های مربوط به شناسایی آسیب مورد استفاده قرار گرفته است، یک پل ۵ دهانه‌ی طراحی‌شده توسط جلوداریان،[۱۹] است. پل مذکور، ۵ دهانه به طول‌های ۲۵ متر و عرض عرشه‌ی ۱۱٫۸ متر و همچنین ۸ ستون دایره‌یی و عرشه به‌صورت دال درجا دارد (شکل ۸). مدل عددی سه‌بُعدی پل ۵ دهانه در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

www.SID.ir



شکل ۱۰. ایجاد آسیب در پل ۵ دهانه در المان بین مقاطع عرضی ۳ و ۴ یا ۸ و ۹ روی مقطع طولی ۱۱.



شکل ۱۱. ایجاد آسیب در پل بزرگمهر در المان بین مقاطع عرضی ۲۳ و ۲۴ روی مقطع طولی ۱۵.

۴. روش ایجاد آسیب در مدل‌های عددی

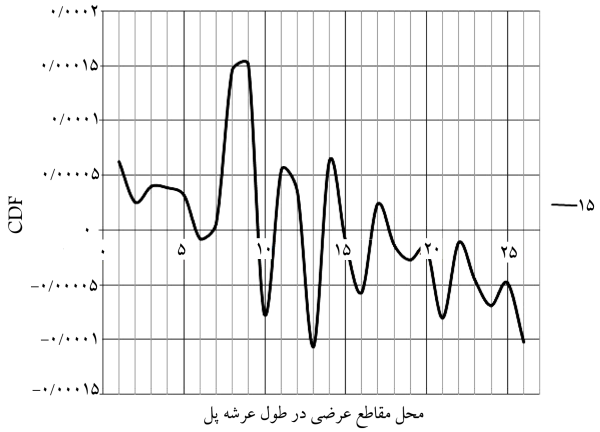
مطابق کارهای پیشین انجام‌شده،[۱۲،۷ و ۲۰] برای ایجاد آسیب در عرشه‌ی پل‌ها، سختی یک المان در وسط دهانه کاهش داده شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). بدین منظور مدول کشسانی المان موردنظر به اندازه‌ی ۱۵٪ ، ۳۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ کاهش داده شده است.

۵. تعیین ضعف‌های روش‌های شناسایی آسیب و توسعه‌ی آن‌ها جهت اصلاح ضعف‌ها

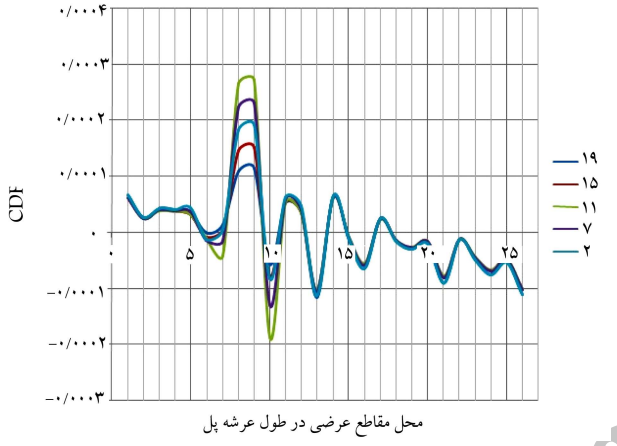
برای بررسی روش‌های شناسایی آسیب، همان‌طورکه اشاره شده است، سختی یک المان در وسط دهانه‌ی پل‌ها کاهش یافته و با استفاده از شکل مودهای سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده، اقدام به شناسایی آسیب شده است. در ادامه، تعدادی از نتایج به‌دست‌آمده به عنوان نمونه ارائه شده است.

در صورتی که آسیب ۳۰٪ در وسط دهانه‌ی دوم پل ۵ دهانه (مقاطع عرضی ۸ و ۹) ایجاد شود، اگر از شکل‌مودهای به‌دست‌آمده از مقطع طولی ۱۵ (آسیب‌ندیده) استفاده شود، نتیجه‌ی حاصل از روش CDF مطابق شکل ۱۲ است. مشاهده می‌شود که این روش با توجه به پیک به‌دست‌آمده، آسیب را در مقطع عرضی ۹ نشان می‌دهد، ولی در مورد مقطع طولی آسیب‌دیده نمی‌توان اظهارنظر کرد. حال اگر چند مقطع طولی در نظر گرفته شود و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها هم‌زمان مشاهده شوند، شکل ۱۳ به‌دست می‌آید. مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی مقدار ایجادشده در مقطع عرضی ۹ است و همچنین پیک موردنظر به ازاء مقادیر نمودار سبزرنگ است، که بدین صورت مقطع طولی ۱۱ را به عنوان آسیب‌دیده نشان می‌دهد، که صحیح است.

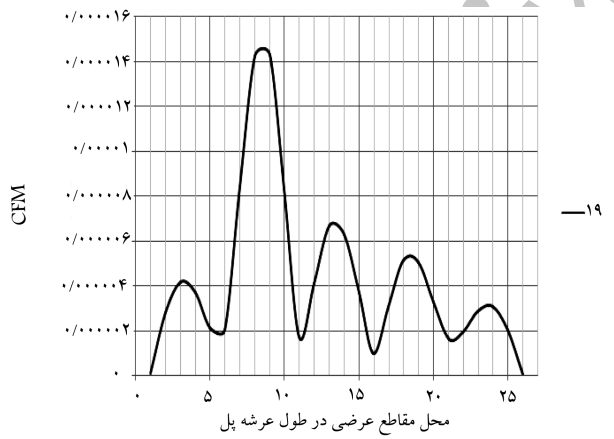
با استفاده از روش تغییر در نرمی و با درنظرگرفتن یک مقطع طولی، همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با توجه به وجود پیک در مقاطع عرضی ۸ و ۹، این مقطع به عنوان آسیب‌دیده نشان داده شده است. ولی در مورد مقطع طولی آسیب‌دیده نمی‌توان اظهارنظر کرد. حال اگر چند مقطع طولی را در نظر بگیریم، شکل ۱۵ به‌دست می‌آید. مشاهده می‌شود که پیک ایجادشده به ازاء نمودار سبزرنگ



شکل ۱۲. روش CDF با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۱۵.



شکل ۱۳. روش CDF با استفاده از چند مقطع طولی.

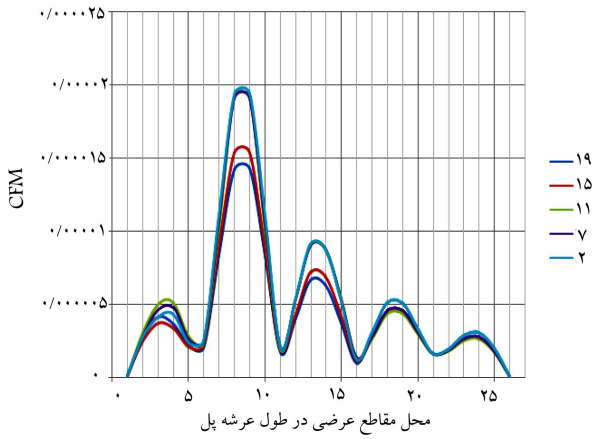


شکل ۱۴. روش CFM با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۱۹.

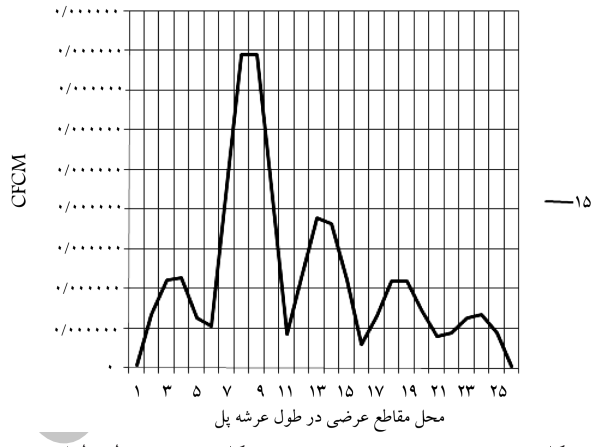
و در مقاطع عرضی ۸ و ۹ ایجاد شده است. بنابراین روش آسیب ایجادشده‌ی مذکور را به درستی در مقطع طولی ۱۱ و مقاطع عرضی ۸ و ۹ نشان می‌دهد.

با استفاده از روش تغییر انحناء نرمی و همچنین استفاده از مقطع طولی ۱۵، نتیجه‌ی به‌دست‌آمده مطابق با شکل ۱۶ است. روش مذکور با توجه به پیک ایجادشده، مقطع عرضی آسیب‌دیده را به‌درستی نشان می‌دهد، ولی قادر به شناسایی مقطع طولی آسیب‌دیده نیست. حال اگر از چند مقطع طولی استفاده شود، مطابق شکل ۱۷

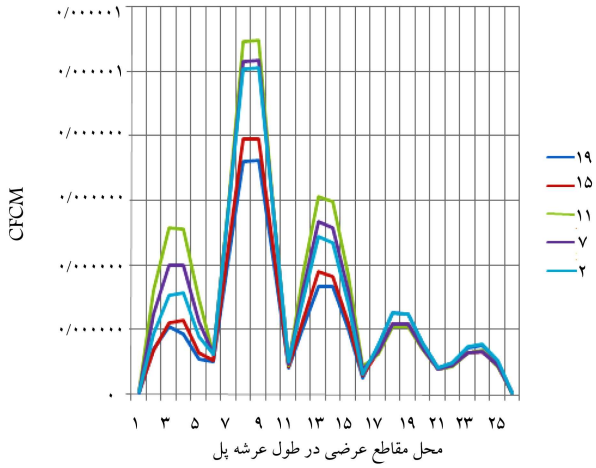
www.SID.ir



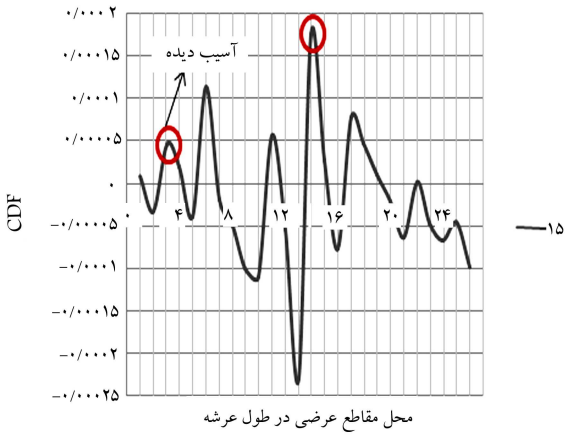
شکل ۱۵. روش CFM با استفاده از چند مقطع طولی.



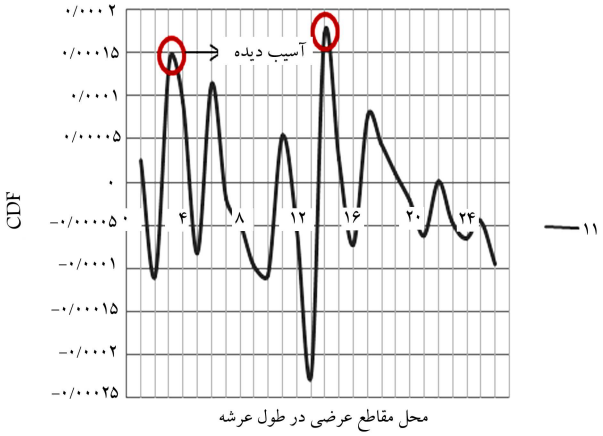
شکل ۱۶. روش CFCM با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۱۵.



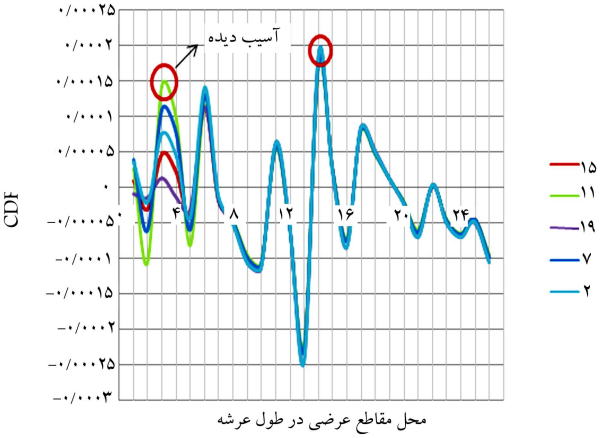
شکل ۱۷. روش CFCM با استفاده از چند مقطع طولی.



شکل ۱۸. روش CDF با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۱۵.



شکل ۱۹. روش CDF با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۱۱.

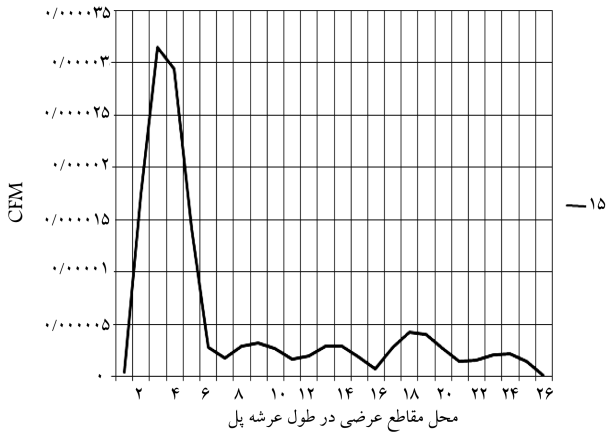


شکل ۲۰. روش CDF با استفاده از چند مقطع طولی.

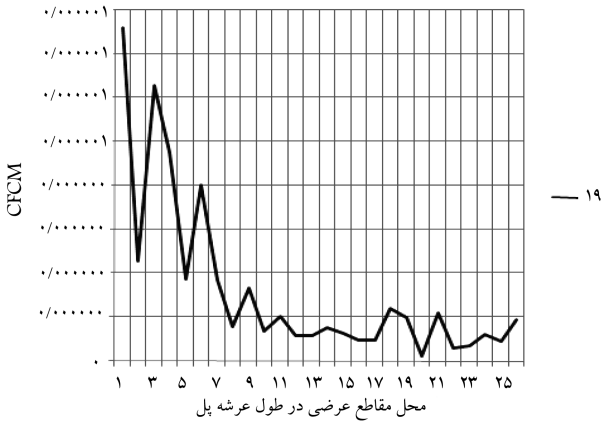
مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی مقدار در مقطع عرضی ۸ اتفاق افتاده است، که به ازاء نمودار سبزرنگ است. بنابراین، روش مذکور آسیب ایجادشده را در مقطع عرضی ۸ و مقطع طولی ۱۱ نشان می‌دهد، که صحیح است.

در صورتی که آسیب ۵۰٪ در وسط دهانه‌ی اول پل ۵ دهانه (مقاطع عرضی ۳ و ۴) ایجاد شود، اگر از شکل مودهای به‌دست‌آمده از مقطع طولی ۱۵ (آسیب‌ندیده) استفاده شود، نتیجه‌ی حاصل از روش CDF مطابق شکل ۱۸ است. مشاهده می‌شود که روش مذکور، آسیب را در مقطع عرضی ۱۴ نشان می‌دهد؛ در صورتی که آسیب بین مقاطع عرضی ۳ و ۴ ایجاد شده است. همچنین اگر از شکل مودهای به‌دست‌آمده از مقطع طولی ۱۱ (آسیب‌دیده) استفاده شود، روش مقطع عرضی ۱۴ را نیز به عنوان آسیب نشان می‌دهد (شکل ۱۹). حال اگر چند مقطع طولی درنظر گرفته شود و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها هم‌زمان مشاهده شوند، شکل ۲۰ به‌دست می‌آید. مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی مقدار ایجادشده در مقطع عرضی ۱۴ است

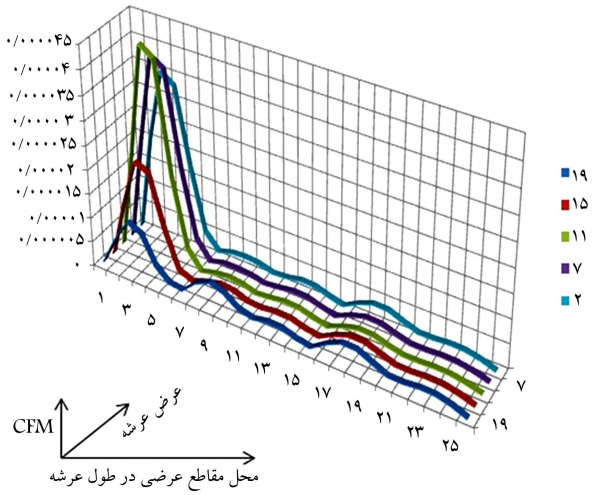
www.SID.ir



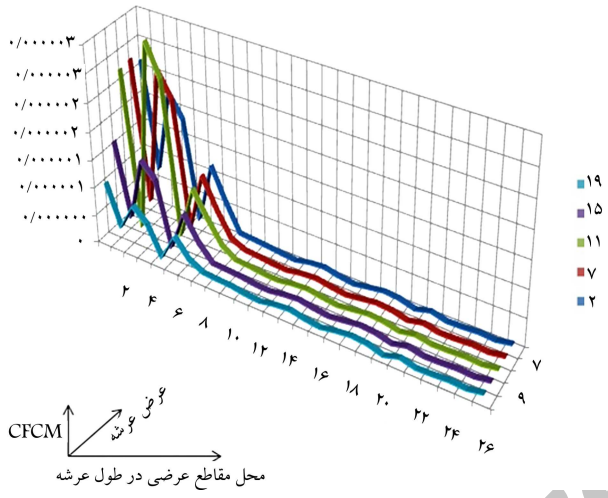
شکل ۲۱. روش CFM با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۱۵.



شکل ۲۳. روش CFCM با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۱۹.



شکل ۲۲. روش CFM با استفاده از چند مقطع طولی.



شکل ۲۴. روش CFCM با استفاده از چند مقطع طولی.

و مقطع آسیب‌دیده به اشتباه نشان داده شده است. اما اگر به تغییرات ایجادشده در مقدار CDF دقت شود، مشاهده می‌شود که فقط در مقطع عرضی ۳، مقادیر به‌دست‌آمده برای CDF در مقاطع طولی مختلف متفاوت است. بنابراین اگر علاوه بر بیشینه‌ی مقدار رخ‌داده، تغییرات ایجادشده در مقدار CDF نیز مورد توجه قرارگیرد، روش CDF می‌تواند مقطع عرضی آسیب‌دیده را به‌درستی شناسایی کند. همچنین با توجه به اینکه نمودار سبزرنگ بالاتر از دیگر نمودارها قرارگرفته است، مقطع طولی ۱۱ به عنوان مقطع طولی آسیب‌دیده نشان داده شده است، که صحیح است.

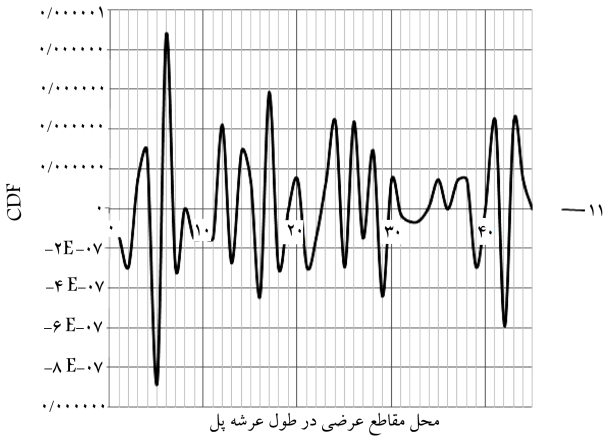
با استفاده از روش تغییر در نرمی، در صورت استفاده از شکل مود مقطع طولی ۱۵، مطابق شکل ۲۱ پیک ایجادشده، در مقطع عرضی ۳ است و مقطع عرضی آسیب‌دیده را نشان می‌دهد. اما مقطع طولی آسیب‌دیده را نمی‌تواند نشان دهد. حال اگر به‌جای درنظرگرفتن یک مقطع طولی، چند مقطع طولی در نظرگرفته شود، نتیجه‌ی به‌دست‌آمده مطابق شکل ۲۲ است. مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی ایجادشده در مقطع عرضی ۳ است و روش مقطع عرضی آسیب را به‌درستی نشان می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه نمودار سبزرنگ بالاتر از دیگر نمودارها قرارگرفته است، این روش قادر است مقطع طولی آسیب‌دیده را نیز به‌درستی نشان دهد.

با استفاده از روش تغییر در انحناء نرمی، در صورتی که از شکل مود مقطع طولی ۱۹ استفاده شود، مطابق با شکل ۲۳، پیک رخ‌داده در مقطع عرضی ۳ است. ولی مشخص نیست که مقطع طولی آسیب‌دیده ۱۹ است یا خیر. حال اگر به‌جای درنظرگرفتن یک مقطع طولی، چند مقطع طولی در نظرگرفته شود، نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی مقدار ایجادشده در مقطع عرضی ۳ است. همچنین با توجه به اینکه نمودار سبزرنگ بالاتر از دیگر نمودارها قرارگرفته است، این روش قادر به شناسایی مقطع عرضی و طولی آسیب‌دیده است.

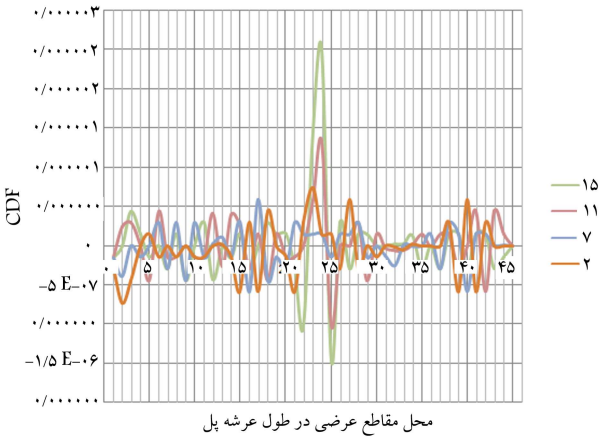
در صورتی که آسیب ۵۰٪ در وسط دهانه‌ی میانی پل بزرگمهر (مقاطع عرضی ۲۳ و ۲۴ و مقطع طولی ۱۵) ایجاد شود، و با استفاده از روش CDF، اگر از شکل مود به‌دست‌آمده از مقطع طولی ۱۱ استفاده شود، بیشینه‌ی مقدار در مقطع عرضی ۶ ایجاد شده است (شکل ۲۵) و مقطع مذکور به عنوان آسیب نشان داده شده است. اما آسیب در مقاطع عرضی ۲۳ و ۲۴ ایجاد و روش مذکور در تشخیص مقطع عرضی آسیب‌دیده دچار اشتباه شده است. همچنین در مورد مقطع طولی آسیب‌دیده نیز نمی‌توان اظهارنظر کرد. حال اگر از چند مقطع طولی استفاده شود، پیک ایجادشده در مقطع عرضی ۲۴ است (شکل ۲۶) و در این صورت روش مذکور به صورت صحیح، مقطع آسیب‌دیده را نشان می‌دهد. و نیز با توجه به اینکه بیشینه‌ی مقدار به ازاء نمودار سبزرنگ است، مقطع طولی ۱۵ هم به‌درستی به عنوان مقطع طولی آسیب‌دیده نشان داده شده است.

همچنین با استفاده از روش تغییر در نرمی و درنظرگرفتن یک مقطع طولی در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود که آسیب نشان داده‌شده در مقاطع عرضی ۲۲ و ۲۴

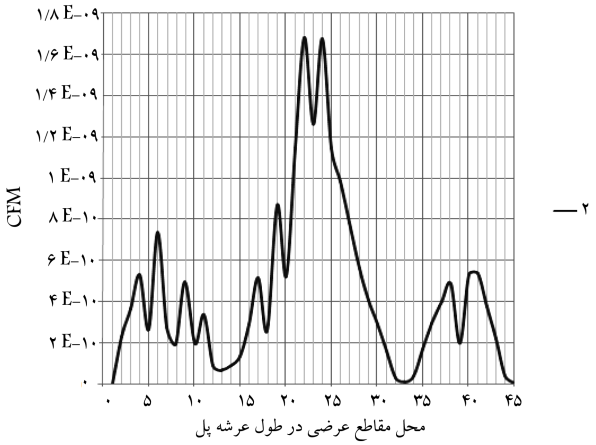
Archive of SID
www.SID.ir



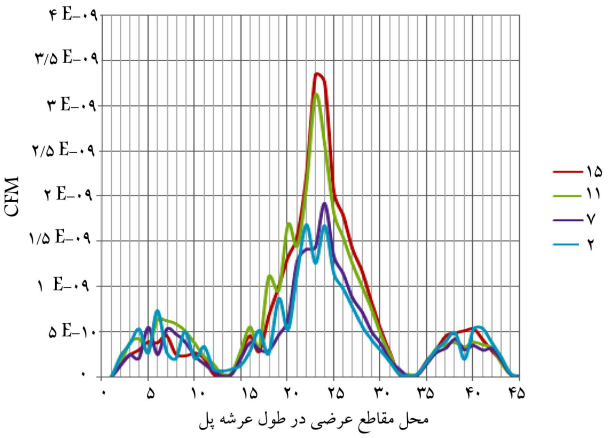
شکل ۲۵. روش CDF با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۱۱.



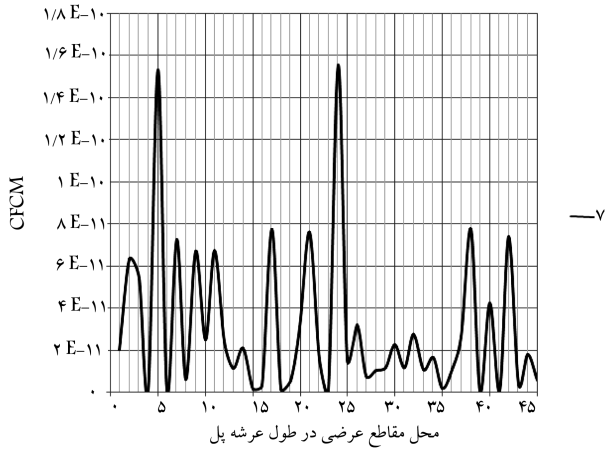
شکل ۲۶. روش CDF با استفاده از چند مقطع طولی.



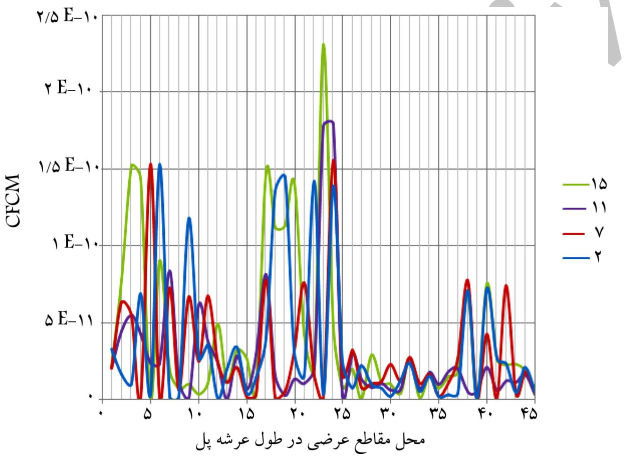
شکل ۲۷. روش CFM با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۲.



شکل ۲۸. روش CFM با استفاده از چند مقطع طولی.



شکل ۲۹. روش CFCM با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۷.



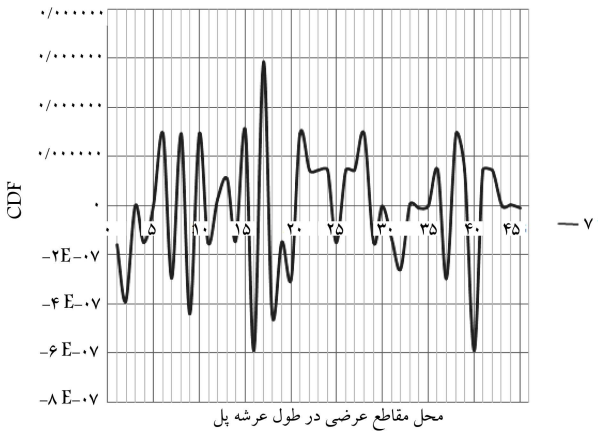
شکل ۳۰. روش CFCM با استفاده از چند مقطع طولی.

است. همچنین مقطع طولی آسیب‌دیده قابل شناسایی نیست. حال اگر از چند مقطع طولی استفاده شود، آسیب در مقطع عرضی ۲۳ و همچنین مقطع طولی ۱۵ نشان می‌دهد که صحیح است (شکل ۲۸).

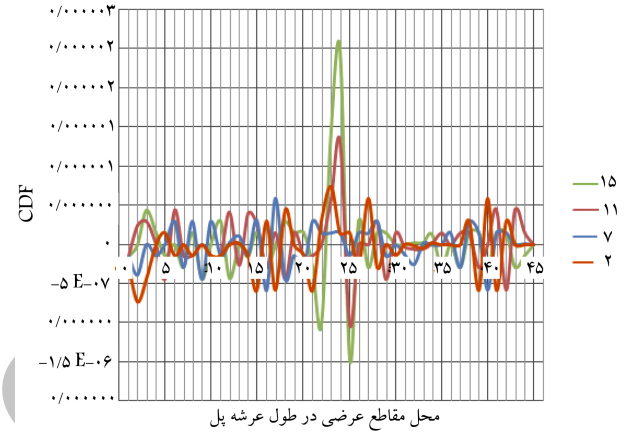
با استفاده از روش تغییر در انحناء نرمی و درنظرگرفتن شکل مود یک مقطع طولی، مطابق شکل ۲۹ مشاهده می‌شود که آسیب نشان داده‌شده در مقاطع عرضی ۵ و ۲۴ است. حال اگر چند مقطع طولی مورد استفاده قرارگیرد، بیشینه‌ی ایجادشده در مقطع عرضی ۲۴ است (شکل ۳۰). همچنین مقطع طولی ۱۵ نیز به‌درستی به عنوان آسیب‌دیده نشان داده شده است.

در صورتی که آسیب ۹۰٪ در وسط دهانه‌ی میانی پل بزرگمهر (مقاطع عرضی ۲۳ و ۲۴) ایجاد شود، همان‌طور که در شکل ۳۱ مشاهده می‌شود، اگر فقط از شکل‌های مودی مقطع طولی ۷ استفاده شود، پیک ایجادشده در مقطع عرضی ۱۷ است، که به اشتباه مقطع عرضی آسیب‌دیده نشان داده شده است. همچنین مقطع

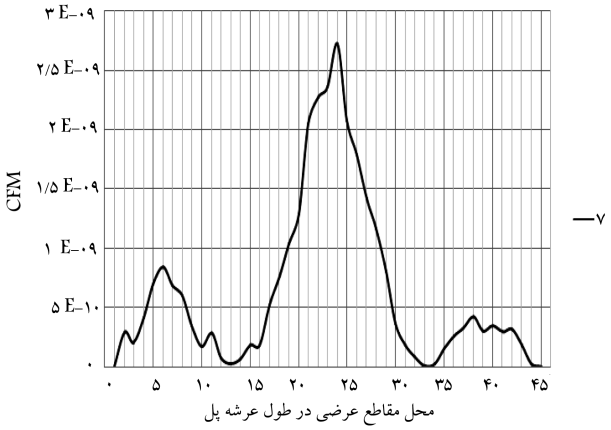
www.SID.ir



شکل ۳۱. روش CDF با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۲.



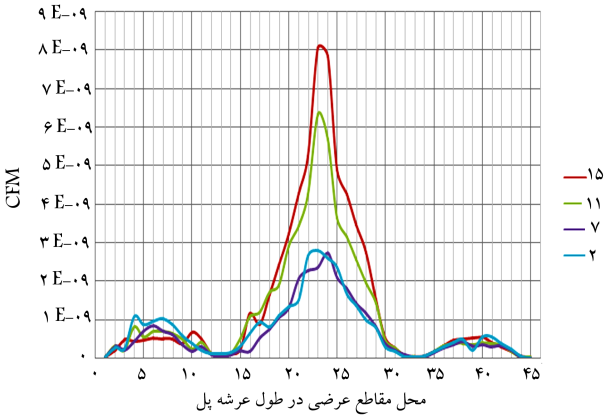
شکل ۳۲. روش CDF با استفاده از چند مقطع طولی.



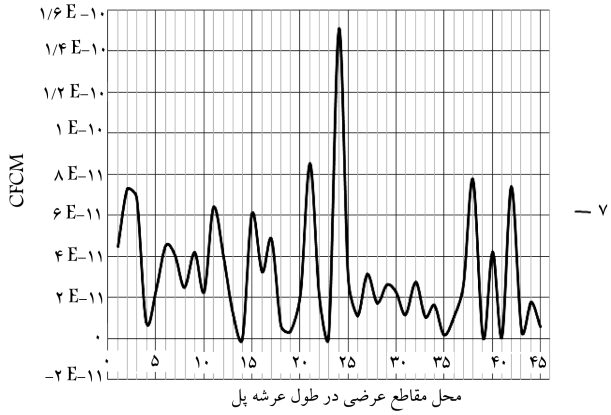
شکل ۳۳. روش CFM با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۷.

طولی آسیب‌دیده قابل شناسایی نیست. اما در صورتی که به‌جای درنظرگرفتن یک مقطع طولی، چند مقطع طولی در نظرگرفته شود، مطابق شکل ۳۲، روش CDF قادر است مقطع عرضی آسیب‌دیده را نشان دهد. همچنین با توجه به اینکه پیک ایجادشده به ازاء نمودار سبزرنگ است، روش مذکور مقطع طولی آسیب‌دیده را نیز به‌درستی نشان می‌دهد.

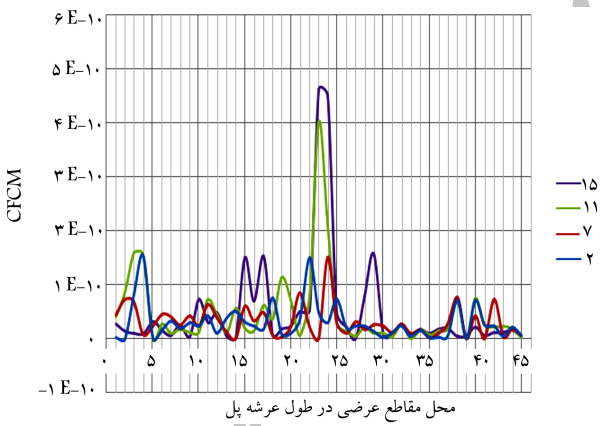
همچنین با استفاده از روش تغییر در نرمی و درنظرگرفتن شکل‌های مودی مقطع طولی ۷، مطابق با شکل ۳۳ می‌توان مشاهده کرد که آسیب در مقطع عرضی ۲۴



شکل ۳۴. روش CFM با استفاده از چند مقطع طولی.



شکل ۳۵. روش CFCM با استفاده از شکل مودهای مقطع طولی ۷.



شکل ۳۶. روش CFCM با استفاده از چند مقطع طولی.

به‌درستی نشان داده شده است. ولی مقطع طولی آسیب‌دیده قابل شناسایی نیست. حال با استفاده از چند مقطع طولی، در شکل ۳۴ مشاهده می‌شود که آسیب نشان داده‌شده در مقطع عرضی ۲۴ است و با توجه به اینکه مقدار بیشینه مربوط به مقطع طولی ۱۵ است، روش مذکور، مقطع عرضی و طولی و به عبارتی محل آسیب را شناسایی کرده است.

با استفاده از روش تغییر در انحناء نرمی و درنظرگرفتن شکل‌های مودی مقطع طولی ۷، شکل ۳۵ به‌دست می‌آید. در شکل مذکور مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی مقدار ایجادشده در مقطع عرضی ۲۴ است و مقطع عرضی آسیب‌دیده به‌درستی

www.SID.ir

نشان داده شده است. ولی در مورد مقطع طولی آسیب‌دیده اطلاعاتی در اختیار قرار نمی‌دهد. حال در صورتی که از چند مقطع طولی استفاده شود (شکل ۳۶)، مشاهده می‌شود که آسیب نشان داده‌شده در مقطع عرضی ۲۴ است و با توجه به اینکه مقدار بیشینه مربوط به مقطع طولی ۱۵ است، روش مذکور مقطع عرضی و طولی و به عبارتی محل آسیب را شناسایی کرده است.

۶. نتیجه‌گیری

- در این پژوهش روش‌های CFM، CDF و CFCM به منظور از بین‌بردن ضعف تشخیص محل آسیب‌دیده توسعه داده شده‌اند. در گذشته به منظور تشخیص آسیب با استفاده از روش‌های اشاره‌شده، از شکل مودهای یک مقطع طولی استفاده شده است. در این پژوهش نشان داده شده است که همیشه با درنظرگرفتن یک مقطع طولی نمی‌توان مقطع عرضی آسیب‌دیده را به‌درستی مشخص کرد (مانند شکل ۱۸)، ولی نشان داده شده است که با درنظرگرفتن چند مقطع طولی به‌جای یک مقطع، محل آسیب به‌درستی قادر تشخیص است (مانند شکل ۳۴). به‌عبارتی دیگر، اگر به‌جای درنظرگرفتن شکل مودهای یک مقطع طولی از شکل مودهای چند مقطع طولی استفاده شود، این روش‌ها قادر خواهند بود نه فقط مقطع عرضی آسیب‌دیده، بلکه مقطع طولی آسیب‌دیده و به‌عبارتی محل آسیب را به‌درستی تشخیص دهند.
- در تشخیص آسیب با استفاده از روش CDF نتیجه‌گیری شده است که استفاده از شکل مودهای یک مقطع طولی و درنظرگرفتن بیشینه‌ی مقدار ایجادشده در نمودار، به‌تنهایی نمی‌تواند نشان‌گر محل آسیب باشد. با توسعه‌ی روش استنباط از نتایج در این پژوهش نشان داده شده است که تغییرات ایجادشده در مقدار CDF در یک مقطع عرضی برای مقاطع طولی متفاوت می‌تواند به‌درستی مشخص‌کننده‌ی محل آسیب باشد. بنابراین در استفاده از روش مذکور در صورتی که مقادیر CDF برای یک مقطع عرضی در مقاطع طولی مختلف نزدیک باشند، پیک نمودار نشان‌دهنده‌ی محل آسیب نیست و باید مقطعی به عنوان آسیب‌دیده معرفی شود، که مقدار CDF در مقاطع طولی مختلف متفاوت باشد. به‌طور مثال در شکل ۲۰ که مربوط به تشخیص آسیب ایجادشده در مقطع عرضی ۳ پل ۵ دهانه با استفاده از روش CDF است، بیشینه‌ی مقدار ایجادشده در مقطع عرضی ۱۴ است و نشان‌دهنده‌ی آسیب در این مکان است که نادرست است. اما با درنظرگرفتن پیشنهاد ارائه‌شده در این پژوهش، یعنی بررسی تغییرات ایجادشده در مقدار CDF در مقاطع طولی مختلف، مقطع عرضی ۳ به عنوان مقطع عرضی آسیب‌دیده تشخیص داده شده است، که صحیح است.
- بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از روش جدید ارائه‌شده در این پژوهش، روش‌های CFM، CDF و CFCM قادر به شناسایی مقطع طولی و عرضی آسیب‌دیده هستند و ضعف روش‌های ذکرشده در شناسایی آسیب برطرف شده است.

پانوشت‌ها

1. curvature damage factor
2. change in flexibility
3. change in flexibility curvature

منابع (References)

1. Majumdar, A., Maiti, D.K. and Maity, D. "Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization", *Applied Mathematics and Computation*, **218**(19), pp. 9759-9772 (2012).
2. Abdel Wahab, M. and De Roeck, G. "Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario", *Journal of Sound and Vibration*, **226**(2), pp. 217-235 (1999).
3. Kato, M. and Shimada, S. "Vibration of PC bridge during failure process", *Journal of Structural Engineering*, **112**(7), pp. 1692-1703 (1986).
4. Farrar, C.R. and Jauregui, D., *Damage Detection Algorithms Applied to Experimental Modal Data from the I-40 bridge*, Los Alamos National Laboratory, 134 p. (1996).
5. Ndambi, J.-M., Vantomme, J. and Harri, K. "Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives", *Engineering Structures*, **24**(4), pp. 501-515 (2002).
6. Zhou, Z., Wegner, L.D. and Sparling, B.F. "Vibration-based detection of small-scale damage on a bridge deck", *Journal of Structural Engineering*, **133**(9), pp. 1257-1267 (2007).
7. Shih, H.W., Thambiratnam, D.P. and Chan, T.H.T. "Damage assessment in multiple-girder composite bridge using vibration characteristics", In *The Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference: Rethinking Sustainable Development: Planning*, Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure, Queensland University of Technology, Brisbane (2009).
8. Wang, L. and Chan, T.H.T. "Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring", *QUT Conference Proceedings* (2009).
9. Zhou, Z., Wegner, L.D. and Sparling, B.F. "Structural health monitoring of precast concrete box girders using selected vibration-based damage detection methods", *Advances in Civil Engineering*, **2010**(1), 21 p. (2010).
10. Xu, X.F., Zhang, F. and Zhu, W.X. "Damage detection of continuous box girder based on modal flexibility curvature method", *Advanced Materials Research*, **671-674**, pp. 1016-1020 (2013).
11. Wickramasinghe, W.R., Thambiratnam, D.P. and Chan, T.H. "Modal flexibility method for structural damage

Archive of SID
www.SID.ir

detection in suspension bridges", In *6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, SHMII-6 2013 (2014).

12. Pandey, A., Biswas, M. and Samman, M. "Damage detection from changes in curvature mode shapes", *Journal of Sound and Vibration,* **145**(2), pp. 321-332 (1991).
13. Zhou, Z., *Vibereation-Based Damage Detection of Simple Bridge Superstrutcures*, University of Saskatchewan (2006).
14. Cruz, P.J.S. and Salgado, R. "Performance of vibration-based damage detection methods in bridges", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **24**(1), pp. 62-79 (2008).
15. Doebling, S.W., Farrar, Ch., Prime, M.B. and Shevitz, D.W., *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*, Los Alamos National Lab., NM (United States) (1996).
16. An, Y.H. and Ou, J.P. "Use of LU decomposition of modal flexibility in structural damage detection: Numerical validation", *Key Engineering Materials*, **569-570**, pp. 986-993 (2013).
17. Pandey, A. and Biswas, M. "Damage detection in structures using changes in flexibility", *Journal of Sound and Vibration,* **169**(1), pp. 3-17 (1994).
18. Zhang, Z. and Aktan, A. "The damage indices for the constructed facilities", In *Proceeding-Spie the International Society for Optical Engineering*, Spie International Society for Optical (1995).
19. Jolodarian, H. "Vibration modal analysis of bridges that located in a horizontl arch", Master of Science Thesis, International Emam Khomeini University (2007).
20. Dutta, A. and Talukdar, S. "Damage detection in bridges using accurate modal parameters", *Finite Elements in Analysis and Design*, **40**(3), pp. 287-304 (2004).

Archive of SID

www.SID.ir