

Detection of damage location in concrete deck of bridge using modified modal strain energy method

Hamid Reza Jamali Alamooti¹, Mohammad Reza Davoodi², Seyedamin Mostafavian^{3*}

1- M.S. in civil engineering, Department of civil engineering, Babol university of technology, Babol, Iran

2 -Associate professor, Department of civil engineering, Babol university of technology, Babol, Iran

3 -Assistant professor, Department of civil engineering, Payame noor university (PNU), Tehran, Iran

ABSTRACT

One way to diagnose damage in structures is to use their modal strain energy change index. Since occurrence of damage in parts of a structure, in addition to changing the modal strain energy of the damaged parts, also changes the modal strain energy of the healthy parts, in the vicinity of the main damaged elements, false damaged elements will appear, which makes it difficult to identify the main damaged elements. To solve this problem, in the present work a two-step method has been used to determine the location of the damage on the deck of a concrete bridge. In the first step, by finite element modelling and performing the modal analysis, the initial damage index of different parts of the bridge deck is determined based on modal strain energy changes, using a few vibration mode shapes. In the second step, using weight coefficients, the modified damage index for each element is calculated separately, minimizing the number of false damaged elements. The proposed method for calculating weight coefficients is simple and at the same time accurate. The efficiency of this method was investigated in several damage scenarios with an intensity of only 5% in different parts of the deck of bridge. The results showed that, while the initial damage index could not distinguish even 3 damaged elements in the bridge deck from the healthy elements, the modified damage index was able to identify up to 7 damaged elements in different parts of the bridge deck with good accuracy using only 2 mode shapes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 June 2020

Revise Date: 09 August 2020

Accept Date: 10 September 2020

Keywords:

Damage detection
Modal strain energy
Concrete deck
False damaged element
Modified damage index

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.231692.2142>

*Corresponding author: Seyedamin Mostafavian

Email address: mostafavian@pnu.ac.ir

تشخیص مکان آسیب در عرشه‌ی بتنی پل با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال اصلاح شده

حمیدرضا جمالی الموتی^۱، محمدرضا داودی^۲، سیدامین مصطفویان^{۳*}

۱- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

یکی از روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها استفاده از شاخص تغییر در انرژی کرنشی مودال آن‌هاست. از آنجاکه آسیب در یک محل از سازه، علاوه بر تغییر در انرژی کرنشی مودال آن محل، موجب تغییر در انرژی کرنشی قسمت‌های سالم سازه نیز می‌شود، در مجاورت المان‌های آسیب دیده اصلی، المان‌های آسیب دیده دروغین پدیدار می‌شوند که سبب می‌شود شناسایی المان آسیب دیده اصلی با دشواری مواجه گردد. برای حل این مشکل، در کار حاضر از یک روش دو مرحله‌ای برای تعیین محل آسیب در عرشه بتنی یک پل استفاده شده است. در مرحله اول، از طریق مدل‌سازی اجزای محدود و انجام تحلیل مودال، شاخص آسیب اولیه بر مبنای تغییرات انرژی کرنشی مودال نقاط مختلف عرشه پل برای چند شکل مود اول تعیین می‌گردد. در مرحله دوم، با استفاده از ضرایب وزنی، شاخص آسیب اصلاح شده برای هر یک از المان‌ها به صورت مجزا محاسبه می‌شود که تعداد المان‌های آسیب دیده دروغین را به حداقل ممکن می‌رساند. روش پیشنهاد شده برای محاسبه ضرایب وزنی، ساده و درعین حال دقیق است. کارایی این روش در چند سناریوی آسیب با شدت تنها ۵٪ در نقاط مختلف عرشه پل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در حالی که شاخص آسیب اولیه نتوانست حتی ۳ المان آسیب دیده در عرشه پل را از المان‌های سالم مجزا نماید، اما شاخص آسیب اصلاح شده نتوانست به کمک فقط ۲ شکل مود، تا ۷ المان آسیب دیده را در نقاط مختلف عرشه پل با دقت خوب شناسایی نماید.

کلمات کلیدی: تشخیص آسیب، انرژی کرنشی مودال، عرشه بتنی، المان آسیب دیده دروغین، شاخص آسیب اصلاح شده

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.231692.2142	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.231692.2142	۱۴۰۰/۰۷/۳۰	۱۳۹۹/۰۶/۲۰	۱۳۹۹/۰۶/۲۰	۱۳۹۹/۰۳/۱۹	۱۳۹۹/۰۳/۱۲
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				سید امین مصطفویان		
				mostafavian@pnu.ac.ir		

۱- مقدمه

تاکنون برای تشخیص آسیب در سازه‌ها روش‌های مختلفی ابداع شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از تغییر در انرژی کرنشی مودال است. در این روش با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی المان‌های یک سازه در حالت سالم و آسیب‌دیده، یک شاخص آسیب تعریف می‌شود که با محاسبه آن می‌توان از وضعیت سلامت المان‌های سازه اطلاع پیدا کرد و مکان احتمالی آسیب را شناسایی نمود. ایجاد آسیب در یک سازه، علاوه بر تغییر در انرژی کرنشی المان‌های آسیب‌دیده، انرژی کرنشی المان‌های سالم را نیز دچار تغییر می‌کند که این امر سبب می‌شود المان‌های آسیب‌دیده دروغین در قسمت‌هایی از سازه مورد بررسی دیده شوند. به همین سبب برای تشخیص المان‌های آسیب‌دیده اصلی، از روش‌های مختلفی استفاده شده است که تعریف حد آستانه [۱] و کاربرد تئوری‌های آماری مانند بیز [۲] از جمله آن‌ها هستند.

روش انرژی کرنشی مودال توسط محققین زیادی برای تشخیص آسیب مورد استفاده قرار گرفته است. کورنول و همکاران [۳] با این روش به شناسایی موقعیت آسیب‌هایی با شدت ۱۰ درصد در سازه‌های صفحه‌ای پرداختند. در نمونه‌ای از نتایج ارائه شده توسط آنان، در حالی که مقدار شاخص آسیب برای المان‌های آسیب‌دیده در حدود ۳ تا ۷ متغیر بود، این شاخص برای تعداد زیادی از المان‌های سالم نیز مقداری تا حدود ۴ را نشان می‌داد. سید پور [۴] برای تعیین مکان آسیب با استفاده از این روش شاخصی تعریف کرد که توانست موقعیت المان‌های آسیب‌دیده با شدت ۳۰ درصد را در یک تیر طره با ۵ شکل مود شناسایی نماید. فن و همکاران [۵] برای تشخیص آسیب به کمک روش انرژی کرنشی مودال در المان‌های پوسته‌ای یک لبه متکی، از انحنای در جهت محور طولی عضو استفاده کردند که این امر سبب بهبود در کیفیت شناسایی المان‌های آسیب‌دیده گردید. شی و همکاران [۶] با روش انرژی کرنشی مودال امکان تشخیص آسیب‌های چندگانه در نقاط مختلف اعضای خمشی مانند تیر و صفحه را مورد بررسی قرار دادند و به کمک این روش توانستند آسیب‌هایی با شدت ۵۰٪ را به کمک پنج شکل مود اول مورد شناسایی قرار دهند؛ هرچند که مقدار شاخص آسیب برای المان‌های سالم نیز قابل توجه بود. دسی و کامبرلنگو [۷] مقایسه‌ای بین عملکرد چندین شاخص آسیب انجام دادند که تمامی این شاخص‌ها بر پایه محاسبه تغییرات انرژی کرنشی مودال، قبل و بعد از آسیب استوار بوده‌اند. هو و همکاران [۸] برای شناسایی مکان آسیب در یک ورق آلومینیومی استوانه‌ای توخالی، روش انرژی کرنشی مودال را با استفاده از ۸ شکل مود استوانه به کار گرفتند. کرونگ و همکاران [۹] با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال، آسیب‌هایی با شدت ۲۰ و ۱۵ درصد را با دو شکل مود خمشی مورد شناسایی قرار دادند که در مجاورت المان‌های آسیب‌دیده، شاخص آسیب مقادیری را به سایر المان‌های سالم نیز اختصاص داده بود. جایسوندرا و همکاران [۱۰] برای شناسایی آسیب‌هایی با شدت ۱۰٪ در یک پل قوسی، از روش انرژی کرنشی مودال استفاده کردند و از آن جایی که شکل مودهای این‌گونه پل‌ها متأثر از جابه‌جایی‌های مودال در راستای قائم و جانبی است، بیشترین مقدار شاخص انرژی کرنشی مودال از بین شاخص‌های راستای قائم و جانبی به‌عنوان شاخص انرژی کرنشی مودال مورد استفاده قرار گرفت. آسیب‌های شناسایی شده در این پل تعداد محدودی بود و همچنین شاخص آسیب المان‌های سالم نیز دچار تغییر شدند. میجیا یانگ و همکاران [۱۱] آسیب‌هایی با شدت ۵ درصد را به کمک روش انرژی کرنشی مودال، در یک المان صفحه‌ای فولادی به کمک ۳ شکل مود شناسایی کردند، ولی در مجاورت المان آسیب‌دیده، شاخص آسیب مقادیری را به خود اختصاص داده بود که سبب تردید در شناسایی المان‌های اصلی آسیب‌دیده می‌گردید. کاوه و ذولقدر [۱۲] روشی دومرحله‌ای بر مبنای انرژی کرنشی مودال برای شناسایی آسیب‌های یک تیر ساده یک و دو دهانه ارائه نمودند که با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، آسیب‌هایی با شدت ۵ درصد به بالا شناسایی می‌شد. استفاده از بهینه‌سازی سبب شناسایی دقیق‌تر المان‌های آسیب‌دیده گردید و المان‌های آسیب‌دیده با شدت کم نیز شناسایی شدند. ونگ و همکاران [۱۳] از روش انرژی کرنشی مودال، برای شناسایی آسیب‌های ایجادشده در یک سازه ساحلی خریایی بهره بردند. آن‌ها به کمک سه شکل مود، آسیب‌هایی با شدت ۵٪ را شناسایی کردند، ولی المان‌های آسیب‌دیده دروغین نیز ایجاد شد.

در مطالعات انجام‌شده توسط سایر محققین که در بالا مرور شد، در اکثر موارد در کنار المان‌های آسیب‌دیده اصلی، شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال مقادیری را نیز برای المان‌های سالم نشان می‌دهد که سبب می‌شود آن المان‌ها به اشتباه آسیب‌دیده شناخته شوند؛

این در حالی است که در آن مطالعات تعداد المان‌های آسیب‌دیده کم بوده و از درصد آسیب و تعداد شکل مود قابل توجه نیز استفاده شده است. در این پژوهش با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای، المان‌های آسیب‌دیده دروغین حذف می‌شوند و المان‌های آسیب‌دیده اصلی، با درصد‌های آسیب پایین و تعداد قابل توجه به کمک تعداد بسیار کمی شکل مود به درستی شناسایی خواهند شد. در این روش با اعمال ضرایب وزنی به هریک از شاخص‌های آسیب اولیه، شاخص اصلاح‌شده انرژی کرنشی مودال برای هر المان به دست می‌آید. این ضرایب وزنی از مقایسه شاخص انرژی کرنشی هر المان با المان‌های مجاورش محاسبه می‌شود. برای بررسی کارایی این روش، یک سازه پل متشکل از یک عرشه بتنی و سه تیر فولادی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد و برای آن شناسایی آسیب در سناریوهای مختلف انجام گرفت.

۲- شاخص آسیب به روش انرژی کرنشی مودال

۲-۱- انرژی کرنشی مودال برای المان‌های صفحه‌ای

انرژی کرنشی ذخیره شده در سازه و یا هر جسم الاستیک دیگری که مواد و مصالح آن از قانون هوک پیروی می‌کنند، در حالت کلی توسط رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$U = \iiint \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{xz} \gamma_{xz} + \tau_{yz} \gamma_{yz}) dx dy dz \quad (1)$$

در رابطه بالا تنش‌ها و کرنش‌های نرمال به ترتیب با σ و ε و تنش‌ها و کرنش‌های برشی به ترتیب با τ و γ در ۳ جهت x ، y و z نشان داده شده‌اند. با در نظر گرفتن فرضیات مربوط به صفحات با ضخامت نازک، عبارات σ_z ، γ_{yz} و γ_{xz} از رابطه (۱) حذف می‌گردند. با اعمال قانون هوک، نهایتاً رابطه انرژی کرنشی برای المان‌های صفحه‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$U = \iint \left[\frac{1}{2E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\nu\sigma_x\sigma_y) + \frac{1}{2G} \tau_{xy}^2 \right] dx dy \quad (2)$$

در این رابطه پارامترهای E و G به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته و مدول برشی مصالح عضو هستند.

در صورتی که رابطه انرژی کرنشی برحسب خیز قائم عضو بیان شود، رابطه زیر حاصل می‌گردد [۱۵]:

$$U = \iint D \left[\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y \partial x} \right)^2 \right] dx dy \quad (3)$$

در این رابطه D سختی خمشی و برابر $\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ ، ν نسبت پواسون مصالح، W جابه‌جایی قائم، عبارات $\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)$ و $\left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)$ به ترتیب انحناهای خمشی در راستای x و y ، و $\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)$ انحناهای پیچشی عضو است. از رابطه (۳) می‌توان نتیجه گرفت انرژی کرنشی رابطه‌ی مستقیم با انحنا خمشی در دو جهت عمود بر هم دارد. برای محاسبه‌ی انحنا، بایستی تغییرمکان در جهت قائم عضو به دست آمده باشد. تعیین تغییرمکان قائم مستلزم بارگذاری سازه و انجام اندازه‌گیری‌های مربوطه می‌باشد که برای مقاصد عملی مشکل است. همچنین، شناسایی مکان آسیب از مقایسه داده‌های به دست آمده از سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده انجام می‌شود که این بر مشکل فوق می‌افزاید. لذا به جای استفاده از تغییرمکان‌های سازه در رابطه (۳)، از مقادیر نسبی شکل مودهای ارتعاشی برای محاسبه انحنا و انرژی کرنشی استفاده می‌شود که منجر به حاصل شدن رابطه‌ی (۴) به عنوان مبنایی برای محاسبه شاخص آسیب می‌گردد [۱۶]، [۱۷]، [۱۸]:

$$U = \iint D \left[\left(\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (4)$$

در رابطه فوق U انرژی کرنشی مودال و \emptyset شکل مود ارتعاشی است. در محاسبه انرژی کرنشی مودال برای سازه‌هایی نظر عرشه پل، از آنجا که انحناهای مودال عرشه در راستای عمود بر محور طولی پل در مقایسه با راستای طولی ناچیز است، به همین جهت انرژی

کرنشی مودال فقط در راستای طولی x محاسبه می‌گردد. لذا رابطه‌ی (۴) به رابطه‌ی (۵) تبدیل می‌شود که ضمن تسریع در محاسبات، کمک شایانی در جهت بهبود نتایج تشخیص آسیب می‌نماید (I ممان اینرسی المان است) [۵]، [۱۹]:

$$U = \int \frac{EI}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (5)$$

۲-۲- شاخص آسیب اولیه

شاخص آسیب نشانگری است که با محاسبه‌ی آن برای هر المان می‌توان از وضعیت سلامت آن المان اطلاع پیدا کرد. شاخصی که در این تحقیق برای تعیین مکان آسیب تعریف می‌شود، بر مبنای انرژی کرنشی مودال المان در دو حالت سالم و آسیب دیده است. با توجه به رابطه (۵)، انرژی کرنشی مودال برای المان j ام در مود i ام توسط رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$U_{i,j} = \frac{EI_j}{2} \int_0^{l_j} \left(\frac{\partial^2 \phi_{ij}}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (6)$$

در رابطه فوق ϕ_{ij} شکل مود i ام برای المان j ام و l_j طول المان است. انرژی کرنشی مودال برای کل سازه که شامل n المان است، در مود i ام توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$U_i = \sum_{j=1}^n \frac{EI_j}{2} \int_0^{l_j} \left(\frac{\partial^2 \phi_{ij}}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (7)$$

اگر نسبت انرژی کرنشی مودال هر المان به انرژی کرنشی مودال کل سازه در دو حالت سالم (F_{ijh}) و آسیب دیده (F_{ija}) محاسبه شود، روابط (۸) و (۹) به دست می‌آیند:

$$(F_{ij})_h = \frac{\frac{EI_j}{2} \int_0^{l_j} \left(\frac{\partial^2 \phi_{ij}}{\partial x^2} \right)^2 dx}{\sum_{j=1}^n \frac{EI_j}{2} \int_0^{l_j} \left(\frac{\partial^2 \phi_{ij}}{\partial x^2} \right)^2 dx} \quad (8)$$

$$(F_{ij})_a = \frac{\frac{EI_j^*}{2} \int_0^{l_j} \left(\frac{\partial^2 \phi_{ij}^*}{\partial x^2} \right)^2 dx}{\sum_{j=1}^n \frac{EI_j^*}{2} \int_0^{l_j} \left(\frac{\partial^2 \phi_{ij}^*}{\partial x^2} \right)^2 dx} \quad (9)$$

در رابطه فوق بالا نویسنده * بیانگر کمیت مربوطه در سازه آسیب دیده است. در نهایت شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اولیه (β_j) به صورت رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۱-۲۳]:

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{mn} (F_{ij})_a}{\sum_{i=1}^{mn} (F_{ij})_h} \quad (10)$$

که در آن mn تعداد شکل مودهای استفاده شده است. مشتق دوم شکل مودهای ارتعاشی یا همان انحنای مودال به کمک روش‌های عددی (نظیر اختلاف محدود) قابل محاسبه است [۲۴-۲۷].

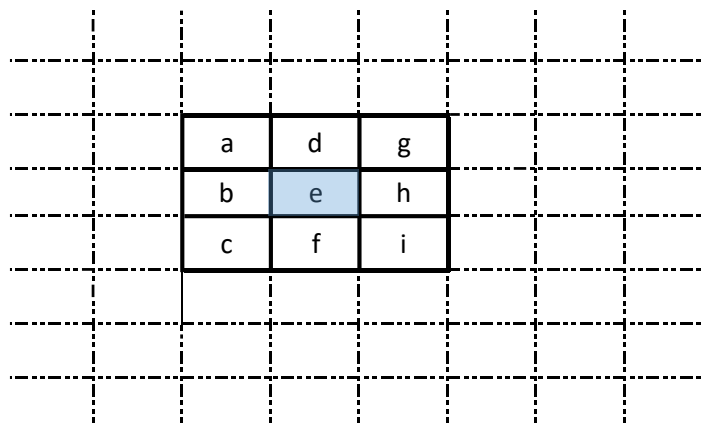
۲-۳- شاخص آسیب اصلاح شده

از آن جایی که در سازه‌های آسیب دیده علاوه بر المان‌های آسیب دیده، در انرژی کرنشی المان‌های سالم نیز تغییر ایجاد می‌شود، به منظور شناسایی دقیق المان‌های آسیب دیده و کاهش وزن شاخص آسیب المان‌های سالم، شاخص دیگری تحت عنوان شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اصلاح شده معرفی می‌گردد. این شاخص برگرفته از مقادیر به دست آمده از رابطه (۱۰) و ضریب وزن w_j برای هر المان است که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$\beta_{j_{new}} = \begin{cases} \beta_j \times w_j + (1 - w_j) \times \beta_{j_{min}} & ; (\beta_{j_{min}} < \beta_j) \\ \beta_j & ; (\beta_{j_{min}} \geq \beta_j) \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) $\beta_{j_{new}}$ شاخص آسیب انرژی کرنشی اصلاح شده مودال برای المان j ام در شکل مود i ام است و واضح است در صورت ایجاد آسیب در هر المان دلخواه، شاخص آسیب اصلاح شده مقادیری بیشتر از ۱ را به خود اختصاص می‌دهد. پارامتر $\beta_{j_{min}}$ وابسته به المان‌های مجاور هر المان دلخواه است. این پارامتر برای هر المان دلخواه مانند المان e در شکل ۱، با محاسبه حداقل β_j المان‌های مجاور المان e به دست می‌آید:

$$\beta_{e_{min}} = \min (\beta_a, \beta_b, \beta_c, \beta_d, \beta_f, \beta_g, \beta_h, \beta_i) \quad (12)$$



شکل ۱: المان‌های مجاور المان دلخواه e .

۲-۴- محاسبه ضرایب وزن

رابطه (۱۱) دارای یک جزء اصلی است که مهم‌ترین نقش را در بهبود فرآیند تشخیص آسیب ایفا می‌کند. این نقش بر عهده ضریب وزن w_j است. این ضریب در حالت کلی در محدوده بین صفر و یک متغیر است. هدف از به کار بردن این ضریب وزنی، بالا بردن وزن شاخص در المان آسیب دیده و کاهش وزن شاخص در المان سالم است. بنابراین در حالت ایده‌آل برای بهبود روند شناسایی المان آسیب دیده، بایستی شرایطی ایجاد شود که ضریب یک برای المان آسیب دیده و ضریب صفر برای المان سالم منظور گردد.

در این پژوهش برای محاسبه ضریب W_j روش جدیدی ارائه شده است که نسبت به روش‌های ارائه شده توسط سایر محققین، از سادگی و دقت مطلوبی برخوردار است. با توجه به شکل ۱، این ضریب برای المان دلخواه e به صورت رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$w_e = \begin{cases} 1 & ; \beta_e > \beta_a, \beta_b, \beta_c, \beta_d, \beta_f, \beta_g, \beta_h, \beta_i, \beta_{e_{aux}} \\ 0 & ; \beta_e \leq \beta_a, \beta_b, \beta_c, \beta_d, \beta_f, \beta_g, \beta_h, \beta_i, \beta_{e_{aux}} \end{cases} \quad (13)$$

مطابق رابطه فوق، از حالت ایده آل این ضریب وزن در شناسایی مکان آسیب استفاده شده است؛ یعنی برای یک سری از المان‌ها طبق شرط ارائه شده در رابطه فوق، ضریب یک اختصاص داده می‌شود که در این صورت با توجه به رابطه (۱۱)، مقدار شاخص اصلاح شده با شاخص اولیه برابر می‌شود. برای یک سری دیگر از المان‌ها طبق شرط ارائه شده در رابطه فوق، ضریب صفر اختصاص داده می‌شود که در این وضعیت مقدار شاخص اصلاح شده برابر پارامتر $\beta_{j_{min}}$ معرفی شده در رابطه (۱۱) می‌گردد. به عبارت دیگر، ضریب وزن یک سبب ثابت ماندن شاخص انرژی کرنشی و ضریب وزن صفر باعث کاهش آن می‌شود. پارامتر $\beta_{e_{aux}}$ از روی مقادیر شاخص اولیه المان‌های اطراف المان دلخواه e مطابق شکل (۱) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

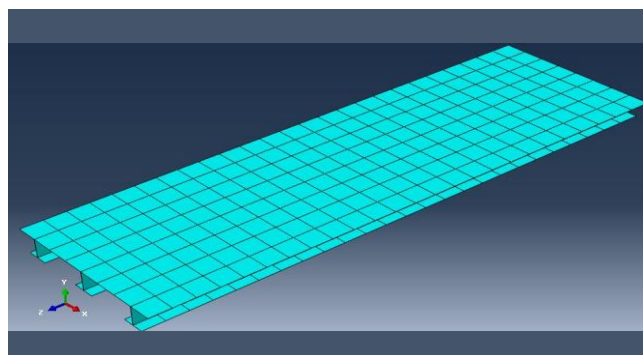
$$\beta_{e_{aux}} = \left[\frac{\max(\beta_a, \beta_b, \beta_c) + \max(\beta_d, \beta_e, \beta_f) + \max(\beta_g, \beta_h, \beta_i)}{\frac{3}{2}} \right] + \left[\frac{\max(\beta_a, \beta_d, \beta_g) + \max(\beta_b, \beta_e, \beta_h) + \max(\beta_c, \beta_f, \beta_i)}{\frac{3}{2}} \right] \quad (14)$$

۳- مدل مورد مطالعه

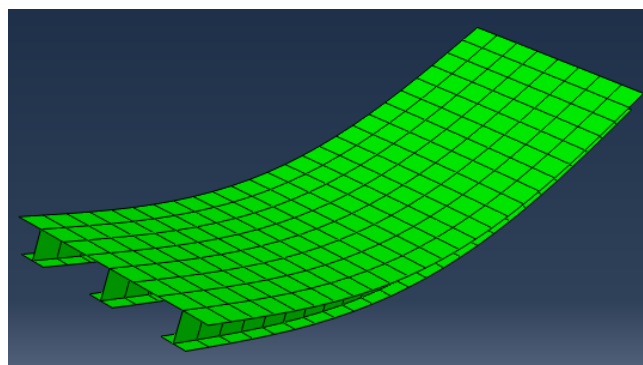
روش تشریح شده در قسمت قبل، برای شناسایی آسیب در عرشه یک پل مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، یک مدل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس ساخته شد. این مدل مطابق شکل ۲ (الف) از سه تیر فولادی و یک دال بتنی متکی بر آن تشکیل شده است. برای ایجاد تکیه‌گاه ساده در دو انتهای پل، جابه‌جایی دو انتها در راستای افقی و قائم مقید شده است. المان مورد استفاده برای مدل سازی عرشه بتنی و شاهتیرهای فولادی از نوع shell است. طول عرشه پل ۱۰ متر، عرض آن ۳/۲ متر و ضخامت آن ۰/۲ متر است و مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و چگالی مصالح بتنی آن به ترتیب ۲۴ گیگاپاسکال، ۰/۲ و ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب لحاظ گردید. مقطع شاهتیرها I شکل با پهنای بال ۳۵ سانتیمتر، ارتفاع کل ۷۰ سانتیمتر و ضخامت بال و جان ۱ سانتیمتر بوده و مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و چگالی مصالح فولادی آن به ترتیب ۲۱۰ گیگاپاسکال، ۰/۳ و ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. با انجام تحلیل مودال در نرم‌افزار، اشکال مودی عرشه پل مورد مطالعه در حالت سالم و نیز حالت‌های آسیب دیده تعیین گردید تا مطابق روابط قسمت قبل، شاخص‌های آسیب را بتوان محاسبه کرد. شکل مود اول و دوم عرشه در حالت سالم به ترتیب در شکل ۲ (ب) و (ج) نشان داده شده است. بطوریکه ملاحظه می‌گردد، این دو شکل مود خمشی بوده و انحنای مودال عرشه در راستای عمود بر محور طولی پل در مقایسه با راستای طولی قابل صرف‌نظر است.

۴- سناریوهای آسیب و نتایج حاصله

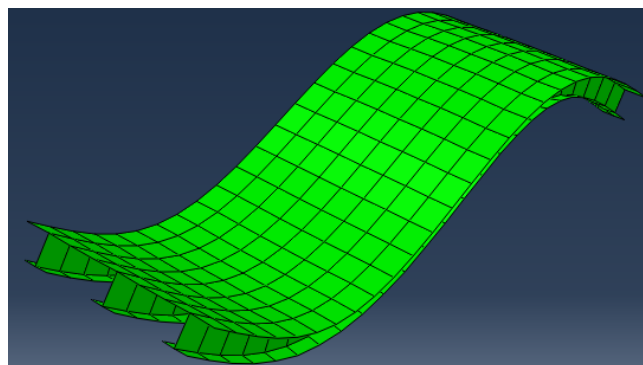
برای شبیه‌سازی آسیب در کار حاضر، سختی خمشی المان‌های آسیب دیده‌ی عرشه بتنی به میزان ۵٪ کاهش داده شد. این کاهش سختی به صورت کاهش ۵٪ در مدول الاستیسیته در مدل اعمال گردید. ۵٪ کاهش مدول الاستیسیته، با توجه به رابطه مستقیم سختی با توان سوم ضخامت المان، معادل با حدود ۲٪ کاهش ضخامت المان‌های آسیب دیده است که نمود فیزیکی بهتری دارد. این موضوع در رابطه (۱۵) نشان داده شده است:



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: (الف) مدل اجزای محدود عرشه پل مورد مطالعه، (ب) شکل مود اول و (ج) شکل مود دوم.

$$\frac{K^*}{K} = 0.95 \Rightarrow \frac{I^*}{I} = 0.95 \Rightarrow \left(\frac{h^*}{h}\right)^3 = 0.95 \Rightarrow \frac{h^*}{h} \approx 0.98 \quad (15)$$

که در آن K ، I و h به ترتیب سختی خمشی، ممان اینرسی و ضخامت المان بوده و بالا نویس * نشانگر المان آسیب دیده است. برای بررسی مکان آسیب در سناریوهای مختلف، سعی بر این بوده است که تمامی حالات موقعیت قرارگیری المان آسیب دیده مد نظر قرار گیرد. برای محاسبه شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال اولیه هر المان طبق رابطه (۱۰)، از میانگین مقدار این شاخص در چهار گره المان استفاده شده است. در تمامی سناریوها برای شناسایی مکان آسیب‌های عرشه، دو شکل مود خمشی اول مورد استفاده قرار گرفته است. در حالت کلی هرچه تعداد نقاط آسیب دیده بیشتر باشد، تعداد شکل مود بیشتری برای شناسایی مکان آسیب مورد نیاز است.

۴-۱- سناریوی آسیب ۱

در سناریوی ۱ سه المان از عرشه بتنی پل، که در مجاورت جان شاه تیرها قرار دارند، آسیب دیده‌اند. شکل ۳ (الف) المان‌های آسیب دیده در این سناریو را نشان می‌دهد. شاخص آسیب اولیه کلیه المان‌ها که توسط رابطه (۱۰) محاسبه شده است، در شکل ۳ (ب) نمایش داده شده‌اند. المان‌های آسیب دیده در این شکل با شماره ستون-سطر L2-21، L5-16 و L4-6 مشخص هستند که به ترتیب دارای شاخص‌های آسیب اولیه ۱/۰۰۷۵، ۱/۰۰۷۵ و ۱/۰۰۸۲ می‌باشند. مقدار این شاخص‌ها نزدیک بهم بوده و از سایر المان‌ها بزرگتر است. اما تعداد قابل توجهی از المان‌های سالم عرشه نیز دارای شاخص آسیب اولیه نزدیک به المان‌های آسیب دیده هستند که موجب می‌شود المان‌های آسیب دیده اصلی به وضوح مشخص نبوده و به آسانی قابل تشخیص نباشند. به عبارت دیگر، در این حالت تعداد زیادی المان آسیب دیده دروغین در کنار المان‌های آسیب دیده اصلی در نتایج دیده می‌شود.

شکل ۳ (ج) شاخص‌های آسیب اصلاح شده برای المان‌های عرشه بتنی پل، که با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه شده‌اند، را نشان می‌دهد. به طوری که ملاحظه می‌گردد، المان‌های آسیب دیده با دارا بودن شاخص آسیب بزرگ از باقی المان‌ها کاملاً مجزا بوده و به راحتی قابل شناسایی هستند. در این حالت تعداد المان‌های آسیب دیده دروغین نزدیک به صفر است. از مقایسه شکل ۳ (ب) با شکل ۳ (ج) می‌توان دریافت شاخص آسیب اصلاح شده‌ی المان‌های آسیب دیده با شاخص آسیب اولیه آنها تفاوتی ندارد، اما شاخص آسیب اصلاح شده‌ی المان‌های سالم به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده است که موجب تفکیک بسیار خوب المان‌های آسیب دیده از المان‌های سالم شده است.

۴-۲- سناریوی آسیب ۲

شش المان آسیب دیده در سناریوی آسیب ۲ در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است. المان‌های آسیب دیده در این سناریو در نقاط مختلف عرشه بتنی شامل: مجاورت جان شاه تیرها، حد فاصل بین جان شاه تیرها و ناحیه طره‌ای لبه‌ی عرشه واقع شده‌اند و لذا از نظر شرایط مرزی در حالات متفاوتی قرار دارند. مقادیر شاخص آسیب اولیه تمامی المان‌ها در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است. هر چند المان‌های آسیب دیده دارای بزرگترین مقادیر شاخص آسیب هستند، اما وجود تعداد زیادی المان سالم با شاخص‌های آسیب قابل ملاحظه (المان‌های آسیب دیده دروغین)، تشخیص المان‌های آسیب دیده را مشکل می‌کند. شکل ۴ (ج) مقادیر شاخص آسیب اصلاح شده المان‌های عرشه بتنی را نشان می‌دهد. واضح است که المان‌های آسیب دیده به خوبی شناسایی شده و از المان‌های سالم مجزا شده‌اند. بعلاوه، هیچ المان آسیب دیده دروغین مشاهده نمی‌گردد. المان‌های آسیب دیده در شکل ۴ (ب) و (ج) با شماره ستون-سطر L7-16، L3-13، L6-8، L2-5 و L8-4 مشخص هستند که به ترتیب دارای شاخص‌های آسیب ۱/۰۰۷۴، ۱/۰۰۷۴، ۱/۰۱۰۲، ۱/۰۱۲۶، ۱/۰۰۷۹ و ۱/۰۱۵۰ می‌باشند. المان‌های L2-21، L7-16 و L2-5 در مجاورت جان شاه تیرها هستند که مقدار شاخص آسیب آنها مشابه و کمتر از باقی المان‌های آسیب دیده است. المان L8-4 در ناحیه طره‌ای لبه‌ی عرشه قرار دارد و دارای بیشترین مقدار شاخص آسیب است. المان‌های L3-13 و L6-8 در حد فاصل بین جان شاه تیرها واقع شده‌اند که مقدار شاخص آسیب آنها مشابه و مابین مقادیر دو دسته المان قبل است. با دقت در این نتایج می‌توان دریافت شرایط مرزی المان تأثیر قابل توجهی بر مقدار شاخص آسیب دارد. المان‌هایی که سختی بیشتری در لبه‌های خود دارند، شاخص آسیب کمتری دارند و لذا تشخیص آنها مشکل‌تر است.

۴-۳- سناریوی آسیب ۳

مطابق شکل ۵ (الف)، سناریوی ۳ شامل شش المان آسیب دیده است که سه عدد از آنها در حد فاصل بین جان شاه تیرها و سه عدد دیگر در ناحیه طره‌ای لبه عرشه قرار دارند. شکل ۵ (ب) مقادیر شاخص آسیب اولیه کلیه المان‌ها را در سناریوی آسیب ۳ نشان می‌دهد که بیان‌گر وجود تعداد زیادی المان آسیب دیده دروغین است. این المان‌ها دارای مقدار شاخص آسیب تا ۱/۰۰۶۲ هستند و لذا می‌توانند به اشتباه به عنوان المان آسیب دیده در نظر گرفته شوند. شکل ۵ (ج) شاخص آسیب اصلاح شده المان‌های عرشه را برای این سناریو نشان می‌دهد. تمامی شش المان آسیب دیده به خوبی تشخیص داده شده و از سایر المان‌ها مجزا شده‌اند. المان‌های آسیب دیده

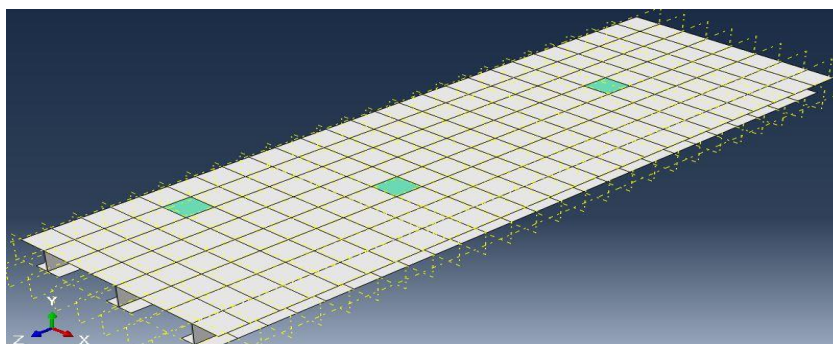
واقع شده در حد فاصل بین جان شاه تیرها دارای شماره ستون-سطر L3-22، L6-17 و L3-8 بوده که شاخص‌های آسیب آنها به ترتیب ۱/۰۱۲۰، ۱/۰۱۱۶ و ۱/۰۱۲۵ می‌باشند. المان‌های آسیب دیده واقع شده در ناحیه طره‌ای لبه عرشه دارای شماره ستون-سطر L1-، L8-25، L16 و L8-12 بوده که شاخص‌های آسیب آنها به ترتیب ۱/۰۱۳۰، ۱/۰۱۳۵ و ۱/۰۱۳۳ می‌باشند. همانطور که در سناریوی آسیب ۲ گفته شد، در اینجا نیز المان‌های بین جان شاه تیرها، که سختی بیشتری در لبه‌های خود نسبت به المان‌های ناحیه طره‌ای لبه‌ها دارند، دارای شاخص آسیب کمتری هستند. قابل ذکر است که المان در ناحیه طره‌ای لبه L8-25 در مجاورت تکیه‌های عرشه پل قرار دارد و شاخص آسیب آن کمتر از المان‌های هم خانواده خود به دست آمده است. تعداد محدودی المان آسیب دیده دروغین در شکل ۵ (ج) مشاهده می‌گردد که در بین آنها بزرگترین شاخص آسیب برابر ۱/۰۰۰۶ و متعلق به المان L7-12 می‌باشد. بنابراین المان‌های آسیب دیده اصلی با شاخص‌های آسیب بسیار بزرگ‌تر قابل شناسایی و تفکیک از المان‌های آسیب دیده دروغین هستند.

۴-۴- سناریوی آسیب ۴

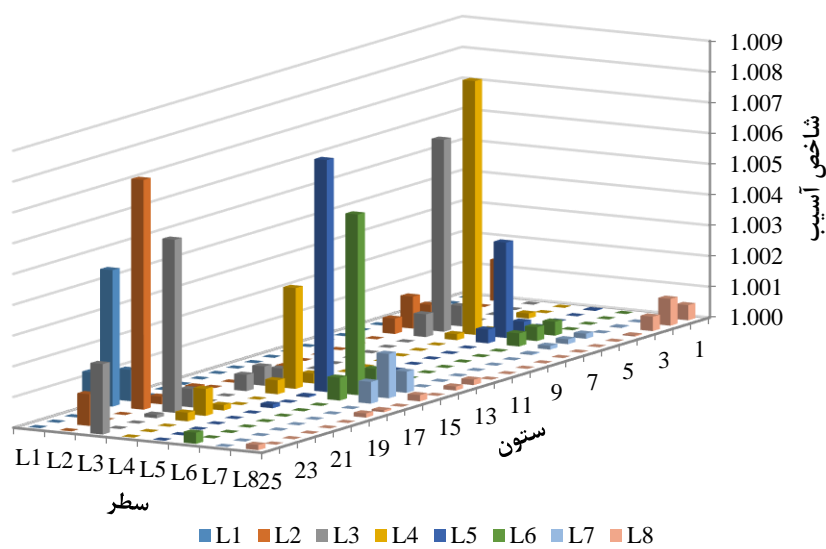
در این سناریوی آسیب، المان‌های آسیب دیده در مجاورت جان شاه تیرها و نیز در ناحیه طره‌ای لبه عرشه حضور دارند. این المان‌های آسیب دیده در شکل ۶ (الف) نشان داده شده‌اند و شاخص آسیب اولیه و اصلاح شده‌ی کلیه المان‌های عرشه در این سناریو به ترتیب در شکل ۶ (ب) و (ج) به نمایش در آمده است. به طوریکه که ملاحظه می‌گردد، شاخص آسیب اولیه المان‌ها نمی‌تواند المان‌های آسیب دیده را از المان‌های سالم به خوبی تفکیک نماید، چرا که علاوه بر المان‌های آسیب دیده، تعداد قابل توجهی از المان‌های سالم نیز دارای شاخص آسیب بزرگتر از ۱ هستند. اما شاخص آسیب اصلاح شده به خوبی نمایانگر المان‌های آسیب دیده‌ی عرشه‌ی پل است. از بین پنج المان آسیب دیده، المان‌های با شماره ستون-سطر L2-22، L5-20 و L4-15 در مجاورت جان شاه تیرها بوده و شاخص آسیب آنها به ترتیب ۱/۰۰۸۰، ۱/۰۰۷۷ و ۱/۰۰۷۳ هستند. المان‌های دارای شماره ستون-سطر L8-23 و L8-18 در ناحیه طره‌ای لبه بوده که شاخص آسیب آنها به ترتیب ۱/۰۱۳۰ و ۱/۰۱۳۷ به دست آمده است. کمتر بودن مقدار شاخص آسیب المان‌های واقع در مجاورت جان شاه تیرها، به دلیل سختی بیشتر لبه‌های این المان‌ها نسبت به المان‌های واقع در ناحیه طره‌ای لبه، قابل توجه است. تمامی المان‌های دیگر دارای شاخص آسیب کمتر از ۱ بوده و لذا در شکل ۶ (ج) دیده نمی‌شوند. بنابراین در این سناریو نیز المان‌های آسیب دیده توسط شاخص آسیب اصلاح شده به خوبی شناسایی شده‌اند.

۴-۵- سناریوی آسیب ۵

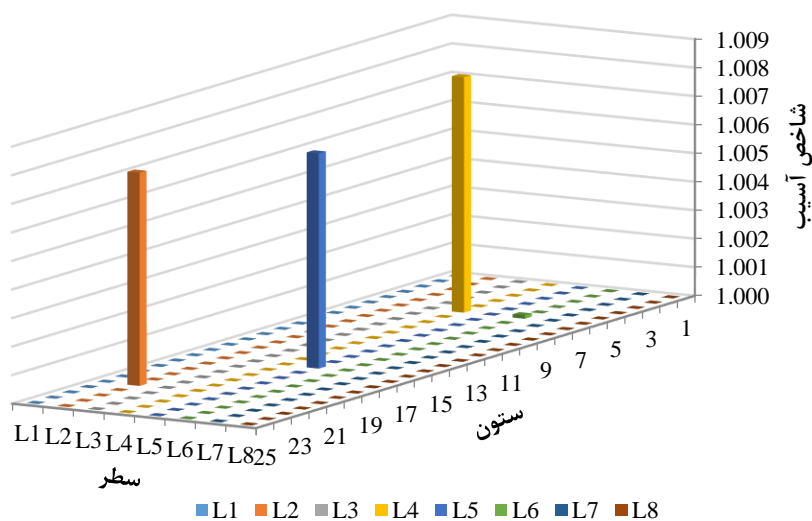
سناریوی ۵ دارای هفت المان آسیب دیده است که بیشتر از باقی سناریوها بوده و شامل تمامی انواع موقعیت قرارگیری المان‌های آسیب دیده است. به همین دلیل مسئله تشخیص آسیب در این سناریو پیچیده‌تر است. المان‌های آسیب دیده در این سناریو در شکل ۷ (الف) و شاخص آسیب اولیه و اصلاح شده به دست آمده برای کلیه المان‌ها به ترتیب در شکل ۷ (ب) و (ج) نشان داده شده است. مانند سناریوهای قبل، شاخص آسیب اولیه المان‌ها برای تعداد قابل توجهی از المان‌های سالم نیز، که عمدتاً در اطراف المان‌های آسیب دیده متمرکز هستند، بزرگتر از ۱ بدست آمده است و لذا شناسایی المان‌های آسیب دیده به آسانی امکان پذیر نیست. ولی با توجه به مقادیر شاخص آسیب اصلاح شده می‌توان المان‌های آسیب دیده را به وضوح شناسایی نمود. المان‌های آسیب دیده L7-9 و L4-11 در مجاورت جان شاه تیرها بوده و لذا دارای کمترین مقدار شاخص، به ترتیب برابر ۱/۰۰۷۹ و ۱/۰۰۷۸ هستند. المان‌های آسیب دیده L6-21، L6-16، L3-19 و L3-7 در حدفاصل ما بین جان شاه تیرها قرار دارند که نسبت به المان‌های قبل دارای شاخص آسیب بزرگتر، به ترتیب برابر ۱/۰۱۲۶، ۱/۰۱۱۱، ۱/۰۱۲۴ و ۱/۰۱۲۸ می‌باشند. المان آسیب دیده L1-25 در ناحیه طره‌ای لبه عرشه بوده و شاخص آسیب آن برابر ۱/۰۱۲۲ محاسبه شده است. با توجه به سناریوهای قبل انتظار می‌رفت المان اخیر دارای بزرگترین شاخص آسیب باشد، اما چون یکی از لبه‌های آن بر روی نقاط تکیه‌گاهی عرشه پل قرار دارد، شرایط مرزی آن مانند دیگر المان‌های ناحیه طره‌ای دور از تکیه‌گاه‌ها نبوده و لذا شاخص آسیب آن کمتر به دست آمده است. مطابق شکل ۷ (ج)، به جز چند المان سالم که شاخصی در حد ۱/۰۰۰۱ دارند، باقی المان‌های سالم دارای شاخص کوچکتر از ۱ هستند. با توجه به پیچیدگی مسئله تشخیص آسیب در این سناریو، شاخص آسیب اصلاح شده با دقت بسیار خوبی قادر به تشخیص و تفکیک المان‌های آسیب دیده از المان‌های سالم بوده است.



(الف)

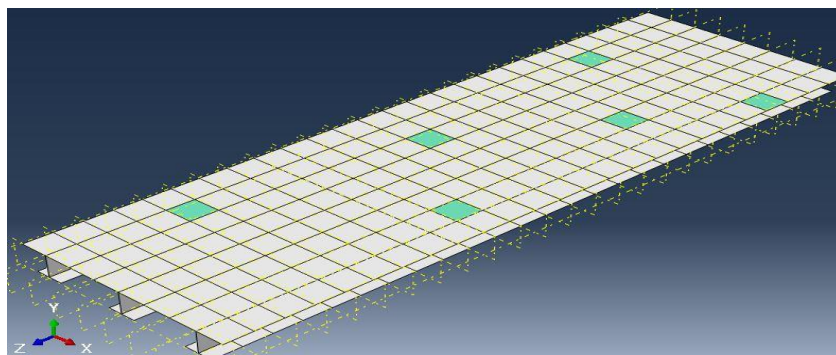


(ب)

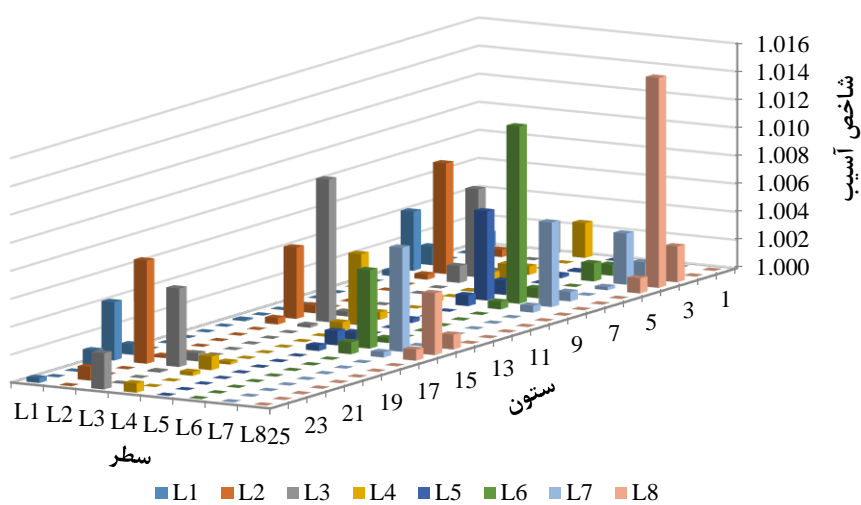


(ج)

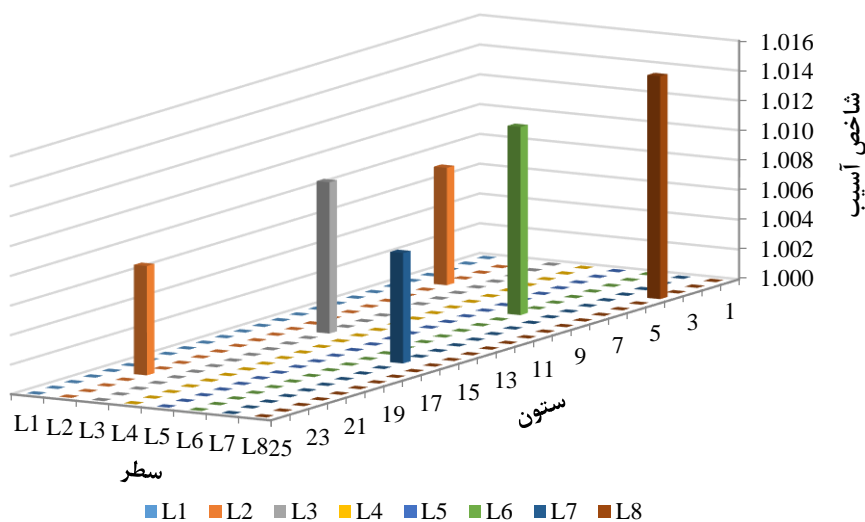
شکل ۳: سناریوی آسیب ۱ (الف) المان‌های آسیب دیده، (ب) شاخص‌های آسیب اولیه و (ج) شاخص‌های آسیب اصلاح شده.



(الف)

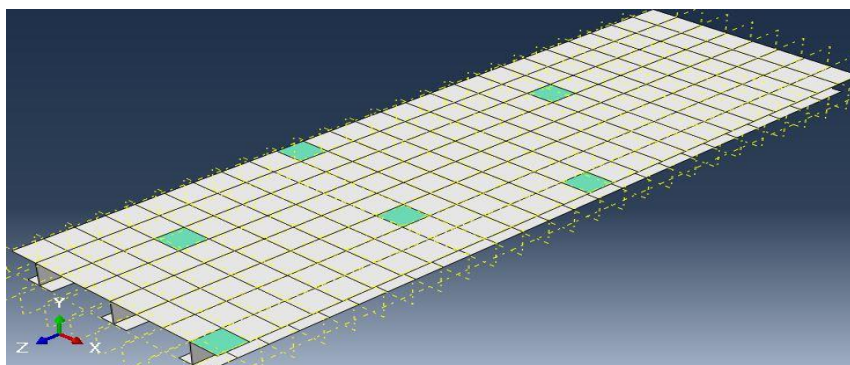


(ب)

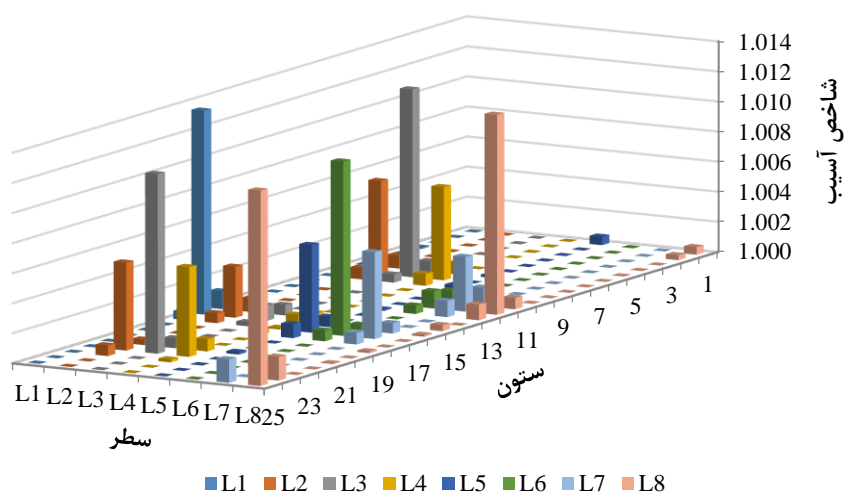


(ج)

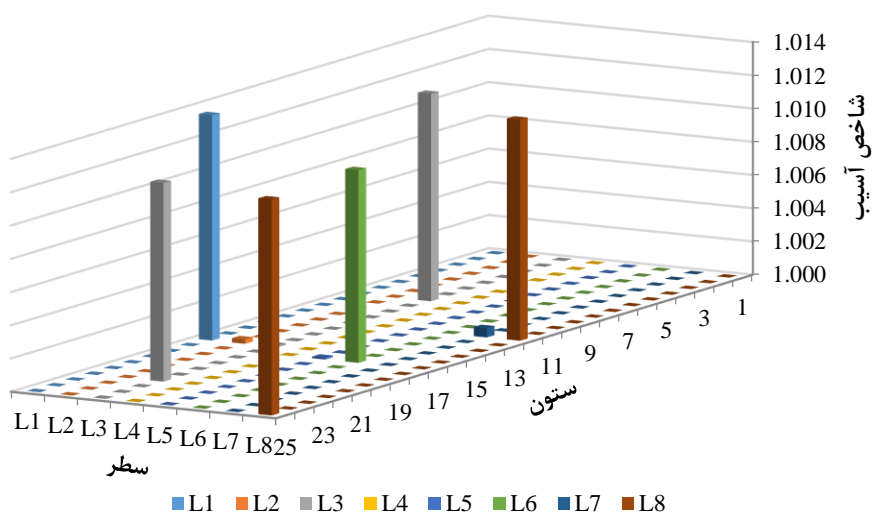
شکل ۴: سناریوی آسیب ۲ (الف) المان‌های آسیب دیده، (ب) شاخص‌های آسیب اولیه و (ج) شاخص‌های آسیب اصلاح شده.



(الف)

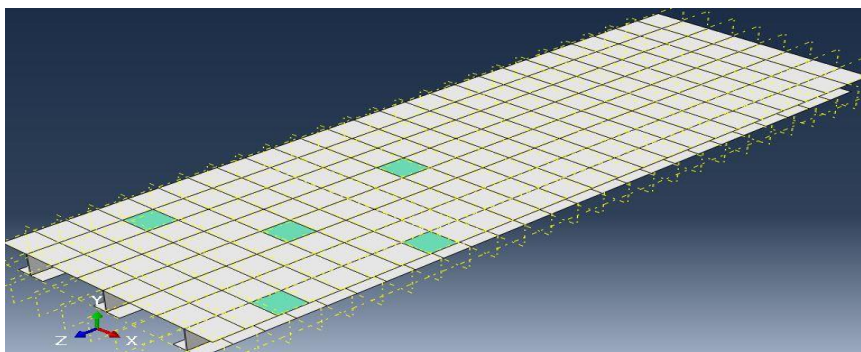


(ب)

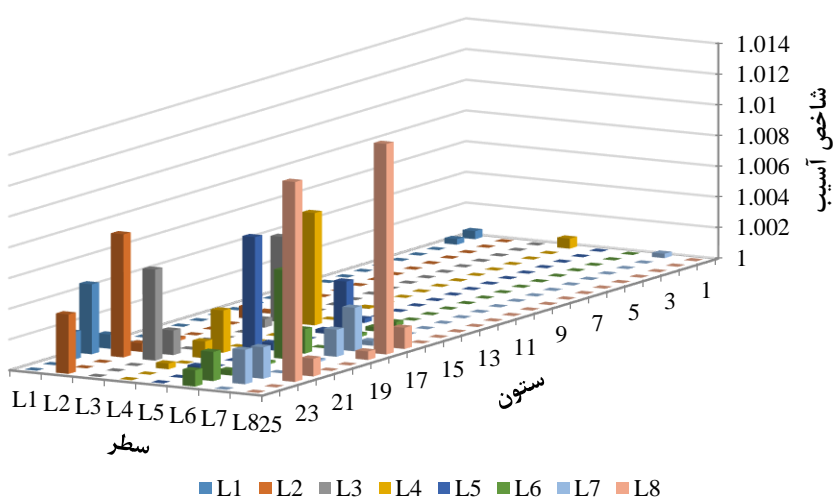


(ج)

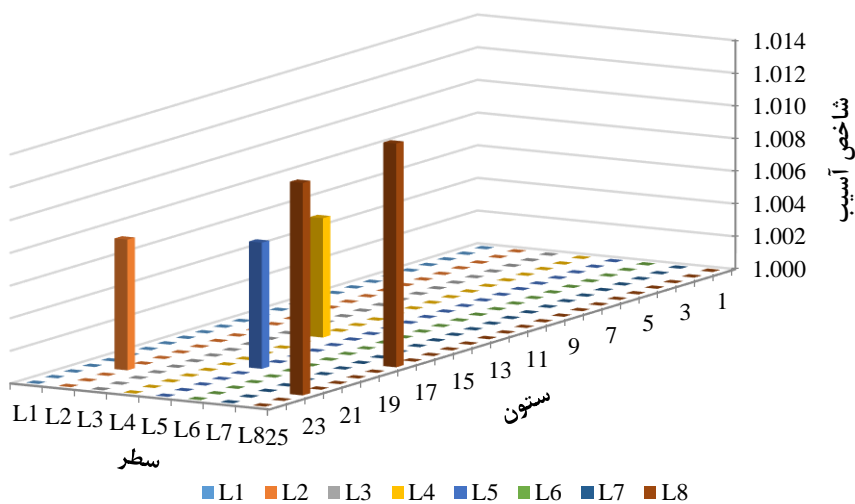
شکل ۵: سناریوی آسیب ۳ (الف) المان‌های آسیب دیده، (ب) شاخص‌های آسیب اولیه و (ج) شاخص‌های آسیب اصلاح شده.



(الف)

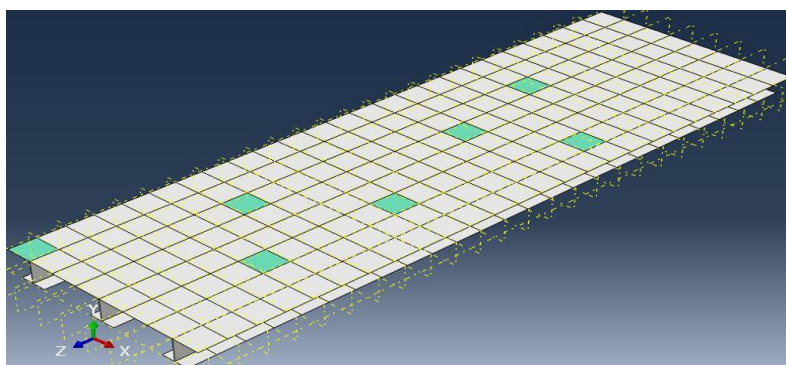


(ب)

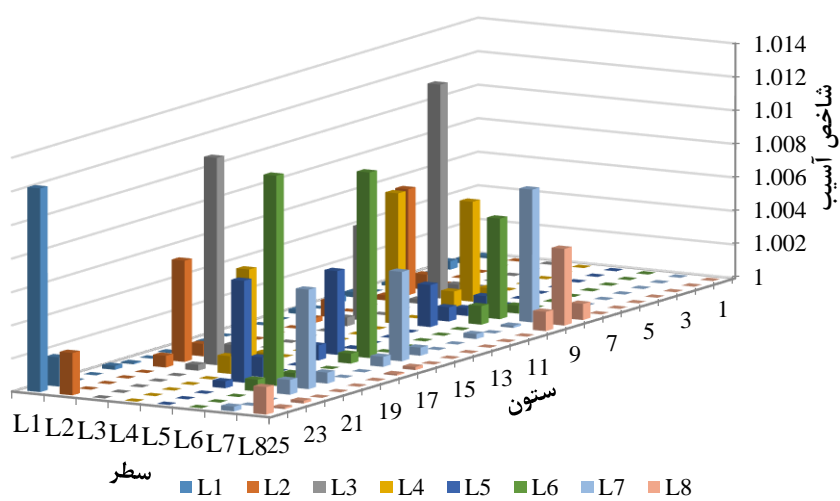


(ج)

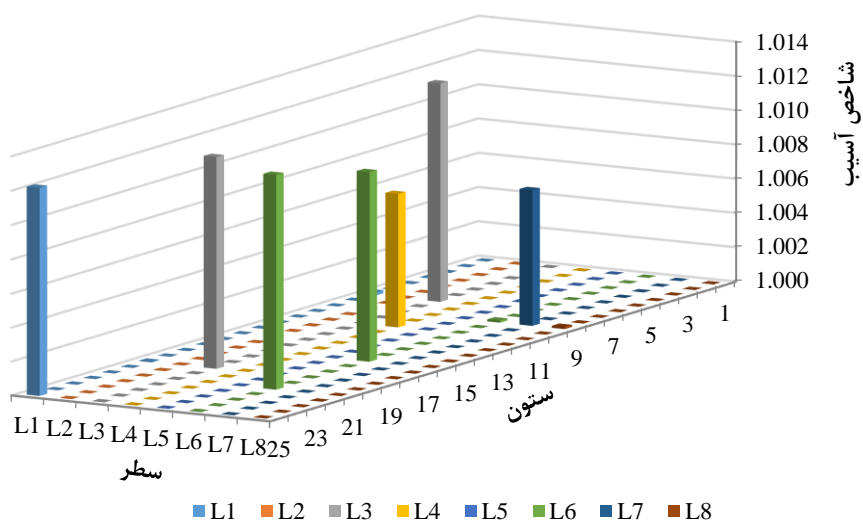
شکل ۶: سناریوی آسیب ۴ (الف) المان‌های آسیب دیده، (ب) شاخص‌های آسیب اولیه و (ج) شاخص‌های آسیب اصلاح شده.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷: سناریوی آسیب ۵ (الف) المان‌های آسیب دیده، (ب) شاخص‌های آسیب اولیه و (ج) شاخص‌های آسیب اصلاح شده.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از یک روش دو مرحله‌ای برای شناسایی مکان آسیب‌های عرشه پل استفاده شده است. در مرحله اول، شاخص‌های آسیب اولیه بر اساس انرژی کرنشی مودال المان‌ها، از روی اشکال مودی سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده محاسبه می‌شوند. در مرحله دوم، شاخص‌های آسیب اصلاح شده با اعمال ضرایب وزنی به شاخص آسیب اولیه برای هر المان سازه به دست می‌آیند. ضرایب وزنی از روی مقادیر شاخص آسیب اولیه محاسبه می‌گردند. شاخص‌های آسیب اصلاح شده، المان‌های آسیب دیده دروغین حاصل از شاخص آسیب اولیه را، که عمدتاً در مجاورت المان‌های آسیب دیده اصلی هستند، کنار می‌گذارد. با مدل‌سازی اجزای محدود عرشه یک پل شامل دال بتنی و سه شاه تیر فولادی، اشکال مودی از طریق انجام تحلیل مودال استخراج گردید و روش دو مرحله‌ای مذکور پیاده‌سازی شد. توسط این روش، آسیب‌هایی با شدت تنها ۵٪ با استفاده از فقط ۲ شکل مود به خوبی شناسایی شدند که این موضوع با توجه به مشکل بودن اندازه‌گیری اشکال مودی در موارد عملی حائز اهمیت زیادی است. در پنج سناریوی آسیب مورد مطالعه، شاخص آسیب اصلاح شده تمامی المان‌های آسیب دیده بزرگتر از ۱ و تقریباً تمامی المان‌های سالم کوچکتر از ۱ بدست آمد. آسیب‌ها به صورت چندگانه (تا هفت المان آسیب‌دیده) و در نقاط مختلف عرشه (مجاورت جان شاه تیرها، حد فاصل بین جان شاه تیرها و ناحیه طره‌ای لبه‌ی عرشه) در نظر گرفته شدند تا مسئله‌ی تشخیص آسیب پیچیده‌تر شود. در تمامی سناریوهای آسیب در نظر گرفته شده، المان‌های آسیب دیده‌ای که در مجاورت جان شاه تیرها قرار داشتند، دارای شرایط مرزی با بیشترین سختی و کمترین مقدار شاخص آسیب (۱/۰۰۷۳ تا ۱/۰۰۸۰) بودند. همچنین، المان‌های آسیب دیده‌ای که در ناحیه طره‌ای لبه‌ی عرشه واقع شده بودند، شرایط مرزی با کمترین سختی را داشته و بیشترین مقدار شاخص آسیب (۱/۰۱۳۰ تا ۱/۰۱۵۰) برای آنها به دست آمد. با استفاده از شاخص انرژی کرنشی اصلاح شده، نیازی به تعریف حد آستانه (که عمومیت نداشته و برای هر سازه مقداری متفاوت دارد)، برای تفکیک المان‌های آسیب‌دیده دروغین از المان‌های آسیب‌دیده اصلی وجود نخواهد داشت. روش ارائه شده در عین سادگی از دقت و کارایی مطلوبی برخوردار است و توانست آسیب‌هایی با درصد پایین و تعداد قابل توجه را به کمک تعداد کمی شکل مود به درستی شناسایی نماید. لازم به ذکر است در صورت وجود آسیب در المان‌های مجاور هم (متصل به یکدیگر) و نیز در صورت وجود المان‌های آسیب دیده با شدت آسیب متفاوت، روش ارائه شده ممکن است قادر به شناسایی تمامی المان‌های آسیب دیده نباشد.

مراجع

- [1] Shih HW, Thambiratnam DP, Chan THT.(2013). Damage detection in slab-on-girder bridges using vibration characteristics. *Structural Control and Health Monitoring*. vol. 20, pp. 1271-1290.
- [2] Kim C-W, Morita T, Oshima Y, Sugiura K.(2015). A Bayesian approach for vibration-based long-term bridge monitoring to consider environmental and operational changes. *Smart Structures and Systems*. vol. 15, pp. 395-408.
- [3] Cornwell P, Doebling SW, Farrar CR.(1999). Application of the strain energy damage detection method to plate - like structures. *Journal of Sound and Vibration*. vol. 224, pp. 359-374.
- [4] Seyedpoor SM.(2012). A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. vol. 47, pp. 1-8.
- [5] Fan W, Qiao P. A.(2012) strain energy-based damage severity correction factor method for damage identification in plate-type structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. vol. 28, pp. 660-678.
- [6] Shih HW, Thambiratnam DP, Chan THT.(2009) Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach. *Journal of Sound and Vibration*. vol. 323, pp. 645-661.
- [7] Dessi D, Camerlengo G.(2015). Damage identification techniques via modal curvature analysis: Overview and comparison. *Mechanical Systems and Signal Processing*. vol. 52-53, pp. 181-205.
- [8] Hu H, Wu C, Lu W-J.(2011). Damage detection of circular hollow cylinder using modal strain energy and scanning damage index methods. *Computers & Structures*. vol. 89, pp. 149-160.
- [9] Vo-Duy T, Ho-Huu V, Dang-Trung H, Nguyen-Thoi T.(2016). A two-step approach for damage detection in laminated composite structures using modal strain energy method and an improved differential evolution algorithm. *Composite Structures*. vol. 147, pp. 42-53.
- [10] Jayasundara N, Thambiratnam DP, Chan THT, Nguyen A.(2019). Damage detection and quantification in deck type arch bridges using vibration based methods and artificial neural networks. *Engineering Failure Analysis*. pp. 104265.
- [11] Yang M, Zhong H.(2018). Damage Detection for Plate-Like Structures Using Generalized Curvature Mode Shape Method. *Earth and Space*. pp. 1078-1087.

- [12] Kaveh A, Zolghadr A.(2017). Guided Modal Strain Energy-Based Approach for Structural Damage Identification Using Tug-of-War Optimization Algorithm. *Journal of Computing in Civil Engineering*. vol. 31, p. 04017016.
- [13] Wang S, Xu M.(2019). Modal Strain Energy-based Structural Damage Identification: A Review and Comparative Study. *Structural Engineering International*. vol. 29, pp. 234-248.
- [14] Eraky A, Anwar AM, Saad A, Abdo A.(2015). Damage detection of flexural structural systems using damage index method – Experimental approach. *Alexandria Engineering Journal*. vol. 54, pp. 497-507.
- [15] Ooijevaar TH, Warnet LL, Loendersloot R, Akkerman R, Tinga T.(2015) Impact damage identification in composite skin-stiffener structures based on modal curvatures. *Structural Control and Health Monitoring*.
- [16] Ashory M-R, Ghasemi-Ghalebahman A, Kokabi M-J.(2018) An efficient modal strain energy-based damage detection for laminated composite plates. *Advanced Composite Materials*. vol. 27, pp. 147-162.
- [17] Choi FC, Li J, Samali B, Crews K.(2008) Application of the modified damage index method to timber beams. *Engineering Structures*. vol. 30, pp. 1124-1145.
- [18] Ooijevaar TH, Loendersloot R, Warnet LL, de Boer A, Akkerman R.(2010). Vibration based Structural Health Monitoring of a composite T-beam. *Composite Structures*. vol. 92, pp. 2007-2015.
- [19] Niu J, Zong Z, Chu F.(2015). Damage identification method of girder bridges based on finite element model updating and modal strain energy. *Science China Technological Sciences*, vol. 58, pp. 701-711.
- [20] Worden K, Friswell MI.(2009). Modal-Vibration-Based Damage Identification. in *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, ed: John Wiley & Sons, Ltd.
- [21] Ramesh L, Srinivasa Rao P.(2018).Damage Detection in Structural Beams Using Model Strain Energy Method and Wavelet Transform Approach. *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 19565-19575.
- [22] Radziński M, Krawczuk M, Palacz M.(2011).Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 2169-2190.
- [23] Limongelli MP, Giordano PF.(2020).Vibration-based damage indicators: a comparison based on information entropy. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 10, pp. 251-266.
- [24] Altunışık AC, Okur FY, Karaca S, Kahya V.(2019).Vibration-based damage detection in beam structures with multiple cracks: modal curvature vs. modal flexibility methods. *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 34, pp. 33-53.
- [25] Abdel Wahab MM, De Roeck G.(1999). Damage detection in bridges Using modal curvatures: application to a real damage scenario. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 226, pp. 217-235.
- [26] Shiradhonkar SR, Shrikhande M.(2011).Seismic damage detection in a building frame via finite element model updating. *Computers & Structures*, vol. 89, pp. 2425-2438.
- [27] Xu Z-D, Liu M, Wu Z, Zeng X.(2011).Energy Damage Detection Strategy Based on Strain Responses for Long-Span Bridge Structures. *Journal of Bridge Engineering*, vol. 16, pp. 644-652.
- [28] Wei ZT, Liu JK, Lu ZR.(2016).Damage identification in plates based on the ratio of modal strain energy change and sensitivity analysis. *Inverse Problems in Science and Engineering*. vol. 24, pp. 265-283