

کاربرد انرژی کرنشی مودال سازه در تعیین محل آسیب‌های سازه‌ای در شبکه‌های دولایه

محمدرضا داودی^۱، حامد تیموری^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشجوی دکتری سازه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

hamed_teimouri@stu.nit.ac.ir

خلاصه

در این تحقیق روش تعیین محل آسیب در شبکه‌های دولایه، بر اساس محاسبه انرژی کرنشی مودال بررسی می‌شود. یکی از راه‌های تعیین آسیب در سازه بر اساس مقایسه مشخصات بین دو سازه سالم و سازه آسیب دیده صورت می‌گیرد. معمولاً خرابی باعث کاهش سختی سازه شده و پارامترهای مودال، شکل مودهای ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی ارتعاش، در سازه آسیب دیده متفاوت با سازه اولیه می‌باشد. بنابراین تغییرات پارامترهای مودال را می‌توان اولین نشانه آسیب در سازه دانست. در این روش با استفاده از شکل‌های مودی، انرژی کرنشی مودی هر المان سازه به دست می‌آید. با بررسی تغییرات انرژی کرنشی مودی در دو حالت سازه سالم و آسیب دیده می‌توان به محل وجود آسیب در سازه پی برد. نتایج عددی نشان می‌دهند که این روش می‌تواند با دقت مناسبی محل آسیب‌ها در شبکه‌های دولایه را تعیین نماید.

کلمات کلیدی: تشخیص آسیب در سازه‌ها، انرژی کرنشی مودی، شبکه‌های دولایه، آنالیز مودال

۱. مقدمه

تعیین آسیب در سیستم‌های سازه‌ای برای پایش سلامتی سازه‌ها و افزایش ایمنی و اطمینان از وضعیت موجود سازه‌ها امری مهم و ضروری است. اگر خرابی در سیستم‌های سازه‌ای به طریقی قابل شناسایی باشد می‌توان با تعمیر یا تعویض المان‌های آسیب دیده از ایجاد خرابی‌های کلی در سازه جلوگیری نمود. در نتیجه سیستم‌های شناسایی و تعیین خرابی می‌توانند نقش بسیار مهمی را در ایمن سازی و بهسازی سازه‌ها و جلوگیری از به وجود آمدن خسارات مالی و جانی ناشی از فرو ریختن سازه‌ها ایفا نمایند. جهت جلوگیری از گسترش خرابی در سازه‌ها، تشخیص عیب‌های موضعی سازه‌ها در طی عمر مفید آن‌ها مهم می‌باشد. روش‌های غیر مخرب جهت عیب یابی سازه‌ها حائز اهمیت بوده و امروزه توسعه زیادی پیدا کرده‌اند. وجود، موقعیت و شدت آسیب در سازه‌ها به وسیله مقایسه مشخصات سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده تعیین می‌شود. آسیب در سازه‌ها منجر به تغییر در مشخصات فیزیکی آن‌ها می‌شود. از آنجایی که پاسخ سازه در حوزه فرکانس به این خواص سازه مرتبط است، می‌توان از مشخصات فرکانسی سازه، که قابل تعیین توسط آزمایش ارتعاش دینامیکی است جهت شناسایی آسیب در سازه‌ها استفاده نمود. در سال‌های اخیر کوشش‌های زیادی جهت تعیین آسیب به وسیله ارتعاش در سازه‌ها انجام گرفته است [۱].

شی و همکاران روش‌هایی را بر مبنای استفاده از تفاوت انرژی کرنشی مودال در سازه‌های خراب و سالم برای پیش بینی محل خرابی و بر اساس تحلیل حساسیت برای تعیین شدت خرابی پیشنهاد نمودند [۲]. شی روش‌هایی را بر اساس استفاده از تفاوت خارج قسمت انرژی عضو و تغییرات انرژی کرنشی مودال برای پیش بینی محل خرابی و بر اساس آنالیز حساسیت برای تعیین شدت خرابی پیشنهاد نمود. کامومیلا و همکاران از یک تیر طره ای آزمایشی برای بدست آوردن اطلاعات درباره عمق خرابی و موقعیت آن استفاده نمودند [۳]. دو نوع از آزمایشات انجام گردیدند؛ ابتدا در یک مکان یکسان عمق آسیب تغییر داده شد و سپس با یک عمق یکسان خرابی، محل خرابی تعیین گردید. استوبس و همکاران روشی را بر مبنای کاهش انرژی

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران

^۲ دانشجوی دکتری سازه

کرنشی مودال با استفاده از اشکال مودی بیان کردند [۴]. در این روش با محاسبه اشکال مودی سازه قبل و بعد از آسیب، موقعیت آسیب تعیین می‌شود. لوی و جی روشی را بر پایه مدل اجزاء محدود و با استفاده از خصوصیات دینامیکی سازه از قبیل فرکانس‌ها و اشکال مودی ارائه نمودند [۵]. از آنجایی که تفکیک پذیری اعضا در شبکه‌های دو لایه به راحتی صورت می‌پذیرد تعیین محل آسیب در این سازه‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. در ادامه روشی برای تعیین محل آسیب در سازه‌ها مبتنی بر بردار انرژی کرنشی مودال ارائه می‌شود.

۲. روش تعیین محل آسیب

به طور کلی تعیین آسیب در سازه‌ها بر اساس مقایسه مشخصات بین دو سازه سالم و آسیب دیده صورت می‌گیرد. زمانی که سازه دچار آسیب می‌گردد، مشخصات سازه دچار تغییر شده که این خود باعث تغییر در فرکانس‌های سازه، اشکال مودی، خاصیت میرایی، استهلاک انرژی و ماتریس‌های سختی و نرمی سازه می‌شود. بنابراین تغییرات پارامترهای مودال را می‌توان اولین نشانه آسیب در سازه دانست. آنالیز مودال روشی برای تعیین فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی یک سازه است. این روش فرم ریاضی به شکل زیر دارد [۶]:

$$(K - \omega_i^2 M)\varphi_i = 0, i = 1, \dots, ndf \quad (1)$$

که در آن K و M به ترتیب ماتریس سختی و ماتریس جرم سازه مورد نظر هستند. و ω_i و φ_i به ترتیب فرکانس طبیعی i ام و شکل مود i ام سازه می‌باشند و ndf تعداد کل درجات آزادی سازه می‌باشد. از آنجایی که بردار اشکال مودی معادل جابجایی‌های نقطه‌ای سازه مورد بررسی است، در هر المان سازه انرژی کرنشی ذخیره می‌شود. انرژی کرنشی مودال (Modal Strain Energy) پارامتر با ارزشی در شناسایی آسیب می‌باشد. انرژی کرنشی المان e م در مود i ام سازه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$mse_i^e = \frac{1}{2} \varphi_i^{eT} K^e \varphi_i^e, i = 1, \dots, ndf, e = 1, \dots, nte \quad (2)$$

که در آن K^e ماتریس سختی المان e م است و φ_i^e بردار جابجایی‌های نقطه‌ای المان e م در مود i ام است. انرژی کرنشی مودی کل مود i ام می‌تواند توسط جمع انرژی کرنشی تمام المان‌ها در آن مود تعیین شود:

$$mse_i = \sum_{e=1}^{nte} mse_i^e, i = 1, \dots, ndf \quad (3)$$

برای مقاصد محاسباتی بهتر است انرژی کرنشی المان‌ها نسبت به انرژی کرنشی کل سازه نرمالیزه شوند:

$$nmse_i^e = \frac{mse_i^e}{mse_i} \quad (4)$$

که $nmse_i^e$ انرژی کرنشی مودی نرمالیزه شده المان e م در مود i ام است. میانگین رابطه شماره ۴ برای nm مود اول می‌تواند به عنوان یک پارامتر موثر استفاده شود:

$$mnmse^e = \frac{\sum_{i=1}^{nm} nmse_i^e}{nm}, e = 1, \dots, nte \quad (5)$$

عموماً آسیب در یک المان سازه‌ای با کاهش یکی از پارامترهای سختی مانند مدول الاستیسته (E)، سطح مقطع عضو (A) و یا ممان اینرسی (I) و ... شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین آسیب در سازه منجر به افزایش MSE و پارامتر $mnmse^e$ می‌شود. با تعیین پارامتر موثر $mnmse^e$ در هر دو حالت سالم و آسیب دیده یک نشانگر موثر نشان دهنده آسیب در المان تعریف می‌شود. این نشانگر شاخص انرژی کرنشی مودی نامیده می‌شود و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$MSEBI^e = \max \left[0, \frac{(mnmse^e)^d - (mnmse^e)^h}{(mnmse^e)^h} \right], e = 1, \dots, nte \quad (6)$$

ذکر این نکته ضروری است که موقعیت آسیب در سازه آسیب دیده نامشخص است، بنابراین در این حالت ماتریس سختی المان سازه سالم برای تخمین پارامتر $(mnmse^e)^d$ استفاده می‌شود.

۳. مدل اجزاء محدود

مدل اجزاء محدود برای یک خریای ۳ بعدی به صورت المان‌هایی با دو نقطه است که در هر نقطه سه درجه آزادی به صورت δx ، δy و δz دارد. ماتریس سختی و ماتریس جرم المان خریای ۳ بعدی به صورت زیر می‌باشد [۷].

$$K_e = \frac{AE}{l_e} \begin{bmatrix} l_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} & l_{ij}n_{ij} & -l_{ij}^2 & -l_{ij}m_{ij} & -l_{ij}n_{ij} \\ l_{ij}m_{ij} & m_{ij}^2 & m_{ij}n_{ij} & -l_{ij}m_{ij} & -m_{ij}^2 & -m_{ij}n_{ij} \\ l_{ij}n_{ij} & m_{ij}n_{ij} & n_{ij}^2 & -l_{ij}n_{ij} & -m_{ij}n_{ij} & -n_{ij}^2 \\ -l_{ij}^2 & -l_{ij}m_{ij} & -l_{ij}n_{ij} & l_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} & l_{ij}n_{ij} \\ -l_{ij}m_{ij} & -m_{ij}^2 & -m_{ij}n_{ij} & l_{ij}m_{ij} & m_{ij}^2 & m_{ij}n_{ij} \\ -l_{ij}n_{ij} & -m_{ij}n_{ij} & -n_{ij}^2 & l_{ij}n_{ij} & m_{ij}n_{ij} & n_{ij}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$M_e = \frac{\rho A l_e}{6} \begin{bmatrix} l_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} & l_{ij}n_{ij} & 0 & 0 & 0 \\ l_{ij}m_{ij} & m_{ij}^2 & m_{ij}n_{ij} & 0 & 0 & 0 \\ l_{ij}n_{ij} & m_{ij}n_{ij} & n_{ij}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} & l_{ij}n_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & l_{ij}m_{ij} & m_{ij}^2 & m_{ij}n_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & l_{ij}n_{ij} & m_{ij}n_{ij} & n_{ij}^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

با دانستن مختصات گره‌های خریا، مقادیر عبارت‌های l_{ij} ، m_{ij} ، n_{ij} و l_e از روابط زیر بدست می‌آیند

$$l_{ij} = \cos(x, X) = \frac{X_j - X_i}{l_e} \quad (9)$$

$$m_{ij} = \cos(y, Y) = \frac{Y_j - Y_i}{l_e} \quad (10)$$

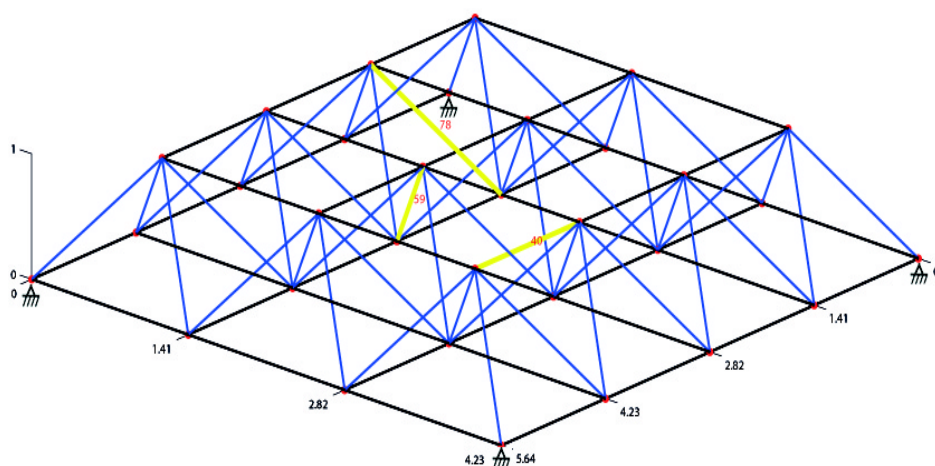
$$n_{ij} = \cos(z, Z) = \frac{Z_j - Z_i}{l_e} \quad (11)$$

$$l_e = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2} \quad (12)$$

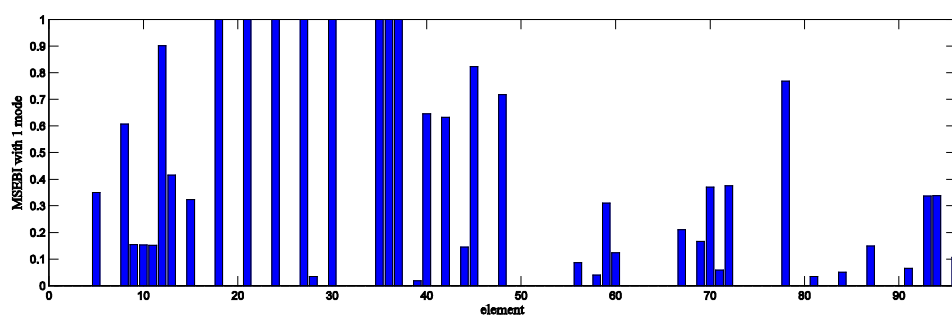
۴. مثال عددی

جهت نشان دادن کارایی روش ارائه شده روش فوق برای تعیین محل آسیب در یک شبکه دو لایه خریایی مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور برنامه‌ای در نرم افزار متلب و بر اساس روش ارائه شده در مقاله نوشته شد. شبکه دو لایه خریایی مورد بررسی در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. در این شکل سطح مقطع اعضا ۰.۰۰۴ m²، طول اعضا ۱.۴۱ m، چگالی اعضا ۷۸۰۰ Ns²/m⁴ و مدول الاستیسیته اعضا ۲۰۰ Gpa می‌باشد. فرض می‌شود آسیب به میزان ۴۰٪ در المان شماره ۴۰، ۳۰٪ در المان شماره ۵۹ و ۶۰٪ در المان شماره ۷۸ اتفاق افتاده است. المان‌های آسیب دیده در شکل شماره ۱ نشان داده شده‌اند.

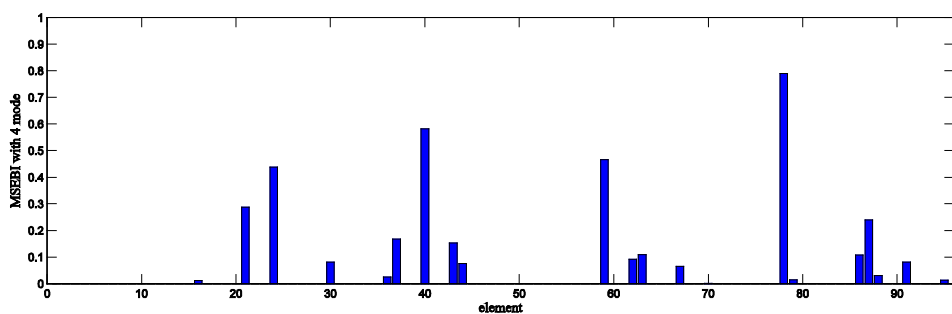
شکل شماره ۲ نمودار مقادیر شاخص آسیب المان‌ها را در صورت در نظر گرفتن یک شکل مود را نشان می‌دهد. شکل‌های ۳ تا ۷ نمودار این مقادیر را به ازای ۴، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۲ شکل مود نشان می‌دهد.



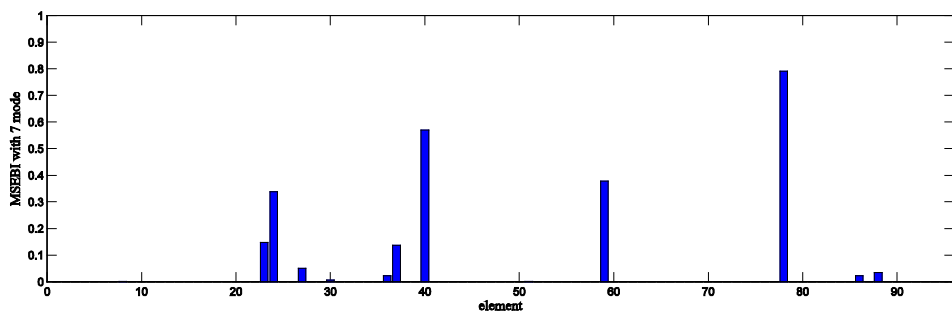
شکل ۱ - تصویر شبکه دو لایه مورد نظر و امان‌های آسیب دیده



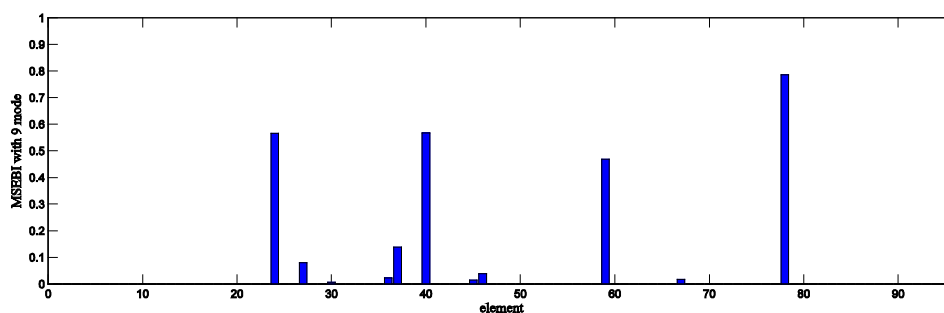
شکل ۲ - شاخص انرژی کرنشی مودی با در نظر گرفتن ۱ شکل مود



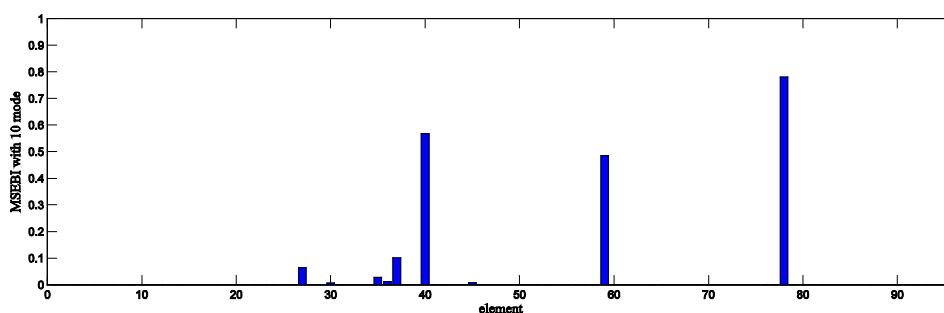
شکل ۳ - شاخص انرژی کرنشی مودی با در نظر گرفتن ۴ شکل مود



شکل ۴ - شاخص انرژی کرنشی مودی با در نظر گرفتن ۷ شکل مود



شکل ۵ - شاخص انرژی کرنشی مودی با در نظر گرفتن ۹ شکل مود



شکل ۶ - شاخص انرژی کرنشی مودی با در نظر گرفتن ۱۰ شکل مود

همان طور که در شکل شماره ۲ مشخص است، در صورتی که تنها از شکل مود اول استفاده شود، شاخص آسیب سازه ای برای ۴۰ المان مقدار غیر صفر را نشان می دهد که خطای بالایی دارد. شکل شماره ۳ شاخص آسیب سازه ای را در صورت در نظر گرفتن چهار شکل مود اول نشان می دهد که برای حدود ۱۸ المان مقداری غیر از صفر دارد. مشاهده می شود با در نظر گرفتن چهار شکل مود به جای یک شکل مود حدود ۵۰٪ به دقت شناسایی موقعیت آسیب اضافه می شود. توجه به این نکته ضروری است که در هر دو حالت ذکر شده المان هایی که واقعاً آسیب دیده بودند در بین المان هایی که به عنوان آسیب دیده شناسایی گردید وجود داشتند.

با مشاهده شکل های شماره ۴ تا ۶ مشاهده می شود، با افزایش تعداد مود های در نظر گرفته شده جهت محاسبه شاخص آسیب، دقت شناسایی محل آسیب بالاتر می رود. اگر المان آسیب دیده را المانی در نظر بگیریم که شاخص آسیب در آن از ۰.۱ تجاوز کند، در این صورت با در نظر گرفتن ۱۰ شکل مود محل آسیب در سازه به صورت دقیق قابل تعیین است.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای تعیین آسیب در شبکه های دو لایه مبتنی بر انرژی کرنشی مودال ارائه گردید. در این روش از شکل های مودی سازه برای تعیین انرژی کرنشی مودال اعضا استفاده می شود. با مقایسه انرژی کرنشی مودال المان در دو حالت سازه سالم و آسیب دیده می توان محل آسیب را شناسایی نمود. برای نشان دادن کارایی روش فوق در شبکه های دو لایه برنامه ای در نرم افزار متلب و بر اساس روش ذکر شده در مقاله نوشته شد. نتایج نشان می دهند این روش با دقت بالایی قادر است المان های آسیب دیده را شناسایی نماید. از آنجایی معمولاً اعضا در شبکه های دو لایه دارای مشخصات فیزیکی و هندسی یکسان هستند و قابلیت تفکیک پذیری بالایی دارند، تعیین موقعیت آسیب در این سازه ها دارای اهمیت بالایی می باشد. با تعیین المان های آسیب دیده می توان از طریق تعمیر یا تعویض اعضای آسیب دیده از ایجاد خرابی کلی در سازه جلوگیری کرد. همان طور که از نتایج مشخص است این روش به کمک تعداد محدودی از شکل های مودی سازه قادر به شناسایی اعضای آسیب دیده می باشد.



۶. مراجع

1. Z. Zhou, "Vibration-based damage detection of simple bridge superstructures." University of Saskatchewan, 2006.
2. Z. Y. Shi, S. S. Law, and L. M. Zhang, "Structural damage localization from modal strain energy change," Journal of sound and vibration, vol. 218, no. 5, pp. 825–844, 1998.
3. G. Camomilla, M. Donferri, A. GENNARI SANTORI, and L. Materazzi, "Reflectometric and dynamic measurements on the stays of the Polcevera viaduct in Genoa (Italy)," in BRIDGE MANAGEMENT 2: INSPECTION, MAINTENANCE ASSESSMENT AND REPAIR. PAPERS PRESENTED AT THE SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON BRIDGE MANAGEMENT HELD 18-21 APRIL 1993, UNIVERSITY OF SURREY, GUILDFORD, 1993.
4. Stubbs and J.-T. Kim, "Damage localization in structures without baseline modal parameters," Aiaa Journal, vol. 34, no. 8, pp. 1644–1649, 1996.
5. M. Ge and E. M. Lui, "Structural damage identification using system dynamic properties," Computers & structures, vol. 83, no. 27, pp. 2185–2196, 2005.
6. S. M. Seyedpoor, "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, no. 1, pp. 1–8, 2012.
7. S. S. Quek and G. R. Liu, Finite Element Method: A Practical Course: A Practical Course. Butterworth-Heinemann, 2003.